



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE VISIÓN
DE LUZ VISIBLE E INFRARROJA PARA
VEHÍCULO AÉREO AUTÓNOMO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

MARIANO LÓPEZ ESCOBEDO

ASESOR DE TESIS:

M.A. JESÚS ROVIROZA



CIUDAD UNIVERSITARIA

OCTUBRE DE 2009

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Facultad de Ingeniería

*Diseño de un sistema de visión de luz visible e
infrarroja para vehículo aéreo autónomo*

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA

Mariano López Escobedo

Asesor de Tesis
M.A. Jesús Roviroza

Ciudad Universitaria
Octubre 2009

Agradecimientos

Agradezco mucho a mis padres por haberme dado vida.

Y a todas aquellas personas que de alguna forma u otra han cruzado y marcado mi camino.

Gracias

Tema: Diseño Mecánico

Título: Diseño de un sistema de visión visible e infrarrojo de alto desempeño para vehículo aéreo autónomo.

Objetivo:

Desarrollar un dispositivo que cumpla con las especificaciones de diseño y que pueda acoplarse a un vehículo aéreo autónomo específico, con la función de obtener imágenes de luz visible e infrarroja aéreas vía cámaras montadas en él.

Hipótesis:

Es posible crear un prototipo del dispositivo, utilizando herramientas y técnicas de diseño mecánico, para que se dé una idea clara de sus componentes, su funcionamiento y su acoplamiento con el vehículo aéreo en el que se pretende montar.

Índice

Capítulo 1 – Introducción	3
1.1 El campo de las imágenes aéreas, importancia y aplicación	
Capítulo 2 – Equipos de visión visible e infrarrojos	7
2.1 La cámara infrarroja (Descripción y funcionamiento)	
2.2 La cámara visible (Descripción y funcionamiento)	
2.3 Sistemas de visión visible e infrarrojo en el mercado (Descripción y funciones)	
Capítulo 3 – Especificaciones de diseño, componentes y materiales	28
3.1 Especificaciones de diseño	
3.2 Benchmarking comparativo	
3.3 Componentes, materiales y sujeciones	
Capítulo 4 – Modelado virtual	53
4.1 Modelado de los componentes adquiridos	
4.2 Componentes diseñados	
4.3 Ensamble del sistema	
4.4. Revisión del sistema	
Capítulo 5 – Conclusiones y recomendaciones	115
Bibliografía	117
Apéndices	119

Capítulo 1. Introducción

El siglo XX vio el nacimiento de la aviación moderna, un 17 de Diciembre de 1903 en donde los hermanos Wright levantaron por primera vez una aeronave impulsada por un motor, dando por terminado un reinado marítimo que había durado más de quinientos años. Gracias a este acontecimiento, el hombre se dispuso a invertir grandes esfuerzos por crear aeronaves que fueran seguras y veloces.

Los países armamentistas se dieron cuenta del poder de una aeronave como arma de guerra, por lo que el desarrollo aeronáutico comenzó en la industria militar, para luego ser adaptado al uso civil, deportivo y comercial.

La utilización de aeronaves para realizar imágenes aéreas se inició en la Segunda Guerra Mundial. A partir de entonces, el gran desarrollo de la aeronáutica y de la captura de imágenes ha avanzado con gran rapidez a nivel mundial.

El uso de imágenes aéreas tiene aplicación en una gran variedad de campos, siendo la industria militar la que más ha apostado por el desarrollo de tecnología. El uso civil abarca áreas como la agricultura, vigilancia forestal, geotecnia, industria eléctrica, industria petrolera, etc.

En un principio, las fotografías y videos tomados por aeronaves eran de baja calidad, ya que las vibraciones que se producían provocadas por los sistemas de propulsión y el propio vuelo, hacían que las imágenes no fueran nítidas. Sin embargo esto cambió con el desarrollo de estabilizadores de vuelo y sistemas de control como los giróscopos electrónicos.

Con esto fue posible obtener imágenes fáciles de analizar, además de que las cámaras fotográficas y de video fueron adquiriendo mayor resolución y mayor enfoque de acercamiento (*zoom*), dando como resultado imágenes de muy alta calidad y definición.

Más tarde, con el desarrollo de la industria aeroespacial, se pudo montar cámaras telescópicas en los satélites que orbitaban la tierra, por lo que comenzó la era de la imagen satelital. Ésta tecnología estuvo varios años en poder de un selecto grupo de países desarrollados, principalmente para uso militar y de espionaje, pero hace unos pocos años salieron a la sociedad en general este tipo de imágenes, a través de diversos programas para computadoras como son el Google Earth y el Geolocalizador entre otros.

La industria aeronáutica en sí, vio un gran beneficio con el desarrollo aeroespacial, principalmente con el sistema GPS (*Global Positioning System*). Este sistema es capaz de identificar la posición geográfica de un punto a través de la red de satélites geoestacionarios que se tienen alrededor del planeta. Así, las aeronaves son capaces de saber en cualquier momento en que punto del planeta se encuentran. Esto dio paso al desarrollo de vehículos aéreos no tripulados, (UAV[∅]) por sus siglas en inglés.

[∅] *Unmanned Aerial Vehicule*

En un principio, este tipo de vehículos fueron usados en operaciones militares de reconocimiento y de inteligencia, y en un futuro se prevé que puedan ser utilizados en combate gracias al gran desarrollo tecnológico que ha habido en automatización. Sin embargo, el uso de las aeronaves autónomas no es de uso exclusivo militar, ya que también tiene un gran potencial civil, en beneficio de la sociedad.

Actualmente existe una gran variedad de UAV en el mercado internacional, que debido a que no son tripulados, deben contar con un sistema de cámaras y sensores para poder obtener parte de la información para su direccionamiento. Así mismo, estos vehículos pueden portar cámaras que capturan diversos tipos de información en las zonas sobre las que sobrevuelan.

Las cámaras más utilizadas, son cámaras fotográficas y de video. Otro tipo de cámaras también utilizadas, son las cámaras infrarrojas, que en últimos años han tenido gran impacto en una variedad de campos. Este tipo de cámaras obtienen las imágenes térmicas a través de procesos electrónicos que dan como resultado imágenes digitales.

Se ha oído hablar mucho a partir de los últimos 10 años de las imágenes digitales, que como ya se mencionó, es el tipo de imagen que genera una cámara infrarroja, pero que también es el tipo de imágenes que se obtienen de las cámaras fotográficas y de video digitales, que al igual que la cámara infrarroja, emplean este tipo de tecnología. Por esta razón han quedado relegadas aquellas cámaras donde se utilizaba una cinta con un material fotosensible para obtener las imágenes, con excepción de algunas personas que creen que la imagen digital es de menor calidad y de menor valor artístico

Una aeronave no tripulada puede tener un sistema de montaje que se adapte a una gama de cámaras, pero generalmente el rango depende del tipo de aeronave que se tenga y del tipo de vuelo que realice, ya sea de gran altura, por lo que se requerirán fotolentes que sean capaces de aumentar la imagen pero que de igual forma perderán campo de visión, o que sean capaces de montar cámaras con lentes con un campo de visión natural cuando la aeronave tenga vuelos de baja altitud. También dependerá mucho del tiempo de vuelo de la aeronave, pues mientras más tiempo se quiera documentar, los dispositivos de almacenamiento de información serán más voluminosos y de mayor peso.

Es por esto que el diseño de un sistema de visión aéreo está muy ligado al diseño aerodinámico del vehículo aéreo autónomo y a sus parámetros. Es decir, el sistema de visión aéreo debe ajustarse a las condiciones de vuelo y autonomía de la aeronave en el que se instala.

Por otro lado, gracias al avance que han tenido los procesadores y la capacidad de memoria de las computadores actuales, se han desarrollado distintos programas de diseño para ingeniería en donde es posible realizar modelos en tercera dimensión a partir de figuras geométricas como el cilindro, esfera, cubo, etc., así como superficies, y aplicando relaciones matemáticas entre ellas que permiten fabricar objetos en tercera dimensión.

Sin embargo, las licencias de este tipo de programas son caras, principalmente a la complejidad de las relaciones utilizadas en la creación de los objetos, pero principalmente a la reducción de costos que implica el uso de estos programas en un proceso de diseño.

En este trabajo se realizó una investigación para poder crear un diseño de un sistema que contiene una cámara de video digital de alta definición y una cámara infrarroja, para ser montado en un dirigible de investigación autónomo, en desarrollo actualmente dentro del Instituto de Ingeniería de la UNAM, y que se adapte completamente al diseño de éste, así como a los requerimientos del proyecto, los cuáles se mencionan dentro de este documento.

Esto fue posible, gracias al uso de un programa de diseño asistido por computadora llamado Solid-Edge, que la Facultad de Ingeniería de la UNAM, a través del Laboratorio de Ingeniería Mecánica asistida por computadora (LIMAC) me facilitó para la realización.

La investigación está dividida en 5 capítulos organizados de la forma siguiente:

Capítulo 1: Presenta una breve descripción histórica de la aviación y de las imágenes aéreas, además de los dispositivos utilizados en la obtención de éstas y su importancia actual en diversos campos científicos, es decir, es una introducción al marco donde se encuentra esta investigación.

Capítulo 2: Se explica de forma sencilla paso a paso el proceso en cómo se obtienen las imágenes infrarrojas y la aplicación de este tipo de tecnología en otras áreas de la investigación científica y su uso en el campo de las imágenes aéreas. Así mismo, se da una descripción de las cámaras digitales de video, sin entrar mucho a detalle en información técnica, pues este trabajo no pretende ser de carácter electrónico y únicamente se resaltan los puntos más importantes del proceso de obtención de las imágenes debido a que posteriormente serán de ayuda para determinar qué cámara de video digital utilizará el sistema, de entre muchas que existen en el mercado.

Por último, se presentan los sistemas que al igual que el sistema diseñado en este trabajo, utilizan una cámara de video y una cámara infrarroja para la toma de imágenes aéreas, y que se encuentran actualmente en el mercado para su venta y que pueden ser adaptadas a diferentes aeronaves, principalmente a helicópteros.

Capítulo 3: La columna medular de este trabajo se encuentra dentro de este capítulo, pues aquí se describen como se obtuvieron requerimientos para el diseño (especificaciones de diseño), como son el espacio destinado que se tiene para el montaje de cámaras dentro de la zona de carga del dirigible, la velocidad de movimiento del sistema y el rango de movimiento en el eje horizontal y vertical. En este capítulo también se describen todos los componentes que se encuentran en el sistema como son las cámaras, los materiales que se utilizaron, los motores eléctricos, etc., y por qué se escogió cada uno de ellos a partir de las especificaciones originales. Una vez que se cuenta con los accesorios necesarios para poder realizar el montaje, se describe paso a paso el proceso de diseño del sistema.

Capítulo 4: Se encuentran los dibujos del montaje y el sistema instalado en la góndola del dirigible.

Capítulo 5: Se hace un análisis al diseño que se tiene como resultado de esta investigación, para poder determinar si éste cumple con las especificaciones que se tenían desde un principio, impuestas por el proyecto del dirigible.

También se dan algunas recomendaciones de dispositivos que pueden mejorar el funcionamiento del sistema, pero que no se desarrollaron en este trabajo debido a que su campo de aplicación se encuentra fuera de esta investigación.

Se hace una comparación de los sistemas presentados en el segundo capítulo, para ver las diferencias que existen entre estos, y a partir de esto y los resultados obtenidos, se saquen conclusiones.

Por último me gustaría mencionar que este trabajo tiene como único fin su aplicación en el apoyo a la investigación científica, a través del análisis de las imágenes capturadas, y que por ningún motivo se podrá utilizar con fines militares o que de alguna forma u otra generen información que sea utilizada para crear algún daño sobre la sociedad mexicana o cualquier individuo o sociedad.

Capítulo 2. Equipos de visión visible e infrarrojos.

Dentro de este capítulo se da una descripción básica del funcionamiento y componentes, así como los factores más relevantes, que intervienen en la toma de imágenes térmicas y visibles a través de cámaras de video.

Se da una descripción de los componentes que conforman los sistemas ópticos e infrarrojo, principalmente de los sensores que convierten las radiaciones en señales digitales. Esto con la finalidad de que el lector tenga una idea de cuáles fueron los criterios que se tomaron en cuenta en la elección de la cámara infrarroja y la cámara de video con las que fue equipado el sistema propuesto.

Dichos criterios tuvieron como base las especificaciones de diseño con los que se contaba desde un principio y que fueron determinados dentro del grupo del Instituto de Ingeniería.

Debido a que los principios básicos del funcionamiento electrónico entre la cámara infrarroja y la cámara visible (amplificadores, convertidor análogo-digital, ruido, etc.) son parecidos hablando en términos generales, se encuentran descritos únicamente en la parte donde se habla de la cámara visible. Pero hay que mencionar que al influir la parte electrónica en las especificaciones de diseño, como es la potencia requerida, la cámara infrarroja también tiene que tomar en cuenta estos principios.

La última parte de este capítulo presenta modelos de características parecidas al sistema propuesto en esta tesis. Estos modelos se encuentran actualmente en el mercado. Se da información de cada modelo relacionada con las especificaciones que se presentan en el siguiente capítulo, con el fin de que se pueda hacer una comparación con el “**Sistema de Visión Visible e Infrarrojo para Vehículo Aéreo Autónomo**” (SVVIVAA), y así dar sustento a la decisión de proponer el sistema con el que se obtendrán las imágenes durante los vuelos del dirigible, a través de este trabajo en vez de adquirir uno de los sistemas comerciales.

2.1 El módulo infrarrojo

2.1.1 Imágenes térmicas

Una imagen térmica se obtiene al aplicar técnicas que permitan convertir un escenario con radiación térmica, la cuál es invisible para el ojo humano, en imágenes visibles.

La imagen térmica es un campo que ha visto un importante desarrollo en los últimos años, esto debido a las aplicaciones que puede tener en distintas áreas. Esta utilidad se debe principalmente a que:

1. Es una técnica pasiva, es decir que no requiere de fuentes externas o de iluminación, por lo que puede operar de día y de noche.
2. Ideal para la detección de puntos calientes o fríos, o de áreas con diferentes emisividades dentro de una escena.
3. La radiación térmica puede penetrar humo y niebla más fácilmente que la radiación visible, permitiendo la detección de objetos oscuros visualmente.
4. Es una técnica en tiempo real y de detección remota.

Las cámaras infrarrojas detectan la radiación que continuamente están emitiendo todos los objetos. Dicha radiación, depende de la temperatura del objeto y del valor de su emisividad. La tabla 1.1 muestra la emisividad de algunos materiales.

Tabla 1.1 Emisividad de algunas sustancias y materiales

Superficie	Temperatura (°C)	ϵ
Agua	100	0.963
Lámina de acero	900	0.60
Níquel	226	0.07
Plata	38	0.022
Oro	226	0.018
Ladrillo	21	0.93
Hule	18	0.945
Aluminio	226	0.039
Carbón	126	0.81

Fuente: Aubrey I. Brown, Salvatore M. Marco, "Transmisión de calor", Tercera edición, Compañía Editoria Continental S.A., pp. 135-138, México, 1958

La emisividad está en función de la longitud de onda de la superficie del objeto. Cuando llueve, la película de agua que se forma en la superficie del objeto, hará que la emisividad de éste cambie aún estando a la misma temperatura de cuando está seco. Es con base en este fenómeno como las cámaras infrarrojas determinan la temperatura de un objeto dentro de la escena.

Un cuerpo negro es un objeto que emite la máxima energía teórica para una temperatura dada, es decir que su emisividad es 1.

Por lo tanto, los objetos que no son cuerpos negros emiten únicamente una fracción de la radiación. La radiación total recibida en una cámara térmica proveniente de cualquier objeto, será la suma de la radiación emitida, reflejada y transmitida.

Planck fue un científico pionero en la investigación de la radiación térmica, y las ecuaciones que determinan la cantidad de fotones térmicos (rayos emitidos), así como su longitud de onda, están determinados por unas ecuaciones que llevan su nombre.

La ventana que va de 2 a 15 μm , en la región infrarroja o térmica del espectro electromagnético, contiene la máxima emisión de radiación para los propósitos de la imagen térmica.

2.1.2 Sistema infrarrojo

Un sistema típico de detección de radiación infrarroja está configurado como se muestra a continuación.



Figura 2.1 Proceso de obtención de una imagen infrarroja digital

La fuente, es cualquier objeto que tenga una temperatura por encima de 0 K, o para el propósito de la imagen térmica, un conjunto de objetos a diferente temperatura.

Los medios de transmisión pueden ser el vacío, la atmósfera terrestre o fibras infrarrojas.

Sin embargo, debido a la absorción de la radiación térmica por parte de moléculas de vapor de agua y bióxido de carbono presentes en la atmósfera, las cámaras infrarrojas trabajan en dos ventanas espectrales, que van de 3-5 micro metros y de 8-13 micro metros, como lo muestra la siguiente gráfica.

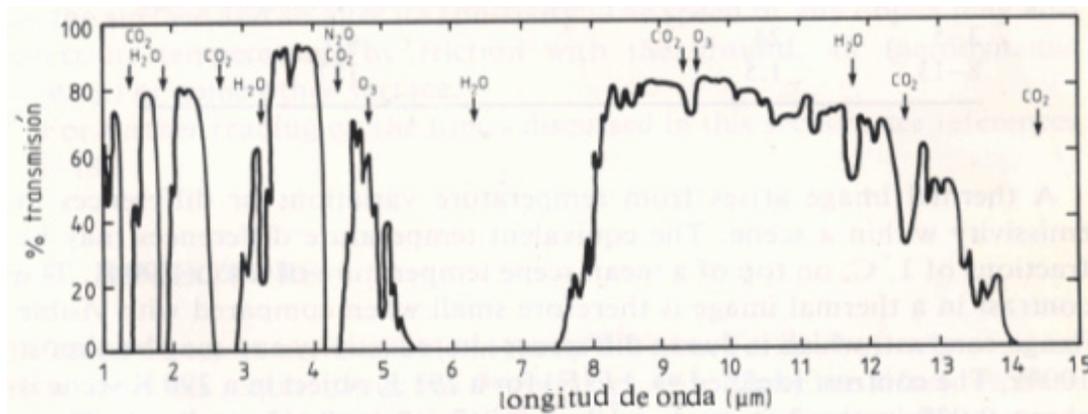


Figura 2.2 Transmisión de radiación infrarroja en el medio ambiente terrestre

Fuente: S.G. Burnay, T.L. Williams, C.H.N. Jones, "Applications of Thermal Imaging", Ed. Adam Hilger, p.p. 3, Gran Bretaña, 1988.

La banda de 8-13 micro metros se usa en aplicaciones donde se requiere una mejor transmisión de la radiación a través de humo y niebla. Por lo que para propósitos de imágenes aéreas, donde se tienen atmósferas con condiciones como las anteriores, es preferible el uso de cámaras térmicas que trabajen en esta ventana. La banda que va de 3-5 micro metros puede ser apropiada para la detección de objetos muy calientes o cuando se requiere tener un contraste mayor en la imagen.

El sistema óptico no está elaborado de vidrio, como los lentes usados en cámaras visibles, ya que el vidrio no transmite radiaciones con una longitud de onda mayor a 2.5 micro metros. Por esta razón, son variados los materiales que se usan en la fabricación de sistemas de lentes infrarrojos. En la siguiente figura se muestran estos materiales.

Material	dureza Knoop	índice Refractivo(10 μm)
Ge	692	4
Si	1000	3.4
ZnS	250	2.2
ZnSe	130	2.4
MgF ₂	—	1.38
Al ₂ O ₃	1370	at 5 μm 1.59
KCl	8	1.46
C	9800	2.4

Figura 2.3 Materiales anti-reflejantes de radiación infrarroja

Fuente: S.G. Burnay, T.L. Williams, C.H.N. Jones, “Applications of Thermal Imaging”, Ed. Adam Hilger, p.p. 17, Gran Bretaña, 1988.

El Germanio es el material más usado en lentes para cámaras térmicas en la ventana que va de 8-13 micro metros, mientras que el silicio es usado en cámaras dentro del rango de 3-5 micro metros. Los lentes deben tener una cubierta anti reflejante, para que no se pierda parte de la radiación incidente por el fenómeno de reflexión. El espesor de la cubierta dependerá del índice de reflectividad de cada material.

El sistema de lentes sirve para direccionar la radiación hacia un sistema de detectores, que como su nombre lo indica, detectan la cantidad y distribución de radiación térmica que hay en la escena.

Existen diferentes tipos de detectores, los detectores térmicos y los foto detectores o quantum detectores.

Los detectores térmicos están hechos de un material con una propiedad física que depende de la temperatura. Cuando los detectores térmicos detectan radiación incidente, el material se calienta, produciendo así un cambio físico cuantificable.

La ventaja de estos detectores, es que funcionan a temperatura ambiente, por lo que no es necesario tener sistemas de enfriamiento. El bolómetro es un material usado ampliamente en detectores térmicos. Este material es un semiconductor que al tener un cambio de temperatura, muestra un cambio en su resistencia eléctrica, por lo que se pueden medir variaciones en señales eléctricas que se relacionen con la radiación incidente en el detector.

Por otro lado se encuentran los foto detectores, que como su nombre lo indica, detectan la radiación infrarroja incidente en forma de fotones, los cuáles excitan cargas en un material. Se utilizan materiales con cargas que puedan ser excitadas por fotones con una energía igual o mayor a la energía de enlace que existe entre las cargas.

Hoy en día son mayores las cámaras infrarrojas que utilizan este tipo de detectores, debido principalmente a que el tiempo de respuesta es mejor que los detectores térmicos. Sin embargo, una desventaja es que los aparatos que utilizan foto detectores, deben tener un sistema de enfriamiento integrado para poder mantenerlos a muy bajas temperaturas; y así disminuir el ruido en las señales de salida, provocado principalmente por la transmisión de calor de la propia cámara a los detectores.

Debido a lo anterior y a la tecnología más reciente con la que trabajan los quantum detectores, el precio de las cámaras con este tipo de dispositivos tienen un mayor precio que las cámaras que utilizan detectores térmicos. Pero su precio ha venido disminuyendo principalmente por las nuevas tecnologías que están surgiendo en sistemas de enfriamiento, principalmente los que basan su funcionamiento en el ciclo Stirling, además de nuevas tecnologías en compresores.

Los foto detectores pueden ser divididos en detectores fotoconductivos y detectores fotovoltaicos. La diferencia entre estos dos se da en la forma en que convierten la cantidad de radiación incidente o fotones, en una señal eléctrica.

En un detector fotoconductivo, las cargas foto generadas, producen un incremento en la conductividad del material. Si se aplica una corriente constante a través del detector, habrá una baja correspondiente en la señal de voltaje de salida, al igual que en el detector térmico.

El funcionamiento de los detectores fotovoltaicos consiste de una junta entre un material de tipo n y un material de tipo p. La difusión de las cargas a lo largo de la junta, provoca una barrera de potencial. Cuando un fotón es absorbido, se genera un vacío de electrones de un lado del material tipo p. Al aplicar un voltaje entre los dos materiales, se puede medir la cantidad de radiación incidiendo en el sensor.

La figura 2.4 muestra una tabla con los materiales usados en foto detectores donde también se muestra la longitud de onda de corte de cada material.

Material	Modo de operación	Temp. operación (K)	longitud de onda corte (μm)
InSb	PC	195	6.0
InSb	PC,PV	77	5.2
PbSe	PC	195	5.1
PbSe	PC	77	6.6
PbTe	PC	77	5.4
$\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$			
$x = 0.85$	PV	77	10
$x = 0.83$	PV	77	11
$x = 0.81$	PV	77	12
$x = 0.80$	PV	77	13
$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$			
$x = 0.219$	PC,PV	77	10
$x = 0.212$	PC,PV	77	11
$x = 0.206$	PC,PV	77	12
$x = 0.201$	PC,PV	77	13
$x = 0.314$	PC,PV	195	4.2
$x = 0.297$	PC,PV	195	4.6
$x = 0.282$	PC,PV	195	5.0
PtSi	Schottky	77	5.1

Figura 2.4 Materiales usados en la fabricación de foto-detectores

Fuente: S.G. Burnay, T.L. Williams, C.H.N. Jones, "Applications of Thermal Imaging", Ed. Adam Hilger, p.p. 10, Gran Bretaña, 1988.

Los detectores son acomodados en arreglos de detectores de dos dimensiones para poder tener una mayor sensibilidad térmica. Generalmente se tratan de poner la cantidad de detectores en un arreglo para que sea posible tener una correspondencia de uno a uno con el número de píxeles que se desean de la escena.

El procesamiento de la señal de salida del arreglo de detectores, puede ser serial o en paralelo, o una combinación de las dos, serial-paralelo. Esta es la forma en cómo se lee la información de cada detector dentro del sensor para producir la imagen térmica.

Una vez que se ha leído la información de una exposición, se obtiene una señal análoga, la cual es transmitida hacia un amplificador y luego es convertida en información digital a través de un convertidor análogo-digital.

Este proceso es prácticamente igual al proceso de señales que se realiza en las cámaras de video, y el cuál será explicado con mayor detalle en páginas subsecuentes, donde se explica el funcionamiento de la cámara visible.

2.1.3 Campos de aplicación de la imagen térmica

La imagen térmica tiene aplicación en un rango muy amplio de campos, ya sean industriales o de investigación. A continuación se dará una descripción breve, de algunos de los campos donde se tiene uso de la termografía y como la usan.

Una de las principales aplicaciones de la termografía infrarroja, es la industria de componentes eléctricos. Esto se debe a que la mayoría de los puntos donde se realizan mediciones de temperatura para medir el desgaste de los dispositivos, son difíciles de acceder. Cuando los aislantes térmicos usados en líneas de transmisión de alta tensión tienen un gran deterioro, la temperatura de estos comienza a incrementarse. Los vuelos para detectar aislantes con poca vida útil a través de cámaras infrarrojas son llevados a cabo en helicópteros por el hecho de que los postes que sujetan las líneas, se encuentran por lo general en zonas de difícil acceso. Este campo es un muy buen ejemplo si se quiere saber donde aplicar la tecnología del dirigible de investigación.

Otro campo con gran uso de imagen térmica, es el que se encarga de realizar pruebas en edificios para obtener su desempeño térmico, es decir, cuánto calor pierde o gana el edificio. Gracias al uso de cámaras infrarrojas, es posible detectar puntos donde se tengan fugas de aire caliente, o puntos donde se pueda tener filtración de aire exterior con diferente temperatura a la que se desea tener dentro del edificio.

En meteorología, las observaciones desde satélites, han permitido que el estado de la atmósfera pueda ser medido con mayor detalle. Las observaciones más importantes usadas en meteorología son las imágenes térmicas. Estas imágenes son usadas para crear pronósticos más acertados a través del monitoreo del clima.

Los pronósticos se obtienen al realizar modelos en una computadora que simulen los movimientos de la atmósfera, y estos movimientos son captados por cámaras infrarrojas.

La vigilancia aérea es el campo donde se desempeñará el dirigible de investigación, y abarca muchas actividades que van desde la recolección de información para investigación, hasta vigilancia forestal.

Por otro lado, se tiene el campo médico, que ha visto una gran aplicación en distintas áreas. La temperatura interna del cuerpo humano ha sido la base de la mayoría de los indicadores de defunción en la historia de la medicina. A través de un escaneo térmico, es posible detectar puntos con elevada temperatura, o fuera de lo normal que ayuden a medir la fiebre y a caracterizar el progreso de una enfermedad.

Dentro de la ingeniería mecánica, la imagen térmica ha servido como apoyo en la creación de modelos que expliquen la propagación de esfuerzos termo-elásticos en un material cuando a este se le aplica una fuerza y es deformado. La concentración de esfuerzos, provoca que el material pierda algunas de sus propiedades o pueda llegar a fallar en esa zona.

El campo de análisis de esfuerzos termo-elásticos ha mejorado los modelos de predicción gracias al uso de imágenes térmicas.

Estos son algunos de los campos de investigación que han hecho de la imagen térmica, una herramienta indispensable para el desarrollo de modelos. Sin embargo existen otros más, que no se mencionan en este trabajo.

2.2 El módulo visible

En el transcurso de los últimos años, la imagen digital ha tenido un gran desarrollo comercial, por lo que ahora es posible encontrar una gran variedad de cámaras digitales, ya sean fotográficas o de video, en el mercado. Gracias a esto, se puede obtener información en libros y en la red que describen detalladamente el proceso por el cual se logra obtener una imagen digital de un escenario en particular. También se encuentra información de las nuevas tecnologías en este campo, como es la alta definición (HD) en cámaras digitales y los dispositivos de almacenamiento de información. En este sub-capítulo se da una idea básica de las dos principales formas de obtener imágenes digitales visibles más usadas hoy en día y dar también una idea de las imágenes de alta resolución, ya que la cámara digital utilizada en el sistema diseñado en este trabajo maneja imágenes de este tipo.

En un principio, la imagen digital no tuvo un desarrollo muy acelerado, debido a que las computadoras en los años de 1960, época en la que surgió esta tecnología, no contaban con la suficiente velocidad de procesamiento de información como para poder obtener imágenes en tiempo real. Es por esto que el desarrollo de este campo va muy ligado con el desarrollo de tecnología en procesadores. Hoy en día se tienen chips que son capaces de procesar cantidades muy grandes de información y es posible obtener imágenes en tiempo real y de alta definición, es decir con una gran cantidad de información.

2.2.1 Sistema de radiación visible

Al igual que un sistema de detección de radiación infrarroja, un sistema de detección de radiación visible se compone de lo siguiente:

1. Un escenario u objeto que refleje o genere radiación visible,
2. Un sistema óptico que dirija la radiación (lentes),
3. Un sensor que detecta la radiación y emite una señal análoga
4. Sistema que procesa la información proveniente del sensor y la convierte en imágenes digitales.

El escenario puede ser cualquier espacio donde se tengan objetos que emitan, transmitan o reflejen radiación que este dentro de la ventana visible del espectro electromagnético, es decir cualquier objeto o escenario que pueda ver el ojo humano.

El sistema óptico detecta la radiación proveniente del escenario, y a través de diferentes lentes, concentra toda la radiación dentro del sensor. El punto donde se concentra la radiación, se conoce como punto focal del sistema óptico. Un sistema óptico con una distancia focal de 50 mm, cubre el plano del sensor con un campo de visión (FOV) aproximadamente igual a un campo de visión humano. Un telefoto lo que hace es

incrementar la distancia focal para que el campo de visión que recibe el plano del sensor, sea solamente una parte del campo de visión con mayor detalle.

El sistema óptico también cuenta con un diafragma, que regula la cantidad de radiación incidiendo sobre el sensor y un obturador, que regula el tiempo durante el cual incide la radiación.

Actualmente existen dos tecnologías que convierten la radiación visible en información digital, es decir, imágenes digitales. Una de ellas es CCD (*charge-coupled device*) y la otra es CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*). Estos dos procesos tienen exactamente la misma función de convertir intensidad de luz visible en electrones. A continuación se da una descripción del proceso de cada uno.

Un CCD y un CMOS son circuitos integrados por pequeños diodos sensibles a la luz visible, llamados fotodiodos. Dentro de un sensor de este tipo, puede llegar a haber de 300,000 a 10,000,000 de fotodiodos, dependiendo la resolución que se tenga, acomodados en un arreglo. Este tipo de detectores funcionan bajo el principio del efecto fotoeléctrico. Cuando un haz de luz (fotones) impacta sobre cada fotodiodo, se crea una corriente eléctrica o voltaje en la junta P-N del semiconductor. Si la energía de los fotones es mayor a la energía de banda del semiconductor, los electrones son forzados a moverse a la banda de conducción, creando espacios vacíos en el lugar donde se encontraban, proporcionales a la cantidad de luz incidente. Esto provoca que se generen cargas positivas en la región P y cargas negativas en la región N, debido al exceso de electrones. Entre la región P-N, se conecta un circuito externo que provoca el flujo de electrones desde la región N y espacios vacíos desde la región P hacia los electrodos del circuito. Esta corriente es la que se lee en cada fotodiodo y con la cual se determina la cantidad de luz incidiendo en el arreglo. Mientras mayor sea la cantidad de sensores que se tienen en el arreglo, mayor será la cantidad de circuitos para alimentarlos y la energía suministrada aumentará así como la complejidad y costo del sensor.

2.2.2 Dispositivo de carga acoplada CCD

El nombre de este dispositivo *Coupled-charge device* (dispositivo de carga acoplada) se le fue dado a partir del proceso que realiza al obtener la información de los fotodiodos después de una exposición. Las cargas de la primera fila (fila de arriba abajo en el arreglo) son transferidas a un receptor que lee la información de cada celda de izquierda a derecha. De aquí las señales son alimentadas a un amplificador para luego ser enviadas a un convertidor de señales análogo-digital. La lectura se da únicamente en la fila inferior del arreglo, así una vez que termina con la primera fila, la información en el receptor es borrada y las cargas de las filas superiores se mueven una fila abajo para que comience una vez más la lectura hasta que la fila superior sea leída. Cada carga está acoplada con la carga superior. Esto se realiza a velocidades de fracciones de segundo y cuantos más fotodiodos se tengan en el chip, mayor el tiempo de lectura.

Para un cámara fotográfica este proceso se realiza una sola vez ya que las imágenes son fijas, sin embargo en la cámaras de video, para poder recrear la sensación de movimiento, es necesario tomar imágenes sucesivas e ir las corriendo en la computadora para obtener el

video. Es por esta razón que las cámaras de video tienen una cantidad menor de fotodiodos en el chip que las cámaras fotográficas, donde se llegan a tener hasta 10 megapíxeles.

2.2.3 Semiconductor oxido-metal acoplado CMOS

En un CMOS se tiene una red de transistores conectados a cada uno de los diodos del sensor. La función de estos transistores es la de enviar las cargas de cada píxel, utilizando cables convencionales hacia una amplificador después de una exposición, para luego ser convertidas en señales digitales a través de un convertidor de señales análogo-digital. Gracias a esta forma de captura, cada píxel puede ser leído de forma individual, dándole más flexibilidad al sensor.

La diferencia entre estos dos sensores es el proceso de manufactura que tiene cada uno. Por un lado, el CCD se fabrica con procesos muy especializados y costosos dedicados únicamente a la elaboración de este tipo de lectores. Gracias a estos procesos, es posible que las cargas sean transportadas a lo largo del chip sin causar variaciones en la información, dando como resultado dispositivos de muy alta calidad.

Por el otro lado, los sensores CMOS se elaboran con los mismos procesos con los que se fabrican los microprocesadores utilizados en las computadoras, por lo que la producción de estos es más elevada que la de dispositivos CCD, reduciendo los costos considerablemente. Debido a lo anterior, la mayoría de los fabricantes de cámaras de fotografía y video han apostado por implementar dispositivos CMOS en sus productos, ya que con estos sensores también se reduce el consumo de energía, pues gracias a su configuración, es posible implementar más funciones de la cámara en el mismo chip, como son los relojes, la lógica de tiempo de la cámara y el procesamiento de señales. Más información relacionada con este tipo de funciones se puede encontrar en la referencia [2] de este capítulo.

Sin embargo un CCD es menos susceptible al ruido y tiene mayor sensibilidad a la luz, ya que el CMOS al estar rodeado de una gran cantidad de transistores, parte de los fotones incidiendo en el sensor se pierden al chocar con los transistores perdiendo calidad de imagen.

2.2.4 Sensibilidad del sensor

Como se mencionó anteriormente en la parte de funcionamiento de un fotodiodo, es necesario que los fotones tengan una determinada cantidad de energía mayor a la energía de banda del semiconductor para que se tenga una respuesta, a esto se le conoce como la sensibilidad del sensor. Los materiales utilizados en la fabricación de los semiconductores tienen diferentes bandas de energía, por lo que la sensibilidad cambia de un fotodiodo a otro, además de que la sensibilidad es dependiente de la temperatura a la que se encuentre el sensor.

2.2.5 Imágenes a color

Por otro lado, si se mide únicamente la intensidad de luz, se obtendría una imagen en blanco y negro, por lo que es necesario también medir los niveles de color para generar la imagen. Si se sabe el nivel exacto de los tres colores primarios (rojo, verde y azul), es

posible generar la gama completa de colores y obtener una imagen a color. Para medir los niveles existen dos formas, una es tener un separador de colores, que envíe el nivel de cada uno de los tres colores hacia tres chips diferentes, es decir cada chip recibe la imagen completa correspondiente a un color. Posteriormente el procesador junta las tres imágenes para generar una fotografía a color. Con este sencillo proceso se obtienen imágenes de gran color y resolución, pero al utilizar tres chips los costos de la cámara se incrementan considerablemente además de que se consume más energía.

La alternativa es tener un sólo chip con un arreglo de filtros en cada fotodiodo, así un porcentaje de diodos medirá la intensidad de color verde, otro porcentaje el color azul y el restante el color rojo. El arreglo de filtros se diseña de tal manera que la computadora pueda saber la distribución de colores en cada sección del sensor. Una vez que se toma la imagen, la computadora recibe la información de cada fotodiodo y la compara con la información de los diodos en la vecindad para después hacer una serie de interpolaciones y determinar la intensidad de los tres colores en cada fotodiodo.

2.2.6 Ruido

Idealmente cada fotón que choca con un píxel del sensor se convierte en un electrón de salida. Si así fuera, cada electrón sería convertido y contado indicando exactamente la cantidad de luz que está incidiendo sobre el sensor. Sin embargo esto no es posible debido a distintos factores presentes en el proceso, los cuales introducen ruido en las señales. El ruido son variaciones en los valores leídos en cada fotodiodo que impiden que la lectura sea exactamente igual a la cantidad de luz que hay en la escena original y que está siendo proyectada sobre el sensor.

La forma en que se mide el ruido, es a través de un cociente que relaciona la cantidad de electrones que puede soportar cada píxel, dividido entre el promedio, o con mayor precisión, dividido entre la desviación estándar de ruido que hay en los píxeles, dando como resultado una relación de señal a ruido (*signal to noise ratio*) o rango dinámico. El propósito de los fabricantes de sensores ópticos, es el de lograr valores más altos de rangos dinámicos con el fin de obtener imágenes de más alta calidad o imágenes más parecidas al escenario original. Esto se logra aplicando técnicas al sensor que reducen el ruido dentro de cada píxel, pero por otro lado las fuentes de ruido son muy variadas, por lo que los procesos para reducirlo serán diferentes para cada tipo de variación que se tenga, pues se tienen ruidos que afectan más que otros el rango dinámico del chip.

Cada fabricante mide y reporta la cantidad de ruido de su producto generalmente en unidades RMS (*Root Mean Square*), que es el número de electrones de ruido que se está midiendo.

A continuación se presenta una lista de las distintas fuentes de ruido que se pueden presentar en el proceso de obtención de una imagen digital.

a. Corriente oscura (*Dark current*):

Este tipo de corriente es una fuente de ruido en el sensor, aun si este no se encuentra expuesto a la luz, y se debe a la generación térmica de electrones dentro de cada píxel, por

lo que ésta depende de la temperatura de sensor. Este tipo de ruido puede reducirse al eliminar la mayor cantidad de cargas que se hayan generado en un determinado tiempo antes de una exposición. Es por esta razón que los fabricantes indican un rango de temperaturas en el que se puede usar la cámara, pues si la temperatura ambiente del lugar donde se quiere fotografiar o filmar es alta, la corriente oscura tenderá a ser más grande, dando como resultado que la resolución de la imagen disminuya por el ruido generado. Para aplicaciones donde se requiere una gran resolución, es posible eliminar esta fuente de ruido, al implementar sistemas de refrigeración que mantengan el sensor a temperaturas bajas para no generar este tipo de corriente, al igual que en las cámaras infrarrojas, pero del mismo modo, esto tiene a aumentar el peso y costo del aparato.

b. Ruido debido a diferencias entre los píxeles:

Esta fuente de ruido se da más en los sensores de tipo CMOS que en los CCD, principalmente por los métodos de fabricación de cada uno, mencionados anteriormente. Aún cuando existen estándares para los tamaños y sensibilidades de cada píxel, se tienen rangos de desviación estándar aproximadamente de entre 1% y 2% para los CCD y de entre 5% y 10% para los CMOS, por lo que los píxeles tendrán una pequeña diferencia en su sensibilidad.

Este se produce debido a que la cantidad de fotones golpeando un píxel se da de forma aleatoria, es decir, no se puede predecir con un 100% de exactitud la cantidad de fotones que está detectando un fotodiodo para una misma intensidad de luz, va a haber variaciones de un píxel a otro. La probabilidad de la cantidad de partículas de luz llegando al diodo en un periodo de tiempo, está determinada por una distribución de Poisson. El ruido de corte afecta más cuando se tiene una cantidad menor de fotones (imágenes oscuras). Puede reducirse capturando más fotones, realizando un tiempo de exposición más prolongado o combinando una serie de cuadros de la misma imagen.

c. Ruido en la conversión de analógico a digital

Cuando el valor de un fotodiodo es leído después de haber sido expuesto a la luz, la parte electrónica de la cámara transforma el voltaje de analógico a digital a través de un convertidor. Existen muchas formas durante este proceso por el cual se introduce ruido adicional en la imagen, como ruido aleatorio y ruido periódico. Cada fabricante diseña o emplea los mejores dispositivos electrónicos con el fin de reducir el incremento de ruido durante este proceso y mejorar la calidad de imagen. Dos cámaras usando el mismo CCD pueden producir imágenes finales con diferentes características de ruido y rango dinámico debido a las diferencias en el convertidor utilizado.

Antes de que la señal sea enviada al convertidor, ésta debe ser amplificada. Todos los amplificadores introducen ruido en mayor o menor cantidad, dependiendo del diseño y de la calidad del amplificador.

En una cámara bien diseñada, la parte electrónica aporta solamente una pequeña cantidad de ruido una vez que la imagen es leída del sensor.

El ruido en señales digitales y sistemas ópticos es un tema bastante estudiado hoy en día y de un nivel técnico elevado. Por lo anterior, es posible encontrar una gran cantidad de bibliografía relacionada con el tema que se puede consultar para mayor detalle de los tipos de ruidos y los procesos de reducción.

Como se puede dar uno cuenta, la reducción de las diferentes fuentes de ruido en un sistema óptico e infrarrojo digital, es un campo en donde los grandes fabricantes han invertido mucho tiempo y dinero, pues se han dado cuenta que al reducir el ruido a mínimos niveles, se puede llegar a obtener un gran aumento en la calidad de imágenes.

Una vez que la señal es procesada (amplificada y convertida en información digital) puede almacenarse para su análisis posterior o puede ser reproducida en tiempo real. Para esto, es necesario contar con sistemas que representen gráficamente la información digital (0 y 1) con la que se cuenta. Estos dispositivos pueden ser televisores, pantallas de computadora, o cualquier aparato existente hoy en día que reproduzca imágenes digitales. Es aquí donde entra el tema de alta definición.

2.2.7 La alta definición (HD)

La alta definición es la cantidad de información que puede percibir un sensor o que puede reproducir un televisor, y esto va directamente relacionado con la capacidad de procesamiento.

Para poder entender esto, es necesario tener alguna idea de cómo es que se reproducen las imágenes en un televisor.

La pantalla de una televisión, ya sea de tubo de rayos catódicos, LCD o plasma, está compuesta por una cantidad determinada de píxeles, al igual que un sensor CCD o CMOS. Al reproducir un video, la parte electrónica del televisor envía información a cada píxel para que este se encienda con determinada luminosidad y color.

Se puede tomar el ejemplo del televisor convencional, es decir el tubo de rayos catódicos. Para que en la pantalla del televisor se genere una sola imagen fija, el rayo dispara electrones hacia el píxel que se encuentra en la esquina superior izquierda, si se ve la pantalla de frente. Esto provoca que el píxel se encienda. Posteriormente proyecta un rayo sobre el píxel de la derecha, hasta completar la hilera superior, y pasar a la hilera inferior, realizando el mismo proceso hasta cubrir la pantalla completa. Como resultado se obtiene una imagen conformada por todos los píxeles emitiendo distintos colores e intensidades, dependiendo la imagen proyectada.

Al obtener la imagen completa, el rayo regresa al primer píxel, y vuelve a enviar un rayo de electrones de diferentes características, dependiendo de la nueva imagen. El proceso se repite y se obtiene una imagen completamente nueva. A este tipo de proyección se le conoce como formato progresivo. Una televisión realiza esto a diferentes tasas (*frame rate per second*). Así es posible obtener el video, que en realidad es la sucesión de imágenes fijas de forma muy rápida para crear la sensación de movimiento.

En el formato entrelazado, la proyección se da de forma progresiva, pero solamente en la

mitad de los píxeles. Es decir, que el primer píxel se ilumina, pero el segundo no, y así sucesivamente hasta llenar la pantalla, dejando la mitad sin encender. Este proceso se repite nuevamente, pero ahora comenzando desde la segunda fila, para encender los píxeles restantes.

Este método es utilizado para disminuir el ancho de banda necesario en la transmisión de información para realizar una proyección progresiva, pues con el entrelazado, se manda la mitad de los datos para cada cuadro. Sin embargo esto disminuye definición en el video pues si se tiene una tasa de 60 cuadros por segundo en un formato progresivo, en el entrelazado se tendrán 30.

Para poder generar video de alta definición en un televisor, es necesario contar con sensores ópticos con la misma cantidad de píxeles con los que cuenta la pantalla. Es por esta razón, que algunos canales y películas se ven mal en las televisiones de alta definición, por que las cámaras con las que se grabó, no contaban con sensores con los suficientes fotodiodos que transmitieran información a la pantalla de forma uno a uno.

La siguiente figura muestra los formatos de alta definición que existen hoy en día. En México existen pocos canales de alta definición, y casi todos son de paga. Al requerir grandes cantidades de información, la transmisión de datos eleva mucho los costos.

Format	Aspect Ratio	Vertical Resolution (Lines/Frame)	Horizontal Resolution (Pixels/Line)	Total Pixel Count (Lines x Pixels)	Audio
 SDTV STANDARD DEFINITION TELEVISION	4:3	480i	704	337,920	Dolby Digital 5.1
 EDTV ENHANCED DEFINITION TELEVISION	4:3 or 16:9	480p	704	337,920	Dolby Digital 5.1
 HDTV HIGH DEFINITION TELEVISION	16:9	720p	1280	921,600	Dolby Digital 5.1
 HDTV HIGH DEFINITION TELEVISION	16:9	1080i	1920	2,073,600	Dolby Digital 5.1
NTSC (Analog)	4:3	480i	450	216,000	2-Channel Stereo

Figura 2.5 Formatos de alta definición

Fuente: <http://www.home-theaters-made-simple.com/images/dtv-format-table.jpg>

2.3 Sistemas de visión visible e infrarrojo aéreos en el mercado

En el proceso de diseño de un sistema, es muy frecuente que se realice una investigación a cerca de productos que se encuentren en el mercado de características similares a las que tiene el diseño en desarrollo (Benchmarking). Esto con la finalidad de tener una idea de cuáles son las funciones de los sistemas ya existentes, su costo, su calidad y en lo posible mejorarlas en el nuevo diseño o implementar más funciones que le den un valor agregado más alto.

Hoy en día existen pocas empresas dedicadas a la fabricación de sistemas de visión visible e infrarroja aéreos, y el principal propósito de las empresas, es crear sistemas enfocados en dar apoyo a tareas militares, de espionaje y seguridad. Solamente una de las compañías analizadas durante la investigación, menciona como campo de aplicación la investigación científica, aún cuando las características de los otros dispositivos tienen similitud con el producto desarrollado en este trabajo.

Es por la razón anterior y por ser parte de un grupo de investigación, que se decidió realizar un sistema dentro del Instituto de Ingeniería para lograr la toma de imágenes infrarrojas y visibles desde el aire, ya que se pudo haber comprado. Además, los sistemas que se presentan a continuación fueron diseñados para ser instalados en vehículos aéreos pesados, como son helicópteros principalmente y aviones de baja velocidad.

Una vez presentados los productos, se hace una comparación con el diseño que se propone (capítulo 3), para dar un sustento teórico de por qué se tomó la decisión de realizar la fabricación del sistema por cuenta propia.

Las dos empresas más grandes en fabricación de sistemas de visión visible e infrarrojo aéreos son de origen estadounidense, y se dedican a la fabricación de cámaras infrarrojas. También se muestra un sistema creado por una empresa armamentista, que a diferencia de las dos anteriores, no está dedicado únicamente al campo infrarrojo, por lo que no tiene tanta descripción del producto como las dos primeras empresas.

A continuación se presentan los dispositivos que se encontraron en el mercado, empezando con la compañía que más modelos ofrece. Se da una breve descripción de la empresa y las características de cada producto, para poder ser comparados con el diseño de este trabajo.

2.3.1 FLIR Systems, INC.

Es la empresa más grande en la fabricación de sistemas infrarrojos para uso industrial, comercial y gubernamental. FLIR ofrece más soluciones que cualquier otra empresa dentro del mercado de la imagen térmica y en una gran gama de campos incluyendo la investigación científica.

Es una empresa americana fundada en 1978 con base en Wilsonville, Oregon. Empezó creando sistemas aéreos, por lo que se podría decir que es la empresa con más años de experiencia en este campo. Además FLIR ofrece la mayor cantidad de modelos.

Los modelos de FLIR Systems, Inc. se dividen en sistemas compactos o de corto alcance y sistemas de largo alcance. A continuación se muestran imágenes y especificaciones de estos dos tipos de sistemas.

Sistemas compactos

TALON



Figura 2.7 TALON

Tabla 2.1 Especificaciones TALON

Peso	5.9 kg
Dimensiones	22.9 * 34.3 cm (Diámetro * Altura)
Cámara infrarroja	Detector tipo: Antimonio de indio en un arreglo focal plano. Ventana espectral: 3.4 * 5.1 μm Resolución: 640 * 480
Cámara de video	Detector tipo: CCD Formato: NTSC/PAL
Consumo de energía	18-32 V DC
Otros	Este sistema también cuenta con distanciómetro láser con un rango de 20 km y opcionalmente un apuntador láser.

ULTRA 7500-B



Figura 2.8 ULTRA 7500-B

Tabla 2.2 Especificaciones ULTRA 7500-B

Peso	13 kg
Dimensiones	229 * 343 mm (Diámetro * Altura)
Cámara infrarroja	Detector tipo: LnSb Ventana espectral: 3-5 μm Resolución: 320* 240
Cámara de video	Detector tipo: CCD poca luz
Consumo de energía	19-32 V DC
Otros	Opcionalmente cuenta con un apuntador

Sistemas de largo alcance

Star SAFIRE



Figura 2.9 Star SAFIRE

Tabla 2.3 Especificaciones Star SAFIRE

Peso	45 Kg
Dimensiones	380 * 450 mm (Diámetro * Altura)
Cámara infrarroja	Detector tipo: LnSb arreglo focal plano Ventana espectral: 3-5 μm Resolución: 1280 * 720
Cámara de video	Detector tipo: CCD Resolución: 1280 * 720
Consumo de energía	22-29 V DC
Otros	Cámara de video de poca luz: Detector tipo CCD, Resolución 1280*720. Distanciómetro de 25 km y apuntador láser además de un iluminador clase 4 para vuelos nocturnos.

Star SAFIRE II



Figura 2. 10 Star SAFIRE II

Tabla 2.4 Especificaciones Star SAFIRE II

Peso	43 Kg
Dimensiones	380 * 450 mm (Diámetro * Altura)
Cámara infrarroja	Detector tipo: LnSb arreglo focal plano Ventana espectral: 3-5 μ m Resolución: 640 * 480
Cámara de video	Detector tipo: CCD Resolución: 525/625 líneas
Consumo de energía	22-29 V DC
Otros	Distanciómetro de 25 km y apuntador láser además de un iluminador clase 4 para vuelos nocturnos. Opcionalmente puede llevar una mira telescópica de detector tipo: CCD

Star SAFIRE III



Figura 2.11 Star SAFIRE III

Tabla 2.5 Especificaciones Star SAFIRE III

Peso	44 Kg
Dimensiones	380 * 450 mm (Diámetro * Altura)
Cámara infrarroja	Detector tipo: LnSb arreglo focal plano Ventana espectral: 3-5 μ m Resolución: 640 * 480
Cámara de video	Detector tipo: CCD Resolución: 525/625 líneas
Consumo de energía	22-29 V DC
Otros	Distanciómetro de 25 km y apuntador láser además de un iluminador clase 4 para vuelos nocturnos. Opcionalmente puede llevar una mira telescópica de detector tipo: CCD 3-chip a color y una cámara de video de poca luz con un detector tipo: Intensificador de imagen.

El sistema desarrollado en esta investigación se puede comparar con el grupo de sistemas compactos, pues los dispositivos de largo alcance que maneja FLIR, están diseñados totalmente para aeronaves pesadas. El peso de estos aparatos supera considerablemente el peso que se tiene como especificación de diseño, el cual será definido en el capítulo siguiente junto con las demás especificaciones.

2.3.2 INFRARED, INC.

Al igual que FLIR, esta empresa de origen estadounidense se especializa en cámaras y sistemas térmicos. Fue fundada en 1979 y tiene como sede la ciudad de Reno en el estado de Nevada, EU.

Infrared, Inc. tiene presencia a nivel mundial ofreciendo soluciones en diferentes campos como el militar, industrial y comercial. Es una de las pocas empresas dentro del mercado de la imagen térmica que produce sistemas aéreos equipados con una cámara infrarroja y una de video. Sin embargo, manejan un solo modelo y está diseñado totalmente para que sea instalado en helicópteros.

En la página de internet donde se da información sobre el producto (se solicitó más información vía correo electrónico pero no se tuvo respuesta), se mencionan las siguientes tareas donde puede ser aplicado el sistema:

- Policiacas
- Militares
- Búsqueda y rescate
- Vigilancia
- Monitoreo de fuego forestal
- Monitoreo de líneas de electricidad
- Operaciones en mar abierto

Al inicio de esta investigación, esta empresa contaba con otro modelo de este tipo de sistemas; sin embargo, fue discontinuado en fechas previas a la terminación del presente

documento por lo que no se incluye en la presentación. No tendría caso comparar un modelo que no es posible conseguir hoy en día.

CAM/IR 2208 Aerial series



Figura 2.12 CAM/IR 2208

Tabla 2.6 Especificaciones CAM/IR 2208 Aerial series

Peso	6.8 Kg
Dimensiones	178 * 266.7 mm (Diámetro * Altura)
Cámara infrarroja	Detector tipo: Óxido de Vanadio con arreglo focal plano Resolución: 640*480 pixeles Ventana espectral: 8-12 μ m
Cámara de video	Detector tipo: CCD Resolución: 752 * 582
Consumo de energía	24-28 V DC
Otros	Contiene un apuntador láser y opcionalmente puede llevar un localizador de objetos láser, además de una palanca de control manual y una pantalla LCD para visualización en tiempo real.

2.3.3 Raytheon

Por último se presenta un sistema elaborado por una empresa dedicada a la fabricación de tecnologías de defensa, por lo que este modelo sí está diseñado completamente para dar apoyo a tareas militares y de seguridad. La empresa fue fundada en el año de 1992 y sus oficinas centrales se ubican en el poblado de Waltham, Massachussets, E.U.

Raytheon ofrece un sólo modelo y al no ser una empresa dedicada exclusivamente a los sistemas de imagen térmica, como las dos anteriores, no se tiene ninguna información sobre los tipos de cámaras que contiene. Esto probablemente se debe a que la información es confidencial por el tipo de mercado en el que se desempeñan, que es el militar, donde la información es muy restringida.

Por esta razón únicamente se presenta la imagen del modelo y no se realiza ningún tipo de comparación con el sistema propuesto, ya que no se cuenta con la información necesaria para poder llevarla a cabo. Se presenta con la intención de hacer notar que probablemente existan más sistemas de estas características en el mercado militar, pero que no se puede obtener información acerca de sus componentes y funcionamiento o ni siquiera saber de su existencia, si no somos personas dentro de la industria militar.

AVES (Air Vision Enhanced System)



Figura 2.12 AVES

Tabla 2.7 Especificaciones AVES (Air Vision Enhanced System)

Peso	58.9 Kg
Dimensiones	457.2 mm Diámetro
Consumo de energía	28 V DC

Con sólo ver el peso de este sistema, quedaría descartado para ser montado en el dirigible.

En el siguiente capítulo se presentarán las especificaciones de diseño y una vez conociéndolas y sabiendo los principales modelos que existen en el mercado, se tendrá la base para demostrar que era necesario realizar un sistema diseñado especialmente para el dirigible de investigación que se encuentra en desarrollo actualmente.

Capítulo 3. Especificaciones de diseño, componentes y materiales.

En el capítulo anterior se reseñó el proceso que utilizan las cámaras para convertir radiación, ya sea visible o infrarroja, en imágenes digitales. Una vez que se sabe cuáles son los principales factores que intervienen en el proceso, es posible hacer una selección de las diversas opciones de cámaras que existen en el mercado, y con esto definir el peso que tendrán y el espacio que ocuparán en el sistema. Como se señalará en las siguientes páginas, estas dos propiedades son especificaciones fundamentales con las que deberá contar el sistema y que deben ser respetadas.

Este capítulo comienza presentando dichas especificaciones de diseño, que fueron determinadas por el grupo encargado de la construcción del dirigible de investigación, y las cuales son la base del sistema. Esto fue posible con la ayuda de una técnica muy usada en diseño la cual se describe con mayor detalle en este capítulo.

El sistema a diseñar debía cumplir con todas las restricciones planteadas y, en lo posible, contar con las características deseadas. Por esta razón, la búsqueda de los componentes y materiales que integran el dispositivo fue parte fundamental de esta investigación, ya que un componente podía cumplir con una especificación, pero a la vez no tenía las características necesarias para caer dentro del margen de las demás especificaciones requeridas.

Una vez dados a conocer estos valores de diseño, fue posible hacer una comparación (benchmarking) con los sistemas de visión visible e infrarrojo para vehículos aéreos que ya existen y que se presentaron en el capítulo anterior.

Gracias a esta comparación, se contó con una base sólida para la integración de las partes y el diseño del sistema idóneo para el dirigible. Además, proporcionó una clara idea de la arquitectura que debería tener el sistema, basada en los productos desarrollados por las compañías.

Por último, con las restricciones con las que se contaba, fue posible seleccionar los materiales y demás componentes (cámara de video y cámara infrarroja), haciendo uso de herramientas de diseño. Al presentar los módulos de las cámaras de video e infrarrojo, se hace énfasis en los tipos de detectores con los que cuenta cada uno, ya que es el componente que más influye en las especificaciones que se obtuvieron.

El siguiente diagrama de flujo muestra el camino que se tomó para realizar los pasos que se mencionaron con anterioridad.

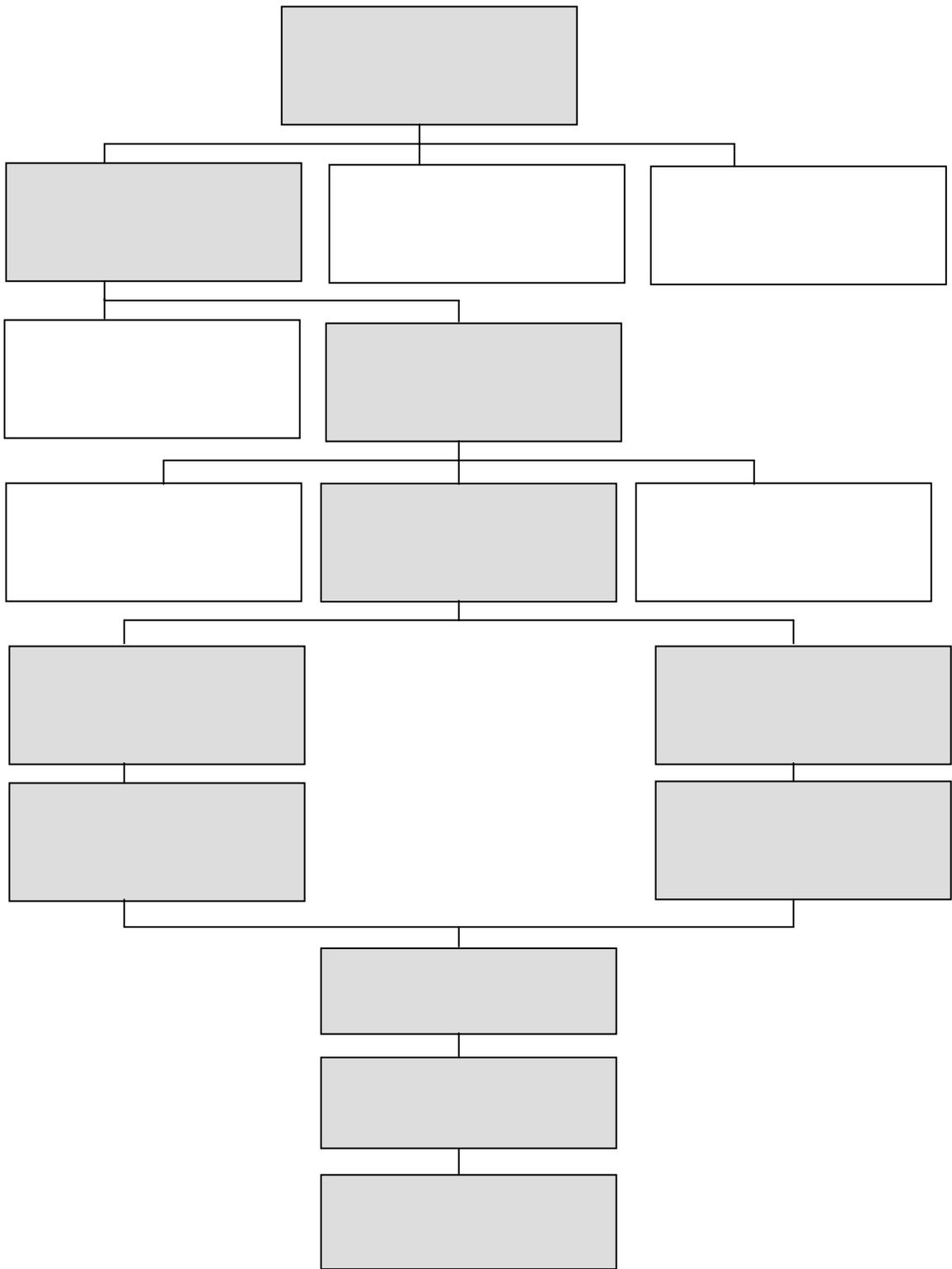


Figura 3.1 Diagrama de flujo para el diseño del SVVIVAA

3.1 Especificaciones de diseño.

El diseño y construcción del dirigible de investigación es un proyecto ambicioso el cual tiene como fin obtener un dirigible autónomo, con buena estabilidad en vuelo para lograr la captura de imágenes aéreas de calidad y una gran autonomía de vuelo.

Definidas las principales funciones que va a realizar el vehículo, es necesario determinar las variables de las cuáles dependerán dichas funciones. Estas variables servirán como especificaciones para el diseño del **“Sistema de Visión Visible e Infrarroja para Vehículo Aéreo Autónomo”** (SVVIVAA) que es el objetivo de este trabajo.

El SVVIVAA tendrá la función principal de realizar la captura de imágenes a lo largo del vuelo. Las diversas funciones que realizaría el sistema tuvieron un etapa donde se tuvo mucha flexibilidad; es decir, que no estaban muy bien definidas, pues no se tenía el avance necesario para saber que tanto afectaría el sistema a las principales funciones del dirigible.

Conforme el proyecto fue tomando forma, las funciones con los que debía contar el SVVIVAA también fueron tomando forma, hasta quedar definidas en su totalidad y con base en esto determinar las características y especificaciones de diseño.

Las especificaciones son la parte medular de cualquier diseño que se encuentre en desarrollo, y que se definen conociendo con que características debe contar el producto para que el cliente quede satisfecho con él.

Para el caso de esta investigación, el cliente es el grupo de trabajo del Instituto de Ingeniería que está a cargo de la fabricación del dirigible. Ellos son los que deciden como será el SVVIVAA y con cuáles características y funciones debe contar.

Una metodología muy usada en el desarrollo de productos es el QFD (*Quality Function Deployment*) por sus siglas en inglés, o casa de calidad, en donde se definen los deseos del cliente a través de su propia voz y se traducen dichos deseos en requerimientos de ingeniería o especificaciones de diseño. Otro factor importante que se obtiene del QFD, es la importancia que tiene cada especificación en el diseño.

El QFD fue desarrollado por primera vez por Yoji Akao en 1970. Este método se aplicó dentro de la compañía Mitsubishi para administrar las logísticas de diseño de grandes barcos. Hoy en día es usado por una gran cantidad de industrias, incluyendo la aeronáutica y aeroespacial.

Para establecer un vínculo con el cliente, el QFD es usado para definir las especificaciones de diseño que pueden ser usados como valores cuantificables para cada una de las necesidades del cliente.

El proceso para documentar información en la casa de la calidad es el siguiente:

1. Identificar al cliente (externos o internos)

2. Determinar las necesidades del cliente. Los requerimientos del cliente es el “qué se va a desarrollar”.
3. Determinar la importancia o prioridad de las necesidades (escala del 1-5 o del 1-9)
4. Traducir las necesidades en requerimientos de ingeniería medibles.
5. Determinar la relación que tienen los requerimientos con las necesidades del cliente.

Valor	Significado
H	Indica una relación fuerte o mucha importancia
M	Indica alguna relación o cierta importancia
L	Indica una pequeña relación o importancia
0	Indica que no existe relación alguna

6. Teniendo los pasos anteriores completos, se multiplica el valor de la importancia de la necesidad con el valor de la relación. El resultado de esta operación se suma con los demás valores de las especificaciones para determinar cuáles tendrán prioridad en el diseño.

Generalmente se hace uso de una tabla de Pareto para mostrar gráficamente los resultados.

El equipo a cargo del dirigible determinó las necesidades que tenía respecto al sistema de toma de imágenes aéreas con las que debía contar el dirigible. Se desarrollo un QDF para obtener las especificaciones de diseño y la importancia que tiene cada una en el diseño.

A continuación se presenta un QFD del sistema de toma de imágenes aéreas, así como una tabla de Pareto de los resultados obtenidos. Teniendo las especificaciones definidas, se le asignaron unidades y valores a cada una de ellas.

Especificaciones															
Necesidades del cliente	Importance	Velocidad de rotación	Velocidad de respuesta	Movimiento programado	Peso	Dimensión	Geometría	Costo total de fabricación	Mantenimiento	Vida del producto	Facilidad de fabricación	Consumo de energía	Tiempo de funcionamiento	Resistente	Total
		Desempeño	9	H	H	H						L		L	M
Propiedades físicas	9				H	H	L	M				H		H	360
Costo	1				M	M		H	M	M	H	H	M		42
Manufactura	3	M			L	L	H				H				69
Total		90	81	81	87	87	36	36	3	12	36	99	30	81	

Figura 3.2 QFD realizado al cliente para el diseño del SVVIVAA

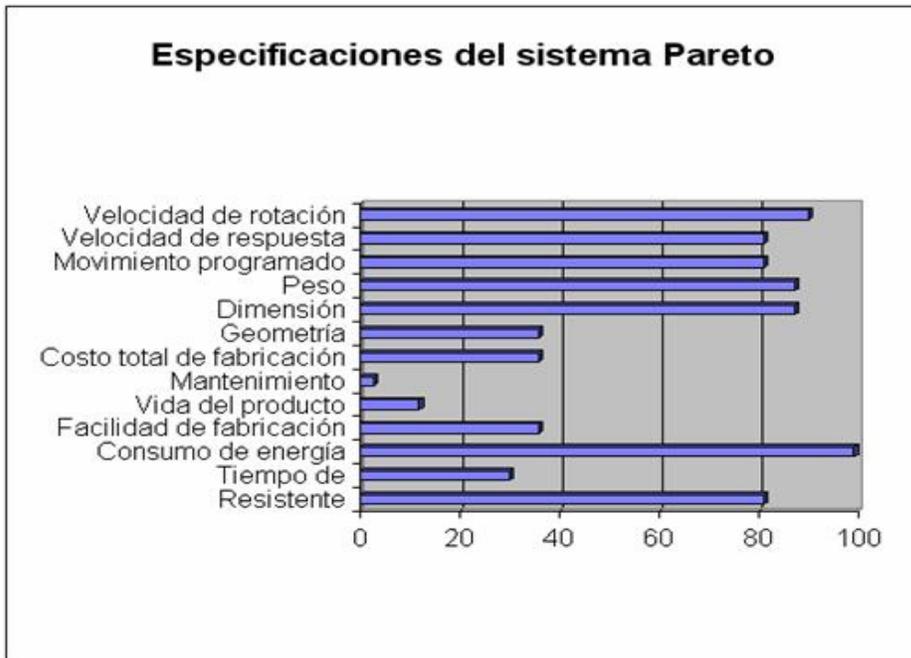


Figura 3.3 Gráfica de Pareto con los resultados del QFD

Las especificaciones son presentadas por orden de importancia, es decir que el primer parámetro es el que más influencia tuvo en el diseño y el que se debía cumplir antes de que se cumplieran las demás condiciones que se tienen, y así sucesivamente hasta presentar todos los parámetros. A continuación se presentan las especificaciones de acuerdo a su relevancia en el diseño del SVVIVAA.

3.1.1 El peso

El principal parámetro que se tiene es el peso del sistema. Entre más ligero resulte el SVVIVAA será mejor, pues el peso que se está ganando al hacer el dispositivo más ligero, puede ser usado en otros sistemas del dirigible adicionales que hagan que el vuelo mejore. Cuando se tuvieron las dimensiones finales del vehículo, fue posible saber el volumen de helio dentro del globo, y con esto la carga máxima que iba a soportar para poder ganar altura.

Pero por otro lado, la distribución de pesos es fundamental para la estabilidad en vuelo del dirigible, por lo que tampoco se podía diseñar un dispositivo de captura de imágenes que tuviera un peso muy por debajo del peso establecido para el sistema, ya que el equipo que está a cargo de la estabilidad prefirió que el peso se adecuara la más posible a la especificación que se tiene.

Debido a que el peso es el principal factor que influye en el diseño, éste fue la primera condición de selección de los componentes que integran el sistema, y una vez que cumplían con el peso necesario se buscaba que cumplieran con los demás parámetros en orden de importancia.

3.1.2 Dimensiones

Además del peso, otro parámetro que es fundamental en el diseño, son las dimensiones con las que debe contar el dispositivo. En el capítulo siguiente, donde se muestre la sección del dirigible donde irá montado el sistema, se podrá observar el espacio designado para el dispositivo.

Las dimensiones van relacionadas directamente con el peso, pues si se tienen componentes muy grandes, el peso del sistema igualmente aumentará. El equipo del Instituto contaba con una cámara infrarroja, y en un principio se pensó usar esa cámara para el sistema con el objetivo de reducir costos. Sin embargo, al quedar definido el peso y las dimensiones del sistema, esta cámara quedó descartada completamente, pues excedía por mucho el peso del sistema, y al ser una cámara con el sistema de almacenamiento de información incluido, sobrepasaba el diámetro del espacio designado en la góndola del dirigible.

Fue por esta razón que se decidió buscar información del funcionamiento de las cámaras de video, ya que con este conocimiento fue posible comprender como se integran sus principales componentes, y así lograr disminuir el espacio, al distribuirlos de mejor forma dentro y fuera del sistema.

Las dimensiones establecidas, se presentan de igual forma que como se presentaron en el capítulo anterior; es decir, que los parámetros dimensionales que se tienen son el diámetro en la zona de sujeción con la góndola y la altura total.

3.1.3 Consumo de energía

Se podría decir que este parámetro es una sub-función del peso. Como se mencionó con anterioridad, mientras más potencia requieran los sensores ópticos e infrarrojos, el peso y tamaño de estos también aumentarán, haciendo que el peso y dimensiones crezcan por igual.

Además, la principal razón por la que se decidió poner un límite al consumo de energía, y considerarlo especificación de diseño, fue porque al consumir más potencia para funcionar, el banco de baterías designado para suministrar la energía, tendrá que ser mayor. Esto ocuparía más volumen dentro del espacio designado para la baterías, el peso de cada una de ellas aumentaría drásticamente por cada volt extra, por lo que la estabilidad del dirigible y la calidad de las imágenes se verían afectadas, así como la autonomía de vuelo, ya que se tendría que volar con menos combustible para contrarrestar el aumento en peso de baterías.

Lo anterior da un claro ejemplo de cómo todo está relacionado dentro de un sistema como lo es el dirigible y un subsistema como lo sería el SVVIVAA, ya que para lograr llegar a tener un sistema que realice las funciones que se desean con precisión y exactitud, es necesario tener un gran conocimiento de cada una de las variables que intervienen en él, y como se relacionan unas con otras.

La especificación de consumo de energía tiene como unidad el Volt, y el valor que se dio como restricción, fue la cantidad máxima de Volts consumido por alguno de los

componentes que integran el sistema y que necesitan energía eléctrica para realizar sus funciones.

3.1.4 Rango de visión

Este rango depende de la buena elección que se tenga a la hora de escoger los equipos con los que contará el sistema, pero también mucho depende del buen diseño que se realice para lograr que el movimiento cumpla con el campo de visión deseado.

El movimiento que necesita realizar el dispositivo está dado en dos planos, azimut y elevación. El azimut es el número de grados angulares que pueden llegar a girar las cámaras en el sistema, sobre el plano paralelo al plano de la base inferior de la góndola del dirigible. Este último plano, es en donde se acoplará el dispositivo de captura de imágenes aéreas con el cuerpo del vehículo.

La elevación es la cantidad de grados angulares que puede girar sobre el plano perpendicular al plano de la base de la góndola. La siguiente figura muestra los planos de azimut y elevación, en un sistema coordenado.

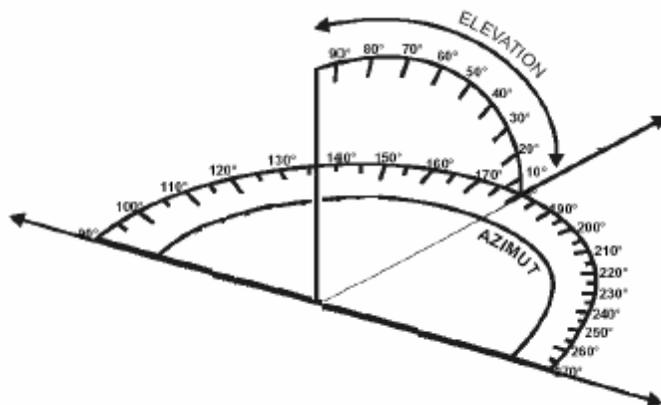


Figura 3.4 Planos de azimut y elevación

Existen diversos factores durante el vuelo, como los cambios inesperados en velocidad y dirección del viento que provocan que los valores angulares de azimut y elevación del sistema cambien constantemente debido a los movimientos no deseados en el dirigible. Esto da como resultado que las imágenes tengan mucho movimiento, disminuyendo su calidad y su facilidad en la lectura para análisis.

Lo anterior puede ser corregido de buena forma, utilizando giróscopos electrónicos capaces de medir ángulos y aceleraciones, a partir de un plano de referencia. Con esto la computadora sabría qué cantidad de grados se movió el sistema en determinado plano (Azimut o Elevación) y realizar correcciones en los motores para que vuelvan a la posición deseada.

El tiempo necesario para hacer las correcciones, dependerá de la velocidad del procesador y la velocidad de los motores para poder llevar a cabo la corrección. Por esta razón la última especificación que se tiene para poder realizar el diseño del sistema corresponde a la velocidad de movimiento.

3.1.5 Velocidad de movimiento.

La velocidad de movimiento que tenga el sistema en azimut y elevación, dependerá completamente de los motores eléctricos que se designen en el diseño. Por una parte, si la velocidad que se quiere es muy rápida, se necesitarán motores de más voltaje que puedan girar a grandes velocidades, pero ese aumento en el consumo de energía, elevará el peso por las razones antes mencionadas.

Así, aunque la velocidad sea el parámetro que menor influencia tuvo a la hora de escoger los componentes y componer el diseño, se puede ver que sí tiene una relación importante con los tres primeros parámetros, que son el peso, las dimensiones y el consumo de energía

La distribución de pesos en el dispositivo y la colocación de los ejes de giro, serán otras variables que influyan en los ángulos que puedan recorrer las cámaras en una determinada cantidad de tiempo. Los engranes que se usen serán parte fundamental del diseño mecánico que se tenga en el sistema para lograr la velocidad de rotación deseada.

El dirigible está diseñando para llevar a cabo vuelos a bajas velocidades, por lo que la velocidad de rotación del dispositivo no tendría que ser muy rápida, ya que la aeronave estaría el tiempo suficiente sobre el campo de visión de las cámaras, permitiendo que se logre dar un giro completo de 360 en el azimut sin necesidad de tener mucha velocidad de rotación.

Pensando en un principio en lo anterior, se tuvo un primer parámetro de velocidad; sin embargo, éste tuvo que ser cambiado a petición del grupo del Instituto, que pensó que en un futuro, cuando ya se tenga el dirigible volando, se podría robotizar el dispositivo de cámaras, y así ser capaz de detectar cuerpos calientes y hacer tomas y enfoques del lugar o el objeto por cuenta propia. Para que se pueda realizar esto, es necesario tener una velocidad de rotación mayor, pues si el sistema es usado en la investigación de fauna silvestre, se necesitara cierta velocidad capaz de poder seguir el movimiento de un animal terrestre o marino.

Una vez que se tienen definidas las especificaciones de diseño del SVVIVAA, se deben fijar valores para cada una. La siguiente tabla presenta los valores establecidos por parte del grupo del Instituto.

Tabla 3.1. Especificaciones de diseño SVVIVAA.

Especificación	Valor	Unidad
Peso	2	Kg
Dimensión	150 * 210 mm (Diámetro * Altura)	mm
Consumo de energía	12 V DC	V
Rango de visión	360 Azimut, 180 Elev.	Grados
Velocidad de movimiento elevación	10-15	rev/min
Velocidad de movimiento azimut	10-15	rev/min

Estos valores no deben ser superados en el diseño por ningún motivo, y como se mencionó anteriormente, es preferible que el diseño final se ajuste lo más posible a ellos. Los valores por debajo de los establecidos también afectarán el funcionamiento del dirigible, pero no en la cantidad como afectaría si estos son superados.

3.2 Benchmarking comparativo

Conociendo el marco de valores en donde entra el sistema que se requiere para la toma de imágenes en el dirigible, es posible realizar la comparación con los dispositivos existentes en el mercado, a esto se le conoce también como Benchmarking.

Para poder llevar a cabo el Benchmarking comparativo, lo primero es formar una lista de productos relacionados al producto en desarrollo, conociendo las características de este. Este paso se realizó en el capítulo anterior donde se mostraron los sistemas que existen en el mercado.

Se puede realizar una búsqueda de información relacionada con el producto. Sin embargo cuando se está desarrollando un producto nuevo o de alta tecnología, es difícil encontrar información relacionada por que no existe o por que la información es confidencial.

Teniendo información acerca de los productos relacionados y las necesidades del cliente (especificaciones de diseño), el siguiente paso es hacer una comparación como la que se presenta a continuación. Conociendo los valores de las especificaciones con las que debe contar el SVVIVAA, se pueden descartar los productos que no cumplan con ellas, ya que el equipo del Instituto tenía en mente obtener el sistema en el mercado y así evitar el diseño de éste. El benchmarking también sirve como respaldo de esta investigación y para dar una idea de la arquitectura que tendrá el sistema.

Hay algunos valores que no se mencionan en los catálogos enviados por las empresas como son principalmente el rango de visión y la velocidad de rotación. En dichos casos, se pondrá un comentario con la leyenda de “No aplica”.

Productos en el mercado

Empresa: FLIR Systems, Inc.

Sistema: TALON

Tabla 3.2 Comparación con TALON

Parámetro	Valor Proyecto dirigible	Valor sistema comparado	Aprobado
Peso	4 Kg	5.9 kg	No
Dimensiones	180 * 200 mm (Diámetro * Altura)	229 * 343 mm (Diámetro * Altura)	No
Consumo de energía	12 V DC	18-32 V DC	No
Rango de visión	360 Azimut, 50 Elev.	360 Azimut	Si
Velocidad	2 rad/s	No aplica	No aplica

Sistema: ULTRA 7500-B

Tabla 3.3 Comparación con ULTRA 7500-B

Parámetro	Valor Proyecto dirigible	Valor sistema comparado	Aprobado
Peso	4 Kg	13 kg	No
Dimensiones	180 * 200 mm (Diámetro * Altura)	229 * 343 mm (Diámetro * Altura)	No
Consumo de energía	12 V DC	19-32 V DC	No
Rango de visión	360 Azimut, 50 Elev.	270 Azimut	No
Velocidad	2 rad/s	No aplica	No aplica

Empresa: Infrared, Inc.

Sistema: CAM/IR 2208 Aerial series

Tabla 3.4 Comparación con CAM/IR 2208

Parámetro	Valor Proyecto dirigible	Valor sistema comparado	Aprobado
Peso	4 Kg	6.8 Kg	No
Dimensiones	180 * 200 mm (Diámetro * Altura)	178 * 266.7 mm (Diámetro * Altura)	Si
Consumo de energía	12 V DC	19-32 V DC	No
Rango de visión	360 Azimut, 50 Elev.	360 Azimut y 90 elevación	Si
Velocidad	2 rad/s	No aplica	No aplica

Se hizo la comparación únicamente con estos tres sistemas ya que los demás presentados en el capítulo anterior superan por mucho el peso requerido para que pueda ser equipado en el dirigible.

Como se puede observar, ninguno de los dispositivos existentes en el mercado tiene un valor en peso igual o por debajo al peso que se tiene como especificación. Debido a que el

peso es la condición que más importa en el diseño, todos los sistemas quedan descartados para ser incluidos en el dispositivo de toma de imágenes que tendrá el dirigible.

Siguiendo con la comparación, las dimensiones no superan por mucho los valores que se tiene determinados. Se puede ver el modelo CAM/IR 2208 Aerial series de la empresa Infrared, tiene dimensiones muy cercanas a las que se tienen como especificación.

Por otro lado, el consumo de energía está muy por encima al valor dado por el equipo del Instituto. Esto se debe a que los modelos que se están comparando tienen más funciones con las que cuenta el módulo diseñado en esta investigación. Probablemente, si algún día llegara a automatizarse el sistema, tendría un consumo mayor de energía, por los componentes adicionales que llevaría. Sin embargo, esta investigación se basó en los valores que se tenían, por lo que no fue posible añadir más funciones por dicha razón.

Los valores de rango de visión, sólo se mencionan en uno de los sistemas comparados, y es igual al valor que se tiene como parámetro: 360° en azimut. Sin embargo, ningún sistema del mercado señala la velocidad de rotación que tienen sobre los planos azimut y elevación, por lo que no es posible hacer un análisis comparativo.

Como conclusión, es evidente que ningún dispositivo podría ser acoplado al dirigible de investigación, con la función de tomar imágenes en vuelo del vehículo, ya que ninguno cae dentro de las especificaciones que definió el equipo que está a cargo de la construcción del dirigible.

Con esto se tiene el fundamento necesario para llevar a cabo un diseño con las características de los modelos que existen en el mercado pero que cumpla con las especificaciones señaladas anteriormente.

3.3 Componentes, materiales y sujeciones.

3.3.1 Estructura del SVVIVAA

Conociendo las especificaciones con los que debe cumplir el sistema, se realizó una buena investigación con la finalidad de encontrar distintos componentes y materiales existentes en el mercado.

Desde un principio era claro que lo que más incrementaba el peso del sistema eran las dos cámaras con las que se contaba, por lo que lo primero que se buscó fue dar con una solución a este problema. Los dos módulos que se escogieron para ser integrados, son componentes de alta tecnología, sobre todo el módulo infrarrojo, por lo que la búsqueda de información y la obtención de esta fue algo de lo que llevó más tiempo y dedicación.

Para seleccionar los materiales a utilizar en el SVVIVAA existen distintas técnicas con el fin de seleccionar el mejor con base en las especificaciones que se tienen. Una de ellas, es el uso de gráficas de propiedades de materiales. En ellas se relacionan dos diferentes propiedades, una en el eje X y la otra en el eje Y. Dentro de la gráfica se encuentran todas las familias de materiales acomodados con base en las dos propiedades.

Para poder utilizar este tipo de gráficas, es necesario conocer los atributos deseados en el material que se busca. Una vez que se cuenta con las especificaciones de diseño (atributos) con los que deben contar los materiales, se hace la búsqueda de gráficas que cuenten las propiedades que se busca.

Para la selección del material con el que estará fabricada la estructura del sistema, se necesita que éste sea ligero y resistente. A continuación se muestra la gráfica de propiedades de material que relaciona la densidad con la resistencia.

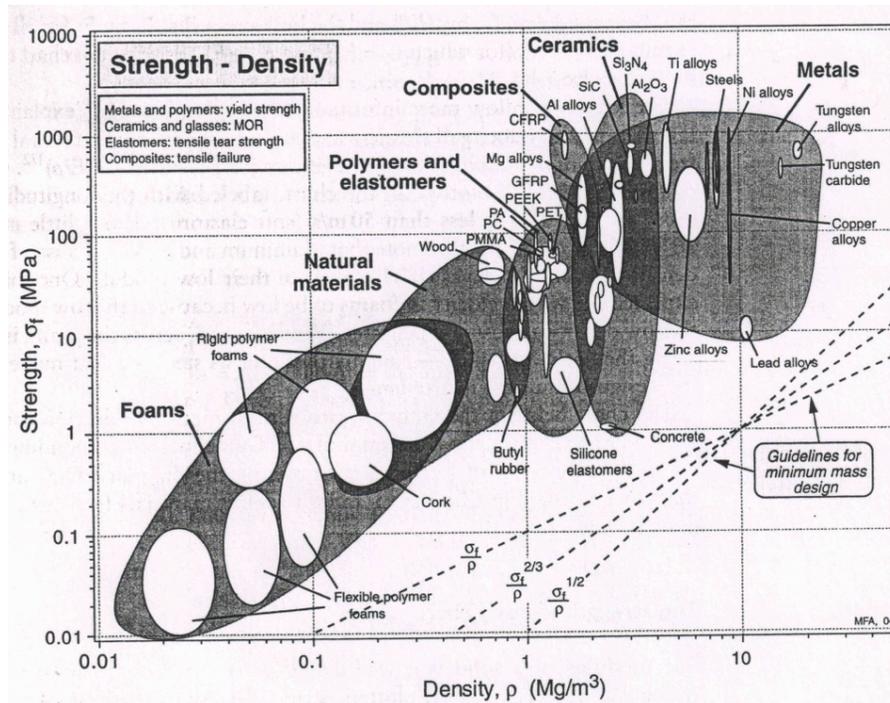


Figura 3.4 Gráfica de materiales (Densidad vs. Resistencia)

Fuente: Ashby F. Michael, "Materials Selection in Mechanical Design", Tercera edición, Ed. Elsevier, pp. 54, Estados Unidos, 2005

Ya que el material debe ser de baja densidad pero que además cuente con una buena resistencia, se busca un material que se ubique en el centro de la gráfica. Se puede observar que ahí se encuentran la familia de polímeros y elastómeros.

Por lo tanto, la búsqueda debe centrarse en encontrar un polímero o elastómero que tenga la mejor resistencia, pero que también sea ligero.

En la industria aeronáutica, estas dos propiedades son siempre requerimientos que debe tener un material. Haciendo una búsqueda de materiales usados en esta industria, y en especial los polímeros, se encontró que el Kevlar es el material que en la actualidad presenta el menor peso y la mayor resistencia. Por lo tanto, se decidió usar el Kevlar como

el material del que estará hecha la estructura del sistema. A continuación se da una descripción de este material.

3.3.1.1 Kevlar

La fibra aramida Kevlar fue comercializada en 1972 por la compañía Du Pont. La palabra aramida es un término genérico que se le da a las fibras que tienen como sustancia base una poliamida sintética en donde por lo menos el 85% de los enlaces de la aramida están atados directamente a dos cuerdas aromáticas. Esta definición, diferencia a las aramidas de las poliamidas convencionales como lo son el nylon.

Al ser una fibra sintética, el Kevlar se vende en forma de hilos teniendo diferentes presentaciones en el mercado, para una gran cantidad de aplicaciones. Los hilos difieren en el peso (gramos) de cada uno por cada 9000 metros y en sus propiedades de resistencia.

Los hilos pueden ser utilizados para formar telas de Kevlar, y así poder crear formas de cualquier tipo. Las telas de Kevlar 29 y Kevlar 49 son usadas ampliamente en materiales compuestos, en armamento, en componentes aéreos y aplicaciones marinas. Las telas de Kevlar son usadas en chalecos antibala por tener una gran dureza.

El Kevlar 49 se usa más cuando va a ser mezclado con una resina para formar un material compuesto. Las fibras de Kevlar 49 están tratadas superficialmente para favorecer la unión con la resina.

Las telas de Kevlar tienen propiedades únicas en un material, como son gran resistencia, poco peso, excelente estabilidad térmica y dimensional, resistencia al fuego y resistencia al corte.

Generalmente, las telas de Kevlar mantienen entre el 90-95% de la resistencia a la tensión de las fibras.

La siguiente tabla muestra algunas propiedades mecánicas de los diferentes tipos de fibras que existen. Cabe mencionar, que también se muestran las propiedades cuando se tiene una mezcla con resina epoxi, ya que en el diseño de esta investigación, se utiliza el Kevlar con resina epoxi.

Tabla 3.5 Propiedades típicas de hilos de aramida Kevlar

Propiedad	Kevlar & Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 68	Kevlar 119	Kevlar 129	Kevlar 149
Resistencia						
gpd	23	23	23	24	26.5	18
Kpsi	420	420	420	440	485	340
Módulo de Young						
gdp	550	950	780	430	750	1100
Mpsi	10.3	17.4	14.4	8	14	21
Elongación, %		2.8	3.0	4.4	3.3	1.5
Tira impregnada de epoxi						
Resistencia, Kpsi	525	525	525	610 est.		500
Módulo, Mpsi	12	18-19	16	16 est.		25-26
Elongación, %	4.4	2.9	-	-		1.9
Densidad						
g/cm ³	1.44	1.45	1.44	1.44	1.45	1.47
lb/ft ³	89.9	90.5	89.9	89.9	90.5	91.7
Retención de humedad, %	6	4.3	4.3	-	-	1.5
25 C, 65% RH						

Fuente: H.H. Yang, "Kevlar Aramid Fiber", Ed. John Wiley & Sons, pp. 11, USA, 1992

En la industria aeronáutica, se utiliza el Kevlar 49, combinando con resina epoxi, para crear aeropartes de muy bajo peso pero con una gran resistencia. Debido a que uno de los parámetros que se tienen es el peso, se buscó un material que no aportara mucho peso al peso total del sistema, pues la estructura del dispositivo abarca una buena parte del volumen que se tiene.

Además se buscaba que el material tuviera una buena resistencia, pues si se llegara a tener problemas con el funcionamiento del dirigible, y éste se precipitara a tierra, probablemente impactaría el SVVIVAA, ya que este se encuentra ubicado en la parte inferior del vehículo.

Si no se tuviera un material con la resistencia del Kevlar, los componentes en el interior, como son los módulos de las cámaras visible e infrarrojo se verían dañados por el impacto, y el costo de estos es alto.

3.3.2 Módulo infrarrojo

Los principales componentes con los que cuenta el sistema, son la cámara de video y la cámara infrarroja, aunque como se verá más adelante, no es toda la cámara la que va en el dispositivo sino que únicamente se tendrán como componentes el sistema óptico o lente y el módulo electrónico de cada cámara. Este módulo hace la toma de radiación visible e infrarroja y la convierte en señales digitales.

Como se pudo ver en el segundo capítulo de este documento, un sistema de detección de radiación infrarroja y visible está compuesto por una serie de procesos. Una cámara infrarroja o de video (visible) contiene el sistema de detección, y además cuenta con una computadora que se encarga de procesar las señales digitales y poder proyectarlas sobre una pantalla, y un sistema de almacenamiento de información digital, como puede ser un DVD, una memoria USB, etc.

El sistema de procesamiento de señales digitales (PC), y el sistema de almacenamiento de información digital no están incluidos en esta investigación, ya que estos dos sistemas pueden ser usados en otras funciones del dirigible, por lo que deberán ir dentro de la zona de carga de la góndola del dirigible.

A la combinación del sistema óptico y el sistema de toma de radiación infrarroja, amplificación de señales y conversión de señales análogas-digitales, se le denominará de aquí en adelante como módulo infrarrojo y módulo visible.

Como se había comentado, el grupo del Instituto ya contaba con una cámara infrarroja. En un principio se pensó usar dicha cámara para ser integrada en el sistema, sobre todo para reducir costos. Sin embargo, la cámara tenía integrada la computadora y el sistema de almacenamiento de información, lo que la hacía muy pesada y voluminosa.

Fue por esta razón, que se decidió investigar la manera en que funcionaban las cámaras infrarrojas y de video, con la finalidad de encontrar en el mercado productos que fueran menos pesados y de menor volumen. Gracias a esto, se descubrió que era posible conseguir un módulo infrarrojo, el cuál es de menor tamaño y de peso muy por debajo del que se tenía con la cámara.

La búsqueda no fue fácil, ya que al ser un producto de tecnología reciente y de poca demanda comercial, es difícil conseguir información por parte de los proveedores. Se pidió información a una empresa alemana sin tener respuesta alguna. Posteriormente se solicitó información sobre módulos infrarrojos para ser integrados a sistemas de imagen térmica a dos compañías estadounidenses. La respuesta fue que necesitaban más información sobre el uso que se le iba a dar al módulo, cuál era la actividad que desempeñaba el Instituto y muchas más. Sus razones eran que los módulos infrarrojos podían ser usados en la fabricación de armas de destrucción masiva. Una vez que se respondieron todas las interrogantes, las empresas mandaron un catálogo donde sólo mostraba el tipo de sensor que usaba, y las salidas de señales con las que se contaba. Con esa información, no era posible integrar los módulos en el diseño 3D pues no se contaba con ningún tipo de dimensión ni fotografías suficientes como para poder modelarlo.

Por último se mandó una petición a una compañía de origen chino, que contaba con un módulo como el que se buscaba. La respuesta fue muy buena por parte de la gente de ventas, y fue posible que mandaran suficiente información para poder modelar el módulo infrarrojo así como el lente utilizado en el diseño.

El lente que se utilizará tiene una apertura focal de 50 mm, que prácticamente es un lente que abarca un campo de visión semejante al campo de visión de un humano. Como el

sensibilidad y tiene muy buena flexibilidad para ser integrado a un sistema de toma de imágenes térmicas. Gracias a que su producción es en masa, su precio es accesible.



Figura 3.6 Módulo infrarrojo IR 112 GUIDIR



Figura 3.7 Módulo infrarrojo IR 112 GUIDIR con acoplamiento para el lente infrarrojo

A continuación se presentan las especificaciones técnicas.

Tabla 3.6 Características técnicas IR 112 GUIDIR

Sensor	Características
Tipo	Arreglo focal plano Microbolometro, 384— 288 pixeles, sin sistema de refrigeración.
Ventana espectral	8-14 μ m
Tasa de respuesta	> 4 MV/K a 30°C
Tiempo de respuesta	4mS
Sensibilidad térmica	<80mK a 30°C
Potencia	
Voltaje de entrada	6VDC- 12VDC
Corriente de operación	320mA@9V, 25°C (corriente de operación normal) 350mA @9V, 25°C (corriente máxima)
Ambiente	
Temperatura de operación	-40°C - 60°C
Propiedades físicas	
Peso	0.09Kg (sin incluir lentes)
Dimensión	59.97mm— 51.4mm— 51.4mm (incluyendo montaje para lentes)
Desempeño	
Enfoque	Control Automático y manual
Zoom electrónico	2x, 4x interpolando
Imagen	
Video de salida	PAL/ NTSC
Interfaces	
Control remoto	RS232 (RS422 opcional)
Control local	Tablero de Control, LVDS (Opcional) Transferencia de imagen hacia PC
Óptica	
Lentes	Variedad de lentes (opcional)

El detector con el que cuenta el módulo es del tipo térmico, fabricado de bolómetro. Como se pudo ver anteriormente, este tipo de detectores no necesitan ser refrigerados y para la altura a la que vuela el dirigible (300 m), cuenta con una buena resolución. Al no necesitar un sistema de refrigeración, hace que el módulo sea muy liviano.

Existen en el mercado módulos infrarrojos que cuentan con detectores de tipo fotovoltaicos y fotoconductivos, los cuales reducen en buena forma el ruido térmico, que en este tipo de cámaras puede llegar a ser muy grande, ya que la radiación que captan es la infrarroja. Sin embargo necesitan ser refrigerados, por lo que se tiene una ganancia en sensibilidad y resolución, pero hay un incremento de peso, volumen y consumo de energía.

Como se puede observar en la siguiente figura, el módulo infrarrojo viene protegido por una estructura de aluminio, que además contiene el acoplamiento para el sistema óptico. Sin embargo el módulo no cuenta con ningún tipo de acoplamiento para ser integrado en un sistema, por lo que fue necesario diseñar un acoplamiento para que el módulo se acople dentro del dispositivo.

3.3.3 Módulo visible

Gracias a que la tecnología de las cámaras de video (visibles) es más comercial que las cámaras infrarrojas, es posible encontrar más opciones de los módulos que hacen la conversión de radiación visible en imágenes en el mercado. Por lo que la búsqueda del módulo visible fue un poco más fácil que para el módulo infrarrojo. Principalmente porque existe más información hacia el público sobre los componentes, características y sobre todo de dibujos y planos de los modelos, lo que facilitó la reproducción del módulo y el sistema óptico en 3D, a través del programa de diseño que se usó en el trabajo.

El sistema de lentes del módulo visible se encuentra integrado en éste. Cuenta con un apertura focal de 5.1 a 50 mm. Esto es muy bueno pues los dos sistemas ópticos, el visible e infrarrojo, cuentan con una apertura focal de 50 mm, por lo que el campo de visión será el mismo.

Al estar integrado en el módulo, reduce el tamaño y el peso del conjunto. El ajuste de la apertura focal puede ser automático o manual. Durante el vuelo, se ajustaría el lente para que mantenga una apertura focal de 50 mm, para que coincida con el campo de visión de la cámara infrarroja. Sin embargo, si se llegará a automatizar el sistema de captura de imágenes, se podría optar por el enfoque automático para poder realizar tomas más detalladas de un cuerpo o campo en particular.

El módulo además cuenta con un zoom digital, pero esto se logra gracias al sensor de alta definición que se tiene, y no por el sistema de lentes, por lo que se hablará de esto más adelante, cuando se detalle el tipo de sensor con el que cuenta el módulo.

El módulo de la cámara de video es un modelo comercial de la compañía japonesa SONY. Gracias a que la compañía es muy grande, ésta ofrece los catálogos de todos sus modelos a través de su página de internet, por lo que no fue necesario mandar correos electrónicos para conseguir los planos y el manual de operación.

El modelo es el HD Color Camera Module FCB-H10, y en la página de internet de SONY se presenta como un producto para uso industrial. Este módulo está diseñado para ser integrado en un sistema de imagen visible, por lo que cuenta con una base con entrada para tornillos y así poder acoplarlo al sistema que se tenga.

La figura 3.8 muestra una toma del módulo FCB-H10



Figura 3.8 Módulo Sony FCB-H10

Se puede observar como el tamaño del sistema óptico visible es más pequeño que el sistema óptico infrarrojo, aun cuando las aperturas focales son de 50 mm para los dos sistemas. Esto se debe a que el sistema óptico infrarrojo necesita más lentes para capturar la mayor cantidad de radiación térmica como se mencionó en el capítulo 2. Esta es una gran ventaja para el sistema de toma de imágenes, ya que la ganancia que se tuvo con el tamaño y peso de los lentes infrarrojos, se ve compensada con el tamaño y peso del sistema óptico visible. A continuación se presentan las características técnicas del módulo visible:

Tabla 3.7 Características técnicas HD Color Camera Module FCB-H10

Características	Valor
Sensor	1/3-tipo CMOS
Número de píxeles efectivos	Aprox. 2,000,000 pixels
Lentes	10x zoom óptico, f=5.1 mm a 51.0 mm
Zoom Digital	12x (120x con zoom óptico)
Distancia mínima al objeto	10 mm (f=51.0 mm)
Obturador electrónico	1/2 a 1/10,000 s, 21 pasos
Rango dinámico	Más de 50dB
Señal del sistema HD	1080/59.94i, 1080/50i, 720/59.94p, 720/50p
Estándar	NTSC, PAL
Video salida HD Componente análogo	Y/Pb/Pr
Efectos de imagen	Arte Nega, Blanco y negro e Imagen congelada
Interfase de control de Cámara	VISC
Temperatura de almacenamiento	-20 a 60 °C
Temperatura de operación	0 °C a 45 °C
Consumo de energía	6 a 12 V DC, 3.8 W
Peso	0.120 Kg
Dimensiones	(ancho x altura x profundidad) 47.2 x 43.1 x 72.2 mm

Como se puede ver, el módulo cuenta con un sensor del tipo CMOS. Aún cuando este tipo de sensores cuenta con una menor resolución y sensibilidad que los sensores CCD, el CMOS del módulo visible maneja resolución de alta definición. Esto es gracias al avance que ha tenido la tecnología de procesadores.

Otra cualidad del sensor, es que al tener una gran cantidad de píxeles (2 Mega píxeles aproximadamente), es capaz de realizar zoom digital.

El zoom digital es una ampliación de la imagen captada por el sensor, pero al ser de alta resolución, puede tenerse una ampliación de 12x sin que la imagen pierda resolución, es decir que no se vea pixeleada.

Otra ventaja que se tiene con el sensor CMOS, es que no requiere mayor consumo de energía para realizar las demás operaciones con las que cuenta el módulo. Sin embargo, el nivel de ruido de esta cámara es moderadamente alto, por lo que pierde sensibilidad.

3.3.4 Rodamientos

Al ser un sistema con movimientos angulares, es necesario el uso de algún tipo de rodamiento que permitan girar al sistema.

En la selección de rodamientos que serán integrados en cualquier sistema, se deben de tomar las siguientes consideraciones.

- La capacidad de carga que deberá soportar el rodamiento
- La velocidad de rodamiento del eje
- Las condiciones en las que se encontrará el rodamiento, como temperatura, humedad, acidez, etc.
- Magnitud y dirección de las cargas

Además de los criterios de selección antes mencionados, el rodamiento también deberá ser de bajo peso.

Como el sistema debe ser de bajo peso, la carga que soportará el rodamiento será pequeña. Al realizar la búsqueda de rodamientos, se encontró que los rodamientos fabricados con materiales plásticos son los de menor peso en el mercado, y recomendados para soportar cargas ligeras.

Los dos principales materiales plásticos usados en la fabricación de rodamientos son el poliéster y teflón. Se decidió usar rodamientos de teflón por las propiedades antiadherentes que presenta y además porque no se deteriora en ambientes húmedos.

A continuación se presenta una descripción y propiedades de este material:

3.3.4.1 Teflón

Al igual que el Kevlar, el teflón (politetrafluoretileno) es un material comercializado por la empresa Du Pont. Es un polímero parecido al polietileno, pero en lugar de átomos de hidrógeno, el politetrafluoretileno está enlazado a átomos de flúor.

El Teflón es un material muy usado en la industria. Esto se debe a la gran cantidad de propiedades físicas y químicas con las que cuenta. Algunas de ellas son una gran resistencia térmica, por lo que llega a resistir temperaturas muy elevadas. Es un material inerte que casi no reacciona con ninguna sustancia química, además de que también es resistente a la corrosión.

Gracias a las propiedades mencionadas anteriormente, el teflón es usado en las industrias aeronáutica, aeroespacial, médica, manufactura de semiconductores, etc. Pero existe una propiedad adicional, que fue la que hizo que el teflón se eligiera para integrarse en el SVVIVAA, y es que el PTFE es el material con el coeficiente de fricción más pequeño que existe. El teflón muestra un efecto de autolubricación manteniendo sus características mecánicas constantes, lo que lo hace particularmente adecuado para la fabricación de rodamientos, juntas, anillos-O, etc.

Du pont comercializa el Teflón (PTFE) en forma de polvos y resinas, con la finalidad de recubrir materiales.

La siguiente tabla contiene las propiedades mecánicas del Teflón (PTFE)

Tabla 3.8 Propiedades mecánicas del Teflón

Propiedad	Unidad	Teflon® PTFE
Peso Específico	--	2.15
Resistencia mecánica	MPa (psi)	21-34 (3,000-5,000)
Elongación	%	300-500
Resistencia al impacto	J/m (ft·lb/in)	189 (3.5)
Dureza	D	50-65 HB
Coefficiente de Fricción, Dinámico	--	0.05-0.10

http://www2.dupont.com/Teflon_Industrial/en_US/tech_info/techinfo_compare.html

El teflón será el material de los rodamientos del sistema, ya que al no ser de tanto peso, es posible generar los movimientos de los planos azimut y elevación juntando dos discos de teflón. Si se tuviera un dispositivo de mayor peso, no sería posible hacerlos de teflón, pues la fricción aumentaría y no se podría tener la velocidad requerida por el diseño.

En el siguiente capítulo, se mostrará como son los rodamientos, y como son acoplados estos al sistema.

3.3.5 Motores eléctricos

Se buscó que los motores eléctricos que harán posible el movimiento del sistema en azimut y elevación, fueran lo más ligeros posibles, y que su consumo de energía fuera el menor, considerando que tienen como parámetro de diseño la velocidad de rotación.

Pero además de la velocidad a la que deben de girar, también deben contar con un par de torque suficiente para poder mover el peso del sistema, sobre todo el motor que realiza el movimiento en el plano de elevación.

Los componentes al interior del sistema, fueron acomodados de manera que se tuviera un balance adecuado para facilitar el movimiento, ya que el sistema óptico del módulo infrarrojo, es de mayor peso y dimensión que el sistema óptico visible, el cual viene integrado en el módulo visible.

Se buscó la manera de poder realizar los dos movimientos con un solo motor, a través de un dispositivo mecánico acoplado a los dos planos de giro. Sin embargo, esto no fue posible debido a que se complicaba mucho el diseño y su manufactura era bastante complicada.

La figura muestra una imagen de uno de los motores eléctricos con los que se cuenta.



Figura 3.9 Imagen de uno de los motores eléctricos del SVVIVAA

Existen gran cantidad de empresas, negocios y tiendas dedicadas a la venta de motores eléctricos de paso de diferentes características. La tienda de donde se seleccionaron los motores, es una compañía dedicada a la venta de todo tipo de componentes para sistemas mecatrónicos. Cuenta con una página de internet muy buena, donde se dan todos los detalles de cada artículo, así como planos de dibujo, lo cual hizo que el modelado en 3D fuera más sencillo, aún cuando la geometría de los motores no tiene muchas complicaciones.

3.3.6 Engranés

Como se podrá observar en el siguiente capítulo, será necesario diseñar un sistema de engranes que transmitan el movimiento al sistema para que este gire a la velocidad de diseño en el plano azimut. Debido a que los engranes también deben cumplir con la

principal especificación que se tiene, que es el peso, estos deben ser manufacturados de un material ligero pero que sea capaz de soportar las fuerzas generadas durante la transmisión de movimiento.

El material más usado y con mayor información en fuentes de investigación es el acero, ya que la mayor parte de los engranes son usados en transmisiones de potencia y velocidad en maquinaria pesada y en las transmisiones de los automóviles. Sin embargo, con el desarrollo del campo de los materiales plásticos, se comenzó a producir engranes plásticos con el fin de reducir peso, que es lo que se busca exactamente en el diseño propuesto (SVVIVAA).

La siguiente tabla muestra las propiedades físicas de algunos materiales usados en engranes.

Tabla 3.9 Propiedades físicas de plásticos usados en engranes.

Material	Resistencia	Resistencia a flexión	Módulo Young	Temp. de distorsión por calor	Absorción de humedad (% 24 hr)	Dureza Rockwell
Acetal	60.7-68.9	89.6-96.6	2826	110-124	0.25	M94 R120
ABS	31-58.6	34.5-93	2826	82-118	0.2-0.5	R80-120
Nylon 6/6	77.2-90.3	100.7	827-1380		1.3	R115-123
Nylon6/10	48.3-58.6	72.4	2758	92	.4	R111 M70
Policarbonato	55.2-65.5	75.8-89.6	2758	140-143	0.15	R112
Alto impacto			2413			
Poliestireno	13.1-27.6	37.9-86.2		71-96	.05-.10	M25-69
Poliuretano			2110-4000			
Polivinil	31-55.2	49		82-96	.60-.80	M29 R90
Clorido	41.4-62	55.2-103.4	586	60-79	07-.40	R100-120
Polisulflon			2110-2758			
MoS ₂	70.3	113		175	0.22	M69-R120
Nylon	70.3	168.9	2551	60	0.4	D785

Fuente: Martin L.D. "Injection Molded Plastic Gears", Plastic Design and Processing Magazine, part 1. pp: 38-45, Agosto 1968.

Debido a que el engrane estará pegado a la diadema del SVVIVAA, es necesario que el material que se seleccione para los engranes, debe ser resistente a sustancias químicas como las que conforman los pegamentos.

De los materiales presentados en la tabla anterior, el Zytel (Nylon), es el material con mejor resistencia química. Al igual que el Kevlar y el Teflón, el Zytel es fabricado por la empresa Du pont.

3.3.6.1 Zytel (Nylon)

El Nylon fue presentado por el Director de la estación experimental de Du pont, Wallace Hume Carothers en el año de 1939. El Nylon es un polímero compuesto de fibras sintéticas

llamadas amidas poliméricas, con una estructura química derivada del carbón, agua y aire. Se caracteriza por tener una gran dureza, resistencia y la habilidad de obtener distintas formas.

El Nylon tuvo sus primeras aplicaciones durante los años 40 en la industria automotriz, fabricando piezas no críticas como válvulas del sistema, rodamientos, sistema de movimiento de parabrisas y engranes. Sin embargo, debido a las altas temperaturas y presiones, así como la necesidad de resistir sustancias químicas, las propiedades del Nylon tuvieron que mejorar para soportar las condiciones del sistema.

Hoy en día existe una gran cantidad de tipos de Nylons (Zytel), cada uno de ellos con propiedades diferentes y ofrecidas al mercado por la empresa Du Pont. A continuación se presentan las propiedades físicas del Zytel (Nylon), material recomendado para la fabricación de los engranes del SVVIVAA, gracias a que presenta una densidad adecuada para el peso correspondiente a los engranes ya que maneja una buena resistencia a agentes químicos como los adhesivos.

Tabla 3.10 Propiedades físicas del Zytel 450

Propiedad	Zytel 450
Resistencia	55
Módulo Young	2200
Temperatura de deflexión con carga (°C)	92
Densidad (kg/m ³)	1080
Absorción de agua %	2.2

Fuente: <http://plastics.dupont.com/plastics/pdf/europe/zytel/ZYTPE.pdf>

3.3.7 Sujeciones

Se buscó que las sujeciones no aportaran demasiado peso al sistema. Sin embargo, la mayoría de éstas deben ser de una material que soporte las fuerzas a las que estarán sometidas, que en realidad no son muy grandes.

La mayoría de las sujeciones son tornillos de acero; sin embargo, para las uniones entre los rodamientos de Teflón y la estructura de Kevlar, se utilizará un pegamento en lugar de tornillos con el fin de reducir peso.

Para el caso de la montura de la cámara infrarroja y la cámara de video se tuvo que hacer uso de sujeciones de metal para evitar que se muevan durante el vuelo y las imágenes pierdan calidad. En el siguiente capítulo se mostrarán estas sujeciones conforme se vaya avanzando en la presentación del modelado virtual.

Capítulo 4. Modelado virtual.

Teniendo definidas las especificaciones de diseño y habiendo realizado un benchmarking comparativo con los sistemas en el mercado, se definieron los materiales y componentes que conformarían el sistema.

En este capítulo se presenta el modelado virtual del sistema, que se llevo a cabo con el uso de un software de diseño de nombre Solid Edge. Este programa es uno de los tantos programas CAD-CAE (Computer added design-Computer added engineering) que existen hoy en día. Estos softwares tienen la capacidad de crear modelos tridimensionales y renderizarlos (crear imagen del modelo), pero además cuentan con funciones de elemento finito, de manufactura, etc., que hacen que el diseño mecánico también se facilite.

Posteriormente se muestra la distribución de los componentes dentro del sistema, el ensamble y su acoplamiento con la góndola del dirigible, sin embargo, el alcance de este trabajo no contempla el diseño del proceso de manufactura de los componentes diseñados, aunque el diseño se hizo tratando de que este no fuera complicado.

Los componentes que conforman el sistema de visión visible e infrarrojo para vehículo aéreo autónomo SVVIVAA son los siguientes:

- Módulo de video de alta definición
- Módulo infrarrojo
- Motores eléctricos
- Potenciómetro
- Encóder
- Estructura del sistema
- Tapa de la estructura
- Diadema
- Rodamientos
- Sujeciones
- Engranés
- Espacio de acoplamiento en la góndola del dirigible
- Tapa de la góndola

Los componentes que fueron diseñados durante esta investigación, son los siguientes:

- Estructura del sistema
- Tapa de la estructura
- Diadema
- Rodamientos
- Sujeción del motor 1
- Sujeción del motor 2
- Sujeción de la cámara infrarroja
- Engranés
- Espacio de acoplamiento dentro de la góndola

- Tapa góndola

Por lo que los componentes que fueron escogidos de catálogos de empresas dedicadas a la fabricación de cada uno de ellos, son los siguientes, y serán nombrados a lo largo de este trabajo como componentes adquiridos.

- Módulo de video de alta definición
- Módulo infrarrojo
- Sujeción del módulo visible
- Potenciómetro
- Motores eléctricos
- Sujeción del eje motor 1
- Encóder

Para los componentes diseñados viene especificado el material o materiales del que está fabricado cada diseño, junto con la densidad y el volumen del material o materiales. En el caso de los componentes adquiridos, se especificara el peso total de cada uno.

Conociendo esto se podrá obtener el peso total del sistema, y comprobar que el diseño cumple con las especificaciones de diseño que se tienen, cuándo se haga la revisión de éste, dentro del presente capítulo.

4.1. Modelado de los componentes adquiridos

Se presentará primero el modelado de los componentes que no fueron diseñados en este trabajo, los planos de diseño se pueden ver en los anexos de este documento

4.1.1 Modulo visible

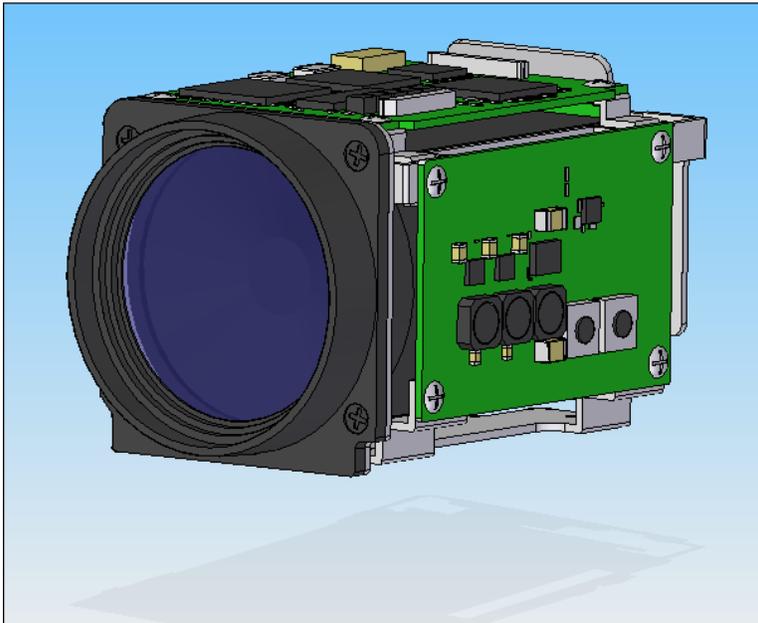


Figura 4.1.1 Modelado del Sony FCBH10

Se modeló cada parte del módulo para luego ser ensamblado.

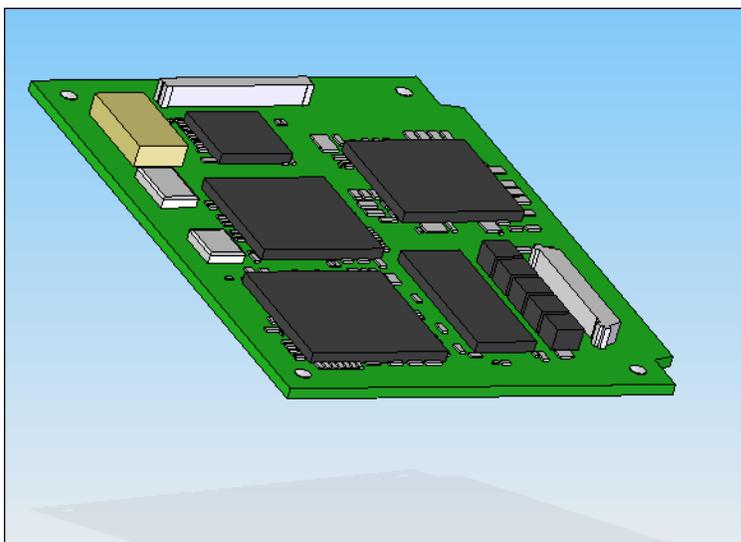


Figura 4.1.2 Circuito superior del Sony FCBH10

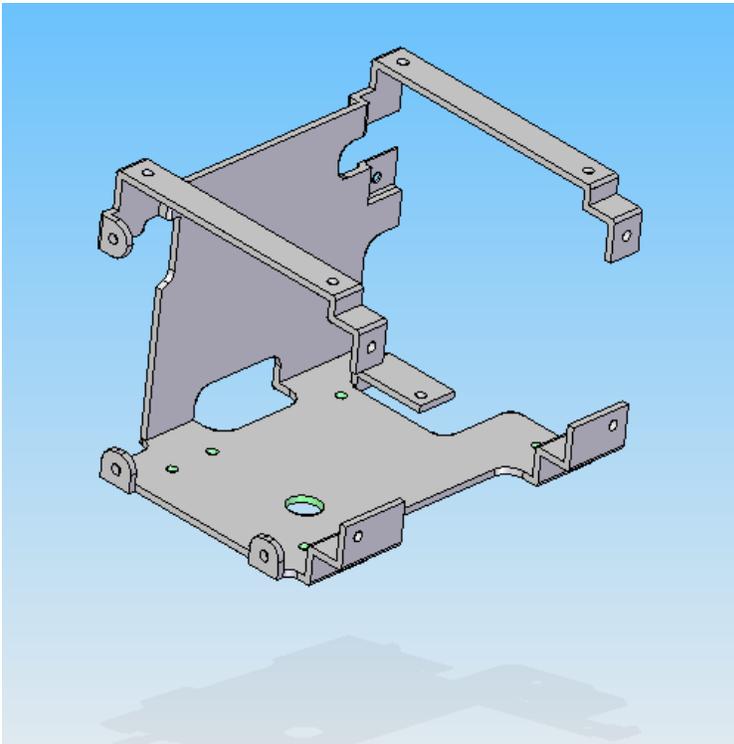


Figura 4.1.3 Base inferior del Sony FCBH10

Peso total: 0.12 Kg

4.1.2 Módulo Infrarrojo

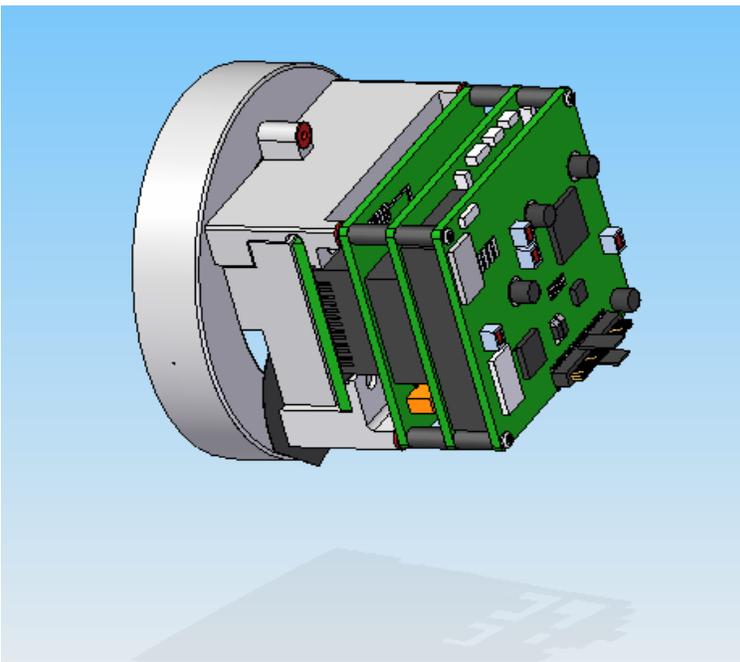


Figura 4.1.4 Modelado del IR112 GUIDIR con acoplamiento para lentes

Lente

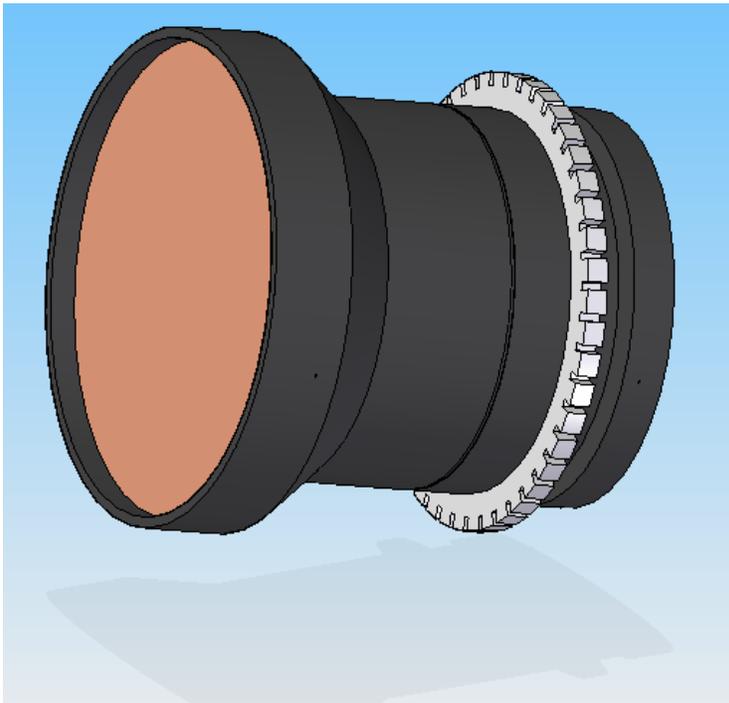


Figura 4.1.5 Modelado de los lentes infrarrojos de 50 mm

Armazón

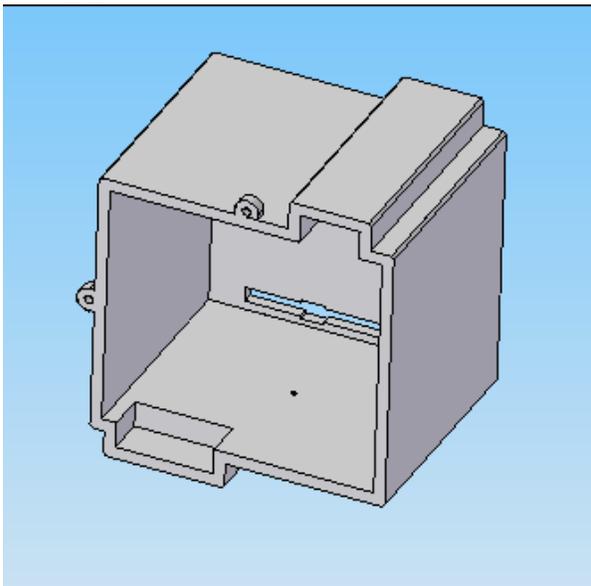


Figura 4.1.6 Modelado de la protección metálica del módulo infrarrojo

Ensamble

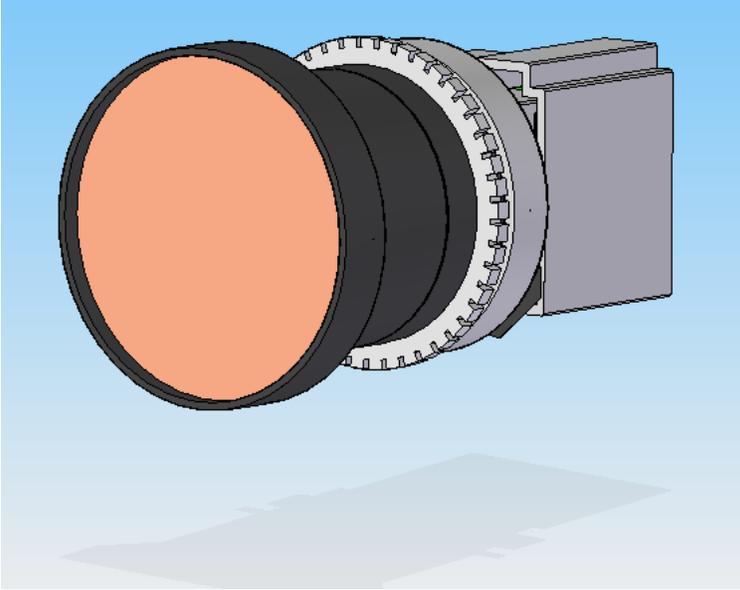


Figura 4.1.7 Modelado del ensamble del sistema infrarrojo

Pesos:

Módulo con armazón: 0.09 Kg

Lente: 0.25 Kg

Total: 0.259 Kg

4.1.3 Sujeción módulo de alta definición (visible)

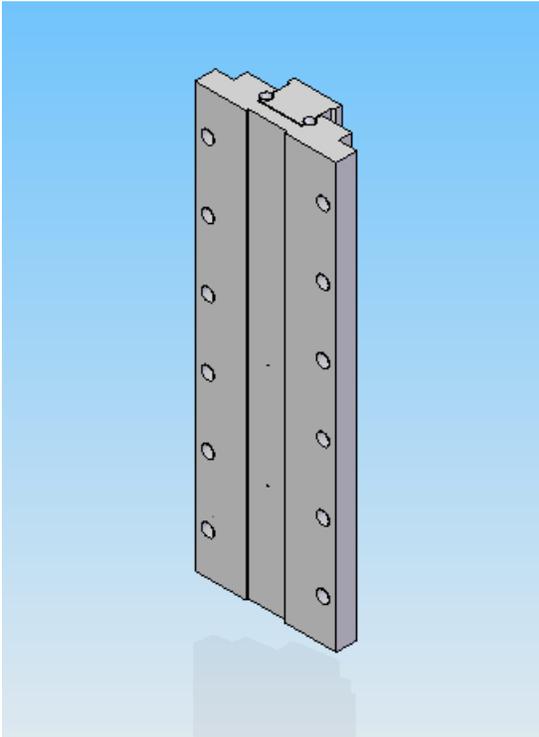


Figura 4.1.8 Vista frontal del modelado de la corredera que soporta el módulo visible

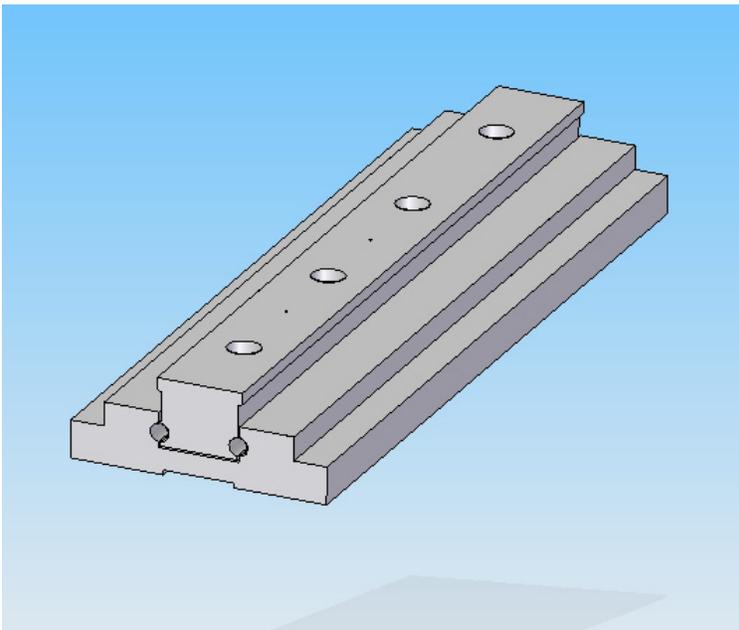


Figura 4.1.9 Vista superior del modelado de la corredera que soporta el módulo visible
Peso: 0.105 Kg

4.1.4 Potenciómetro

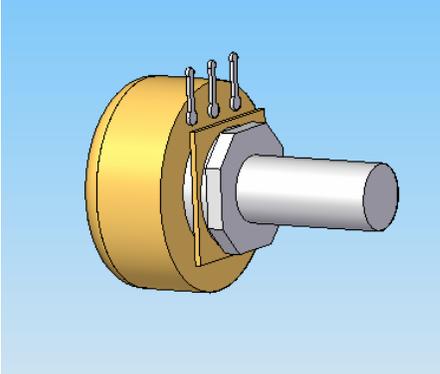


Figura 4.1.10 Modelado del potenciómetro eléctrico
Peso: 0.006 Kg

4.1.5 Motor 1, (giro en elevación)

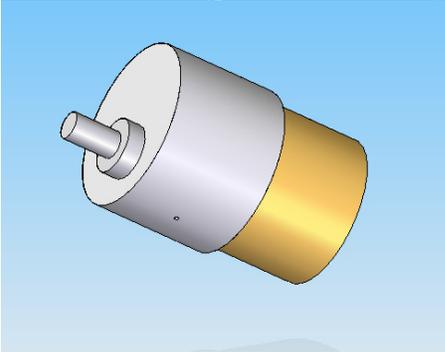


Figura 4.1.11 Modelado del motor 1
Peso: 0.120 Kg

4.1.6 Motor 2, (giro en azimut)

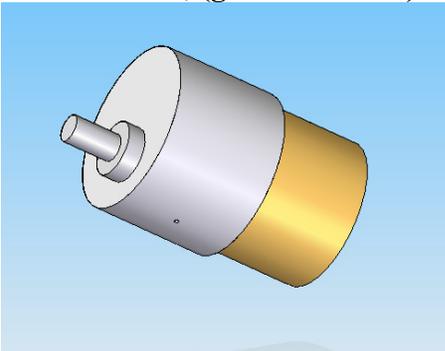


Figura 4.1.12 Modelado del motor 2
Peso: 0.120 Kg

4.1.7 Sujeción eje motor 1

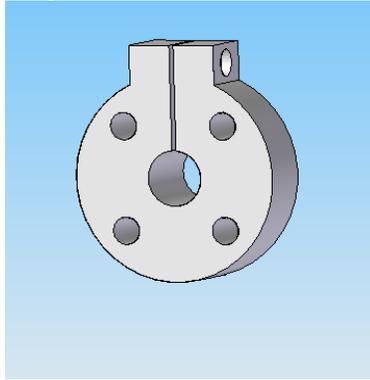


Figura 4.1.13

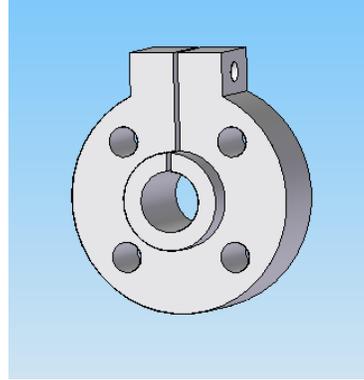


Figura 4.1.14

Vista frontal y posterior del modelado de la sujeción del eje
Peso: 0.0076 Kg

4.1.1.8 Encóder

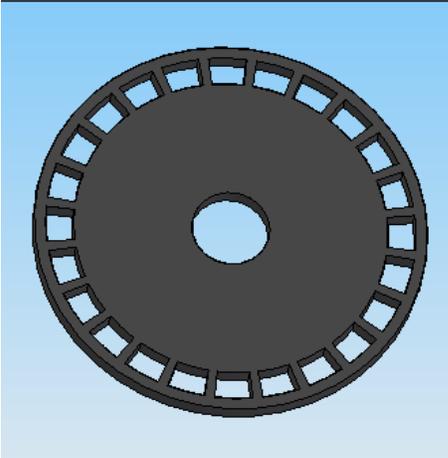


Figura 4.1.15 Modelado del encóder

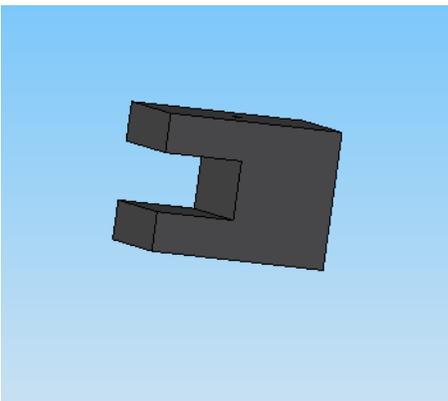


Figura 4.1.16 Modelado del lector óptico del encóder
Peso: 0.003 Kg

4.2 Componentes diseñados

A continuación se presentan los componentes del SVVIVAA que fueron diseñados en este trabajo. Cada uno de ellos es presentado con sus respectivos dibujos de diseño (dimensionados). Cabe especificar que las unidades de los dibujos están en milímetros. El material de cada componente, así como el volumen del componente y la densidad del material, se indican después de la imagen de su modelado en tercera dimensión, al igual que como se hizo con los componentes adquiridos con anterioridad indicando el peso. Solid edge cuenta con una función que calcula el volumen total del sólido.

4.2.1 Estructura del sistema

La estructura del sistema es una de las partes principales del diseño, pues dentro de ella van los módulos infrarrojo y visible. Es uno de los componentes de mayor volumen por lo que era necesario fabricarla de un material ligero y resistente como el Kevlar.

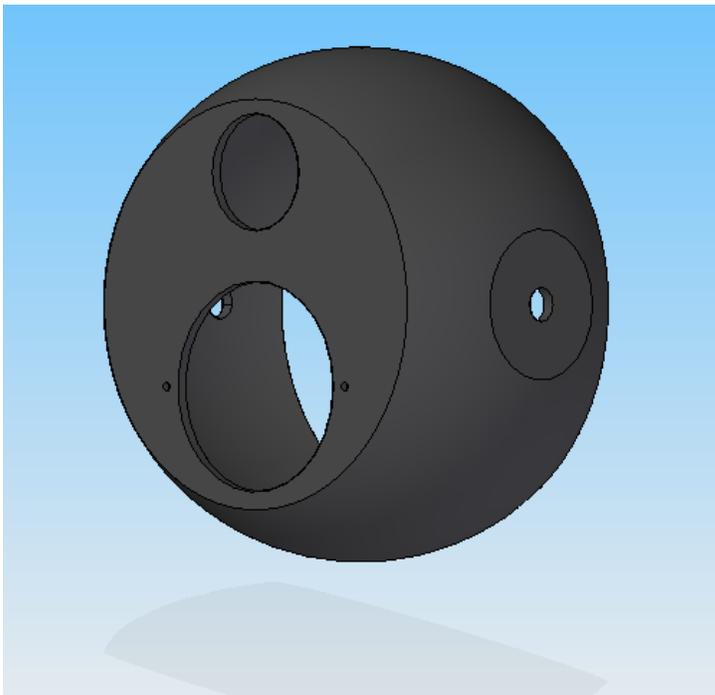


Figura 4.2.1 Vista frontal del modelado de la estructura del SVVIVAA



Figura 4.2.2 Vista posterior del modelado de la estructura del SVVIVA



Figura 4.2.3



Figura 4.2.4

Vistas laterales de la estructura

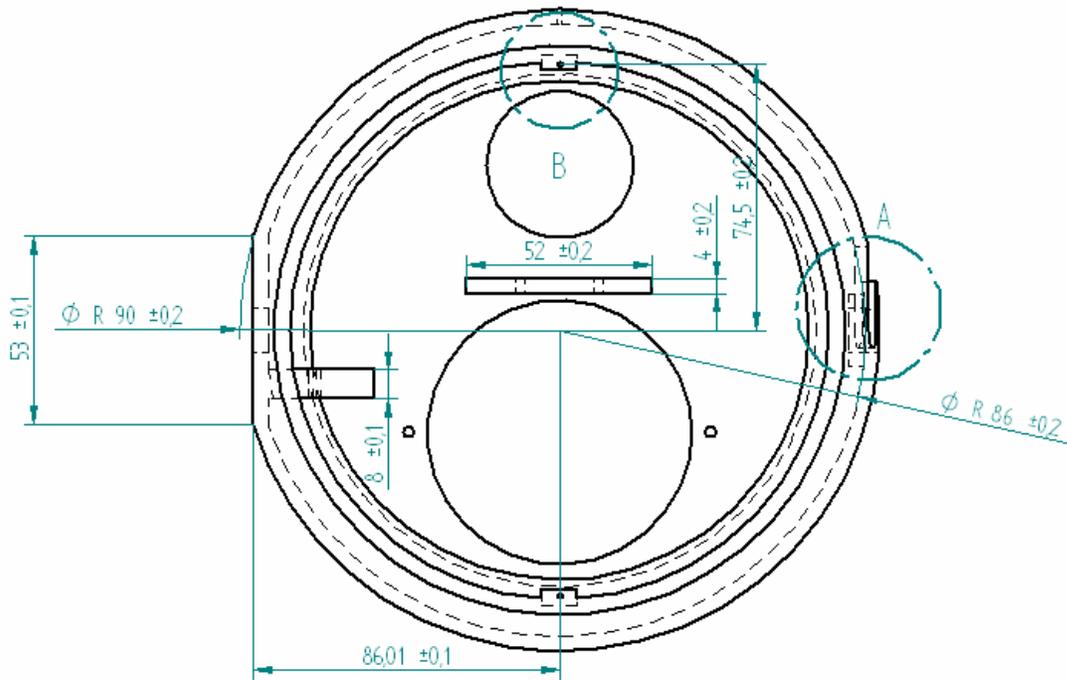


Figura 4.2.5 Dibujo dimensionado de la cara posterior de la estructura

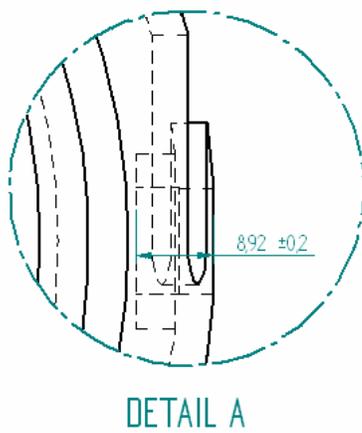


Figura 4.2.6 Detalle A de la estructura

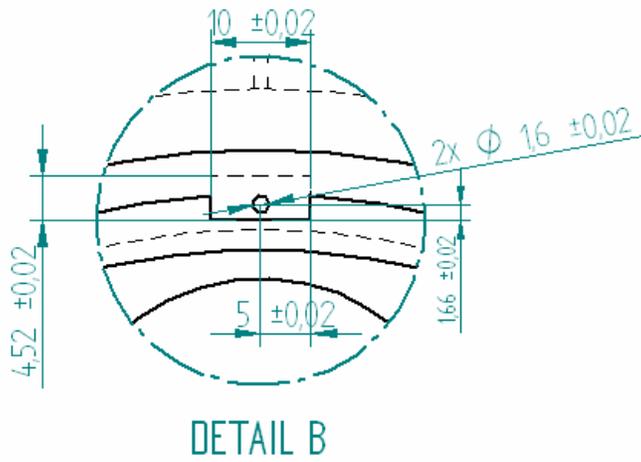


Figura 4.2.7 Detalle B de la estructura

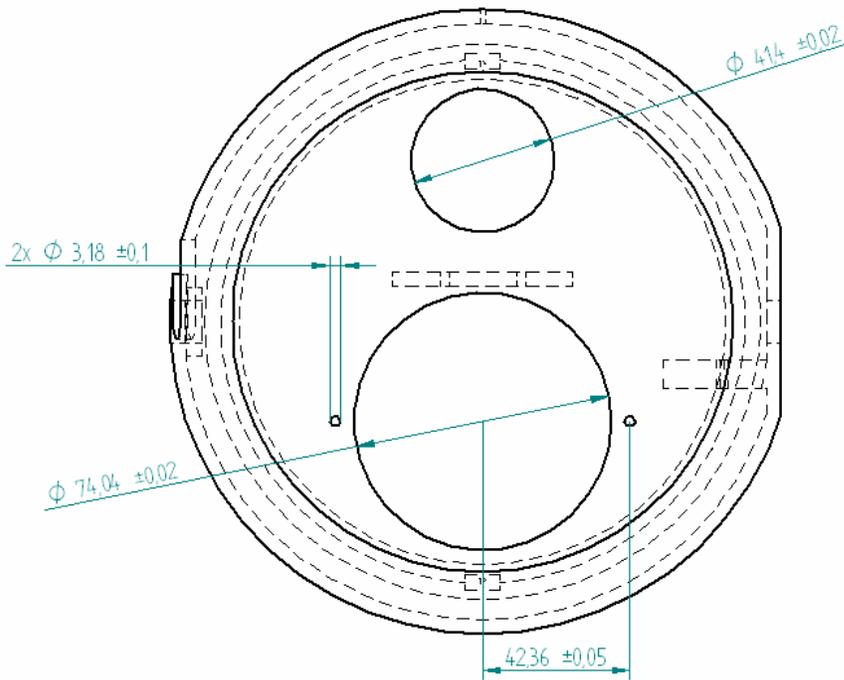


Figura 4.2.8 Dibujo dimensionado de la cara frontal de la estructura

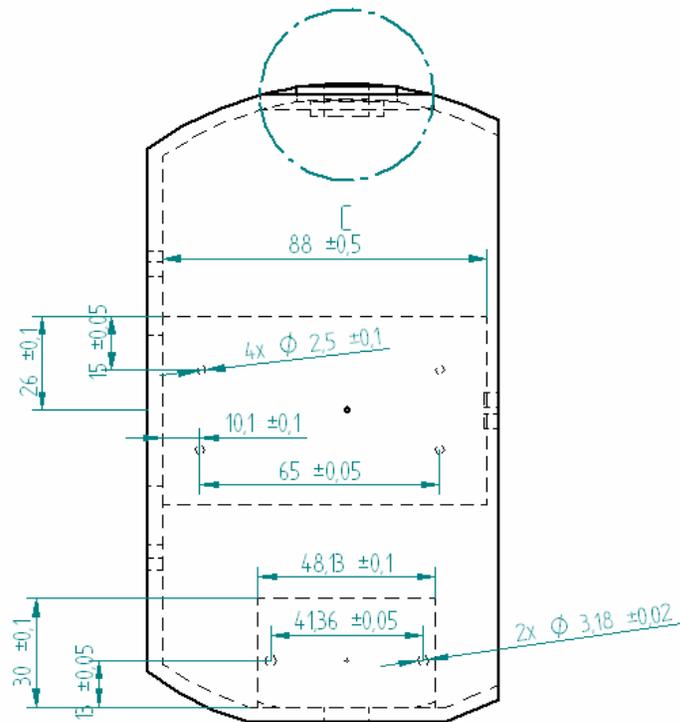


Figura 4.2.9 Dibujo dimensionado de la cara lateral derecha de la estructura

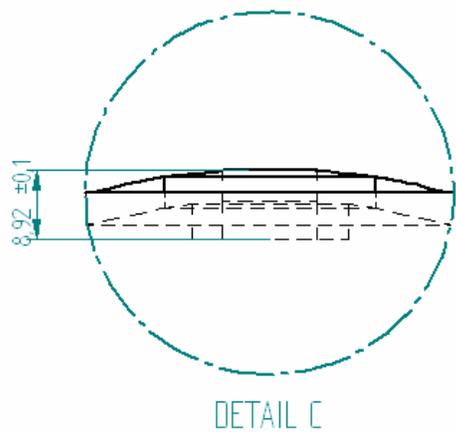


Figura 4.2.10 Detalle C de la estructura

Material: Kevlar
 Volumen: $0,000279 \text{ m}^3$
 Densidad del Kevlar: 1440 Kg/m

4.2.2 Tapa Estructura



Figura 4.2.11 Modelado de la tapa de la estructura

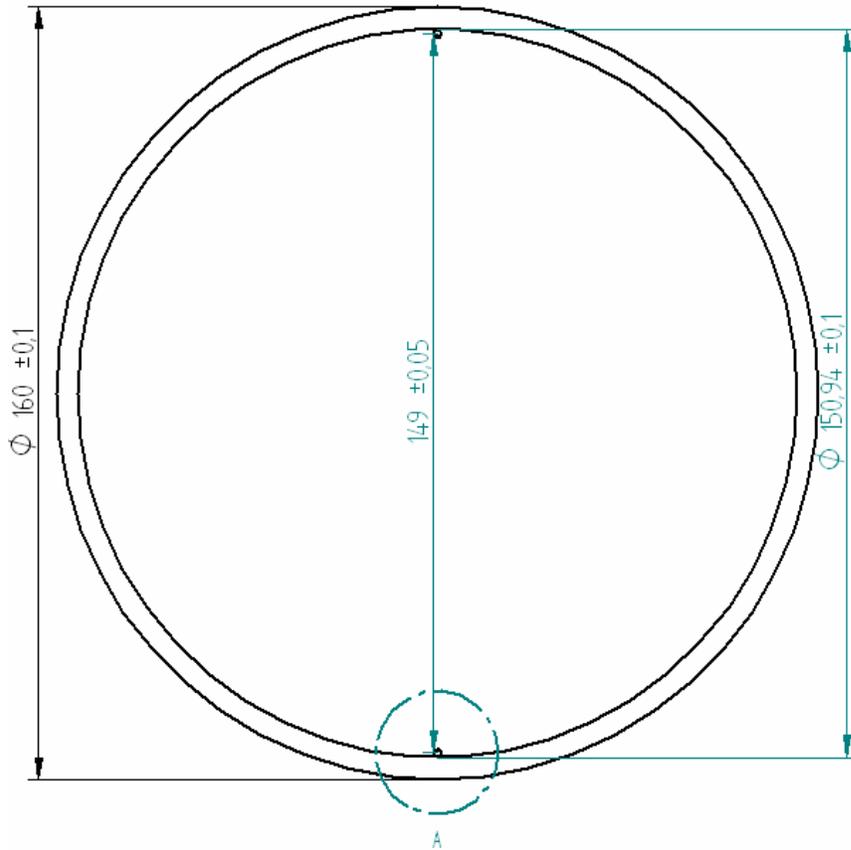


Figura 4.2.12 Dibujo dimensionado de la cara frontal de la tapa de la estructura

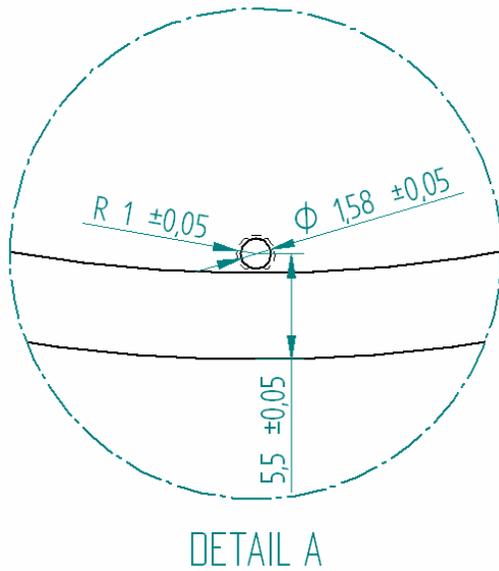


Figura 4.2.13 Detalle A de la tapa de a estructura

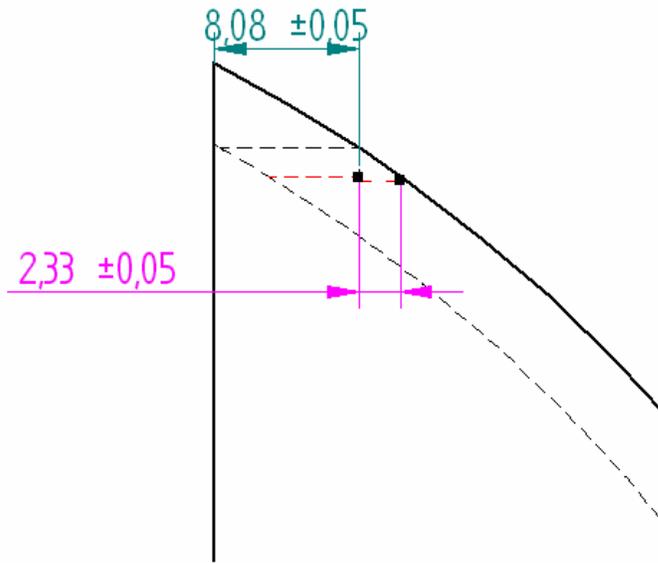


Figura 4.2.14 Dibujo dimensionado lateral de la tapa de la estructura

Material: Kevlar

Volumen: 0.00019 m^3

Densidad del Kevlar: 1440 Kg/ m

4.2.3 Diadema

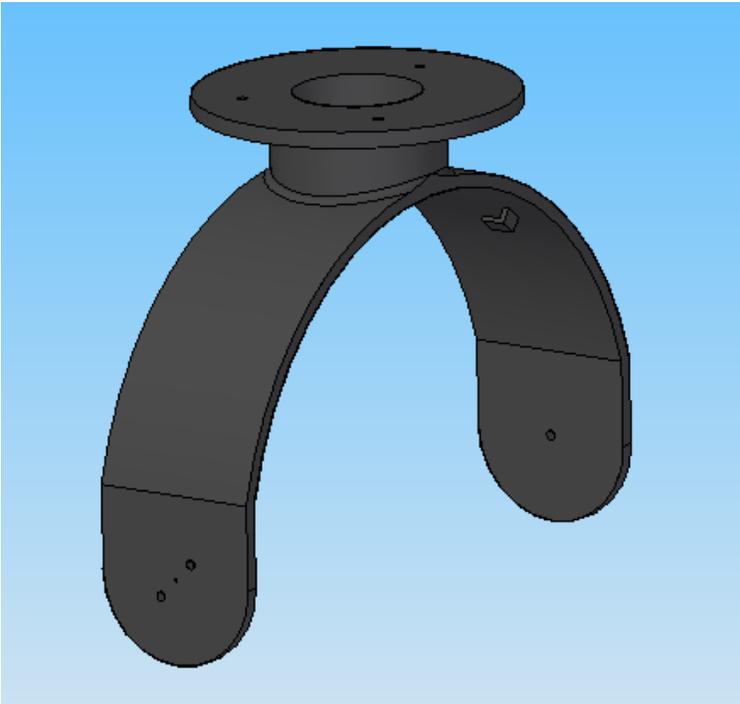


Figura 4.2.15 Vista en ángulo del modelado de la diadema

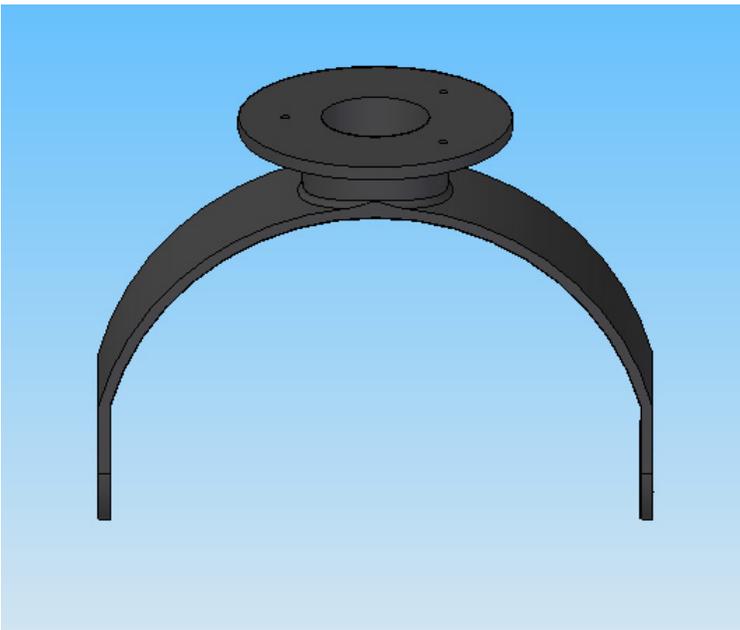


Figura 4.2.16 Vista frontal del modelado de la diadema

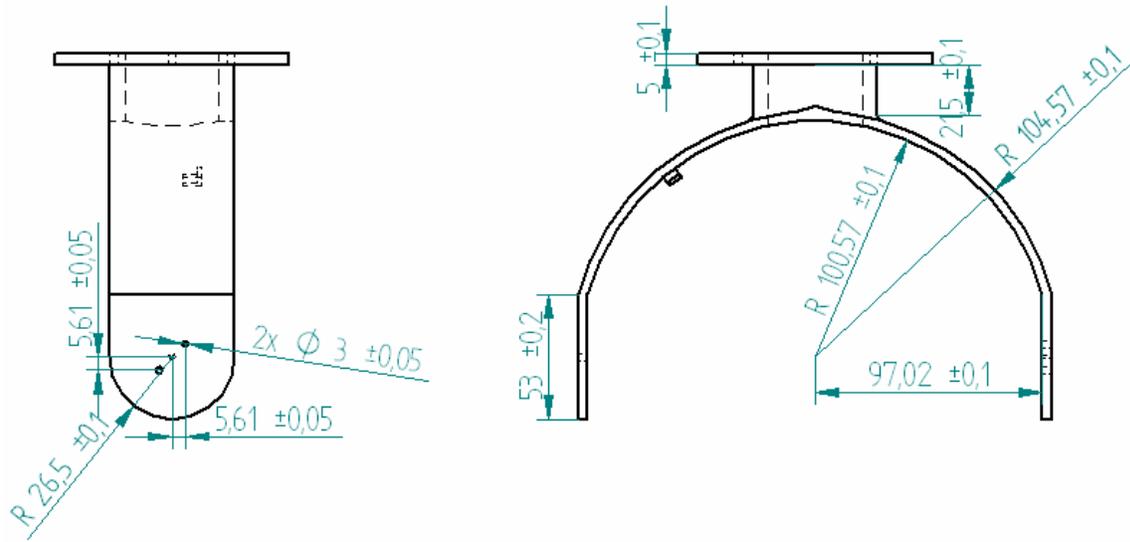


Figura 4.2.17 Dibujo dimensionado lateral y frontal de la diadema

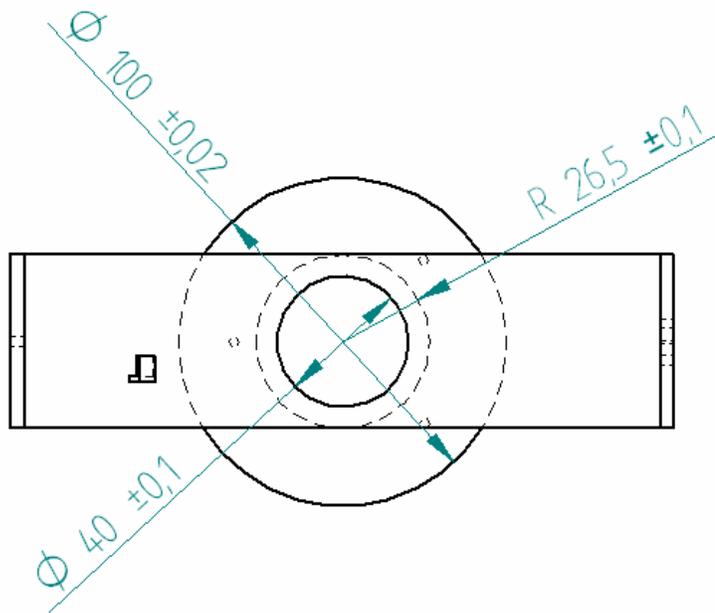


Figura 4.2.18 Dibujo dimensionado de cara superior de la diadema

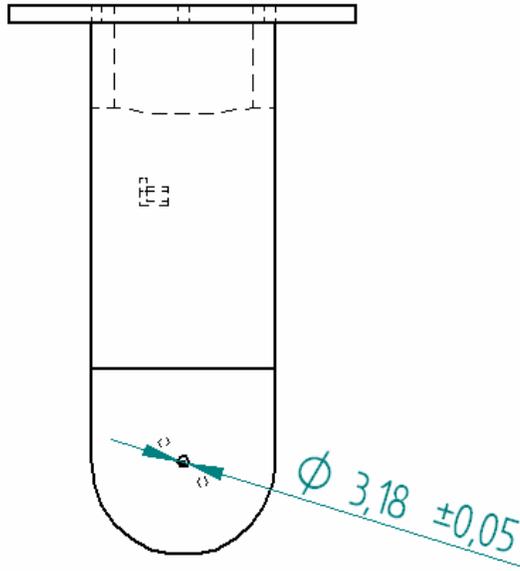


Figura 4.2.19 Dibujo dimensionado de cara lateral de la diadema

Material: Kevlar

Volumen: 0.000125 m^3

Densidad del Kevlar: 1440 Kg/ m^3

4.2.4 Sujeción módulo infrarrojo

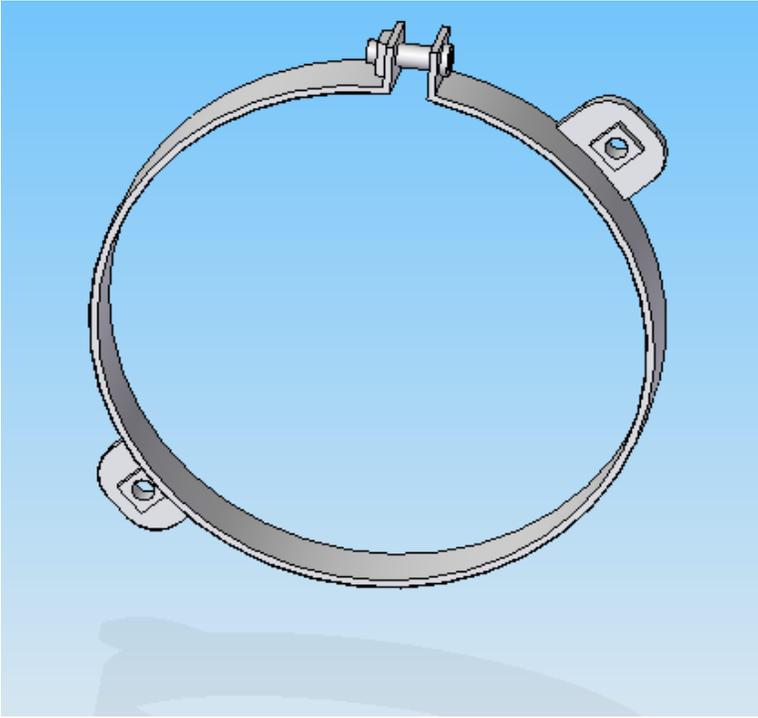


Figura 4.2.20 Modelado de la sujeción de módulo infrarrojo

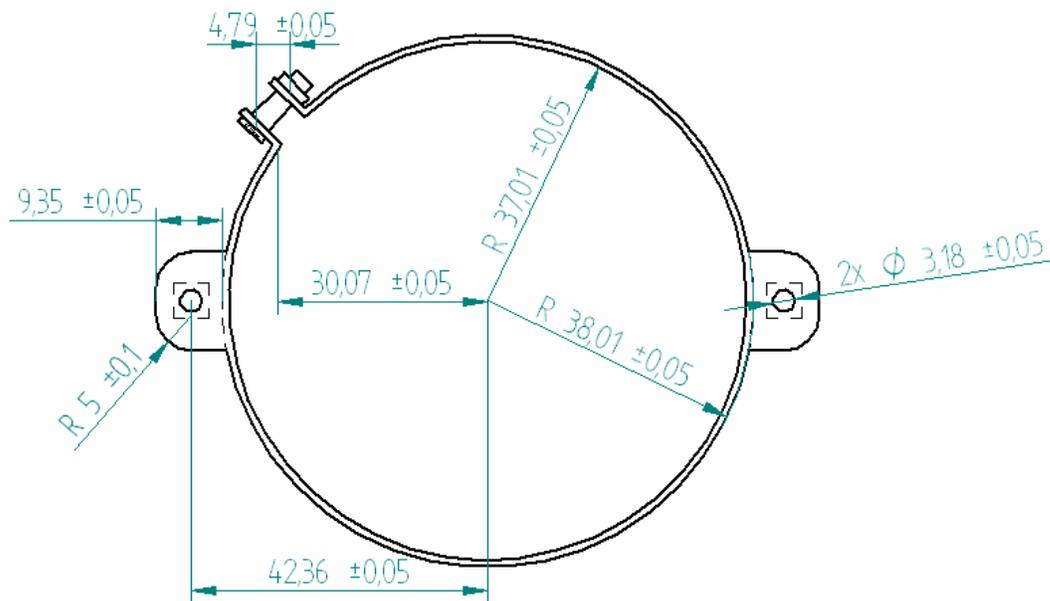


Figura 4.2.21 Dibujo dimensionado de la cara frontal de la sujeción del módulo infrarrojo

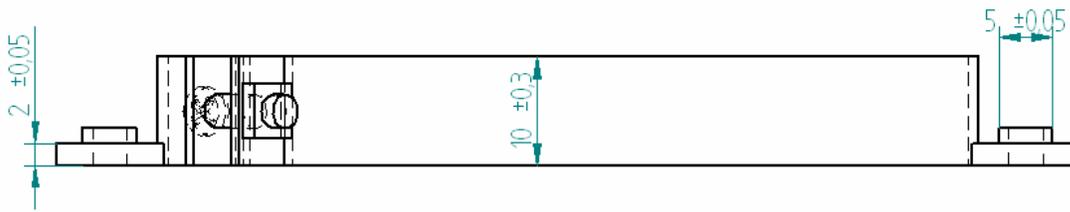


Figura 4.2.22 Dibujo dimensionado lateral de la sujeción del módulo infrarrojo

Material: Acero

Volumen: 0.00003 m³

Densidad del cold roll: 7833 Kg/ m³

4.2.5 Sujeción motor 1

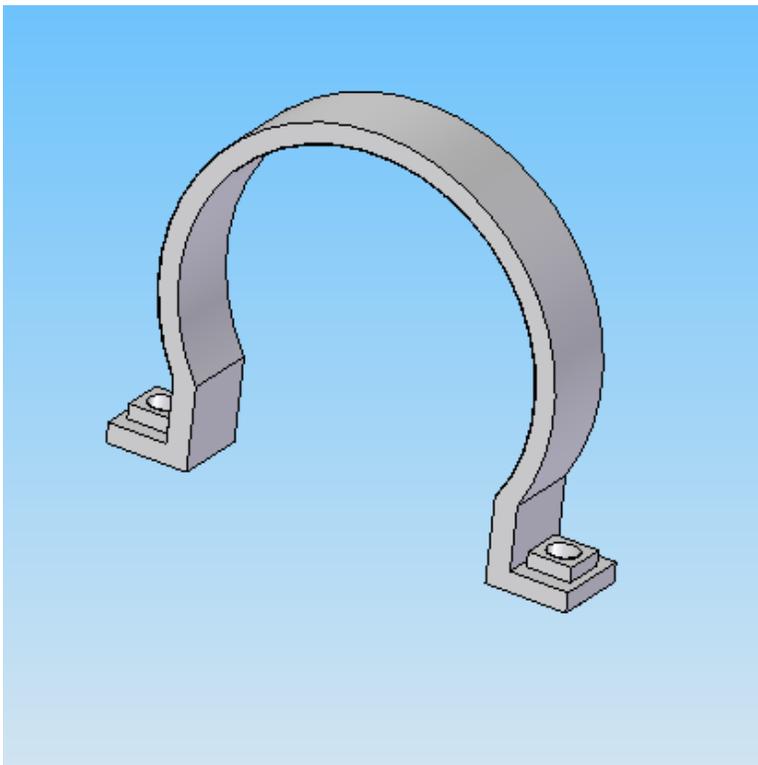


Figura 4.2.23 Modelado de la sujeción del motor 1

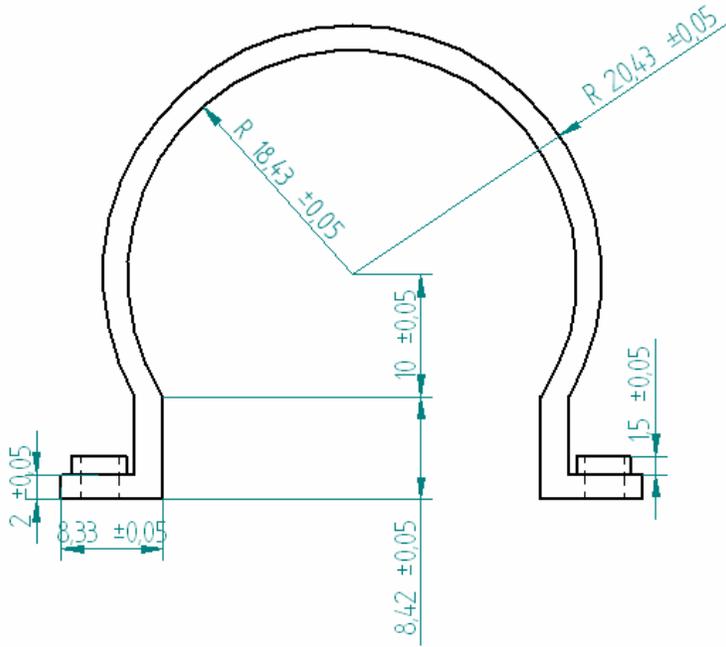


Figura 4.2.24 Dibujo dimensionado frontal de la sujeción del motor 1



Figura 4.2.25 Dibujo dimensionado superior de la sujeción del motor 1

Material: Acero

Volumen: 0.0000018 m³

Densidad del cold roll: 7833 Kg/ m³

4.2.6 Sujeción motor 2

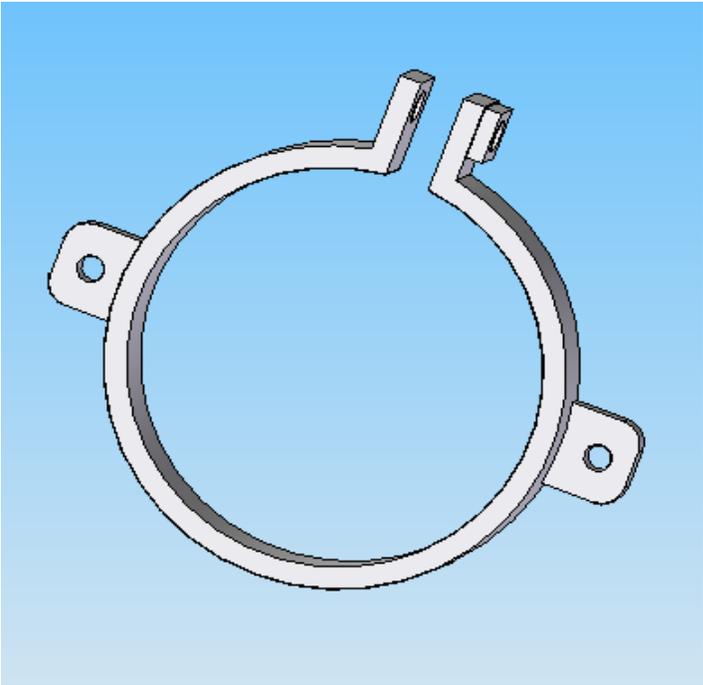


Figura 4.2.26 Modelado de la sujeción del motor 2

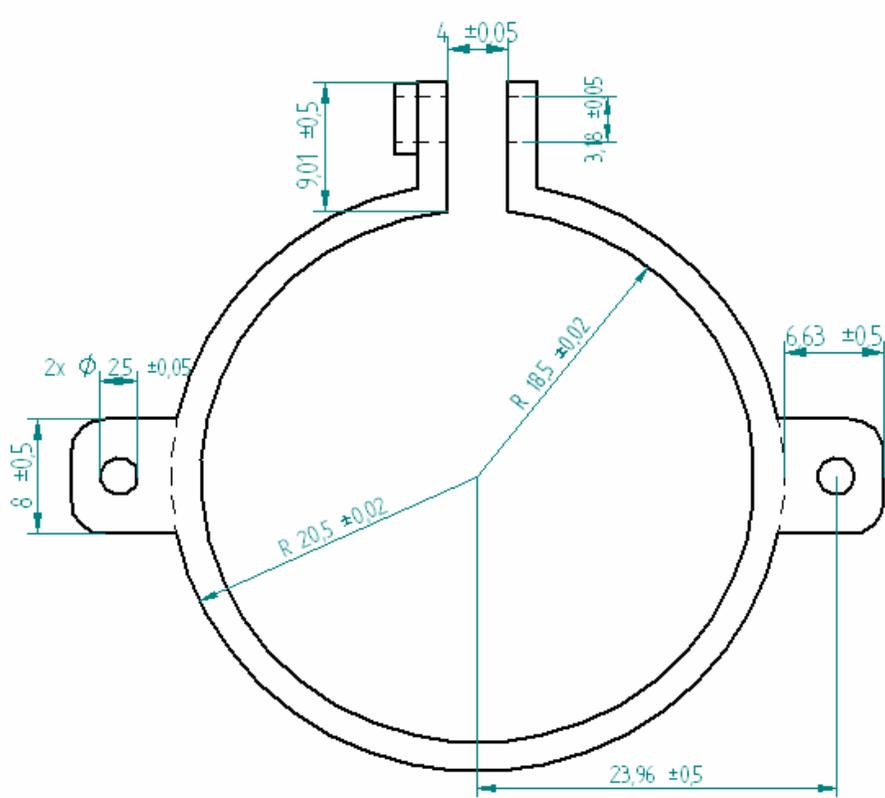


Figura 4.2.27 Dibujo dimensionado frontal de la sujeción del motor 2

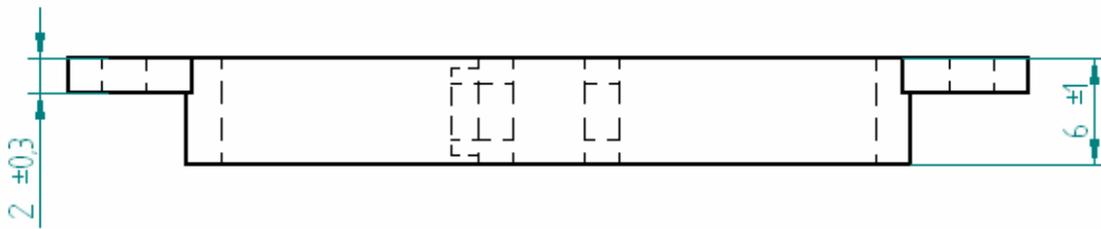


Figura 4.2.28 Dibujo dimensionado superior de la sujeción del motor 2

Material: Acero

Volumen: 0.000001733 m³

Densidad del cold roll: 7833 Kg/ m³

4.2.7 Rodamientos

Debido a que todos los rodamientos están fabricados de Teflón, se pondrá la densidad del material hasta presentar la última imagen de los rodamientos, por lo que solamente se indicará el volumen de cada rodamiento después de la imagen de su modelado.

4.2.7.1 Rodamiento en elevación 1

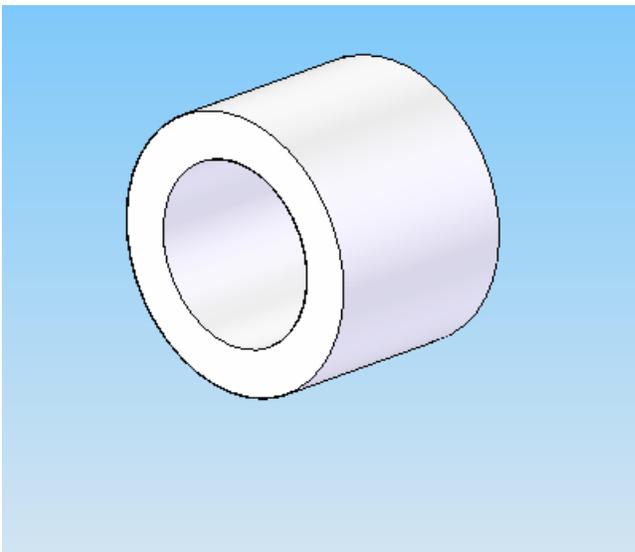


Figura 4.2.29 Modelado del rodamiento en elevación 1

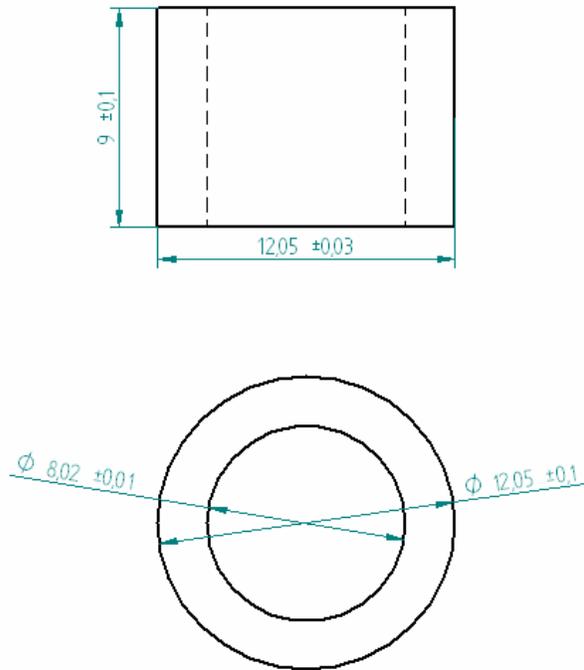


Figura 4.2.30 Dibujo dimensionado del rodamiento en elevación 1

Volumen: 0.0000006 m³

4.2.7.2 Rodamiento en elevación 2

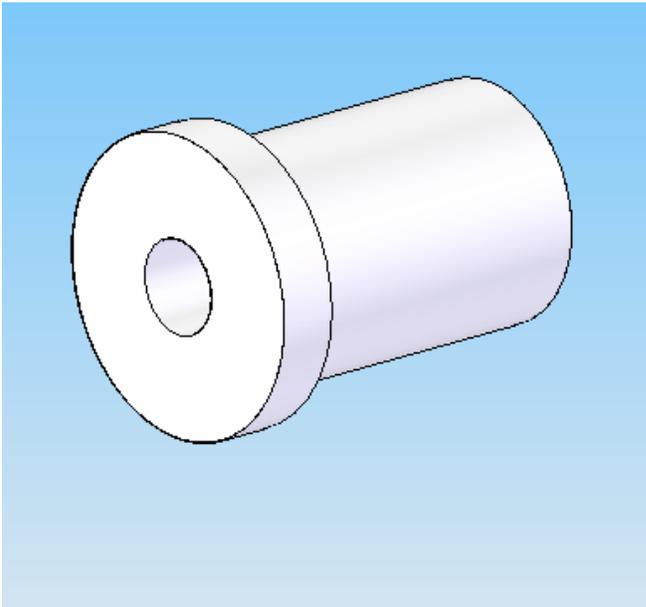


Figura 4.2.31 Modelado del rodamiento en elevación 2

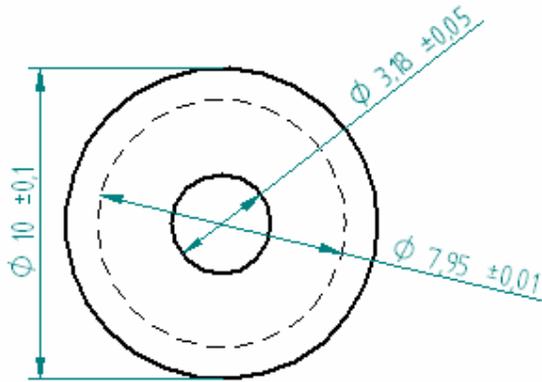
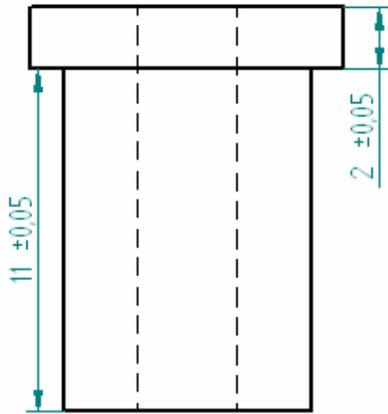


Figura 4.2.32 Dibujo dimensionado del rodamiento en elevación 2

Volumen: 0.0000047 m^3

4.2.7.3 Rodamiento en azimuth 1

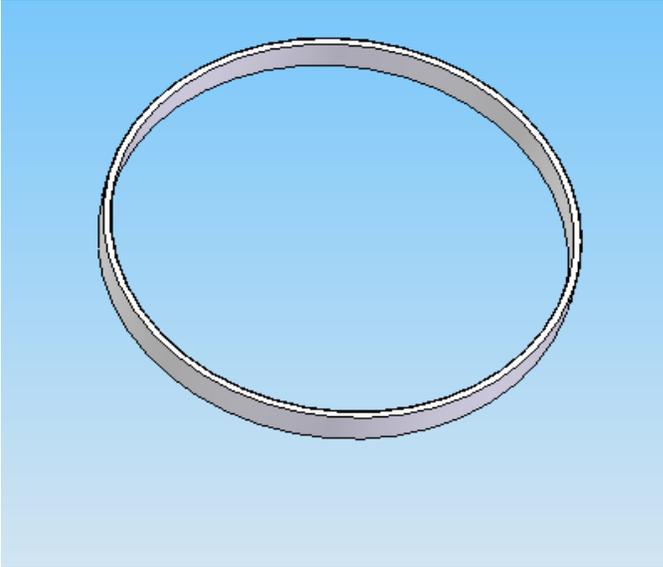


Figura 4.2.33 Modelado del rodamiento en azimuth 1

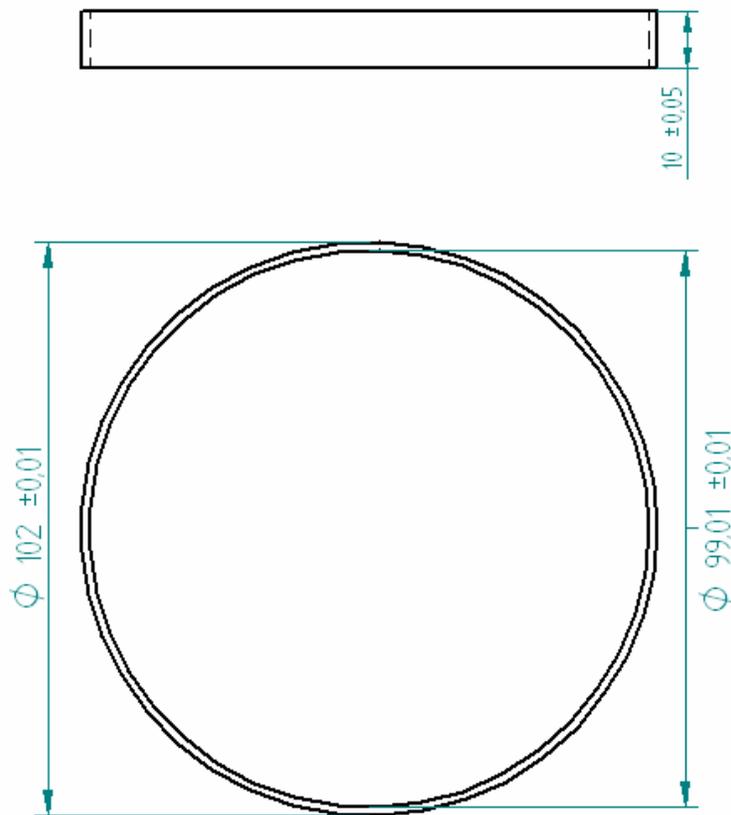


Figura 4.2.34 Dibujo dimensionado del rodamiento en azimuth 1

Volumen: 0.000025 m^3

4.2.7.4 Rodamiento en azimuth 2

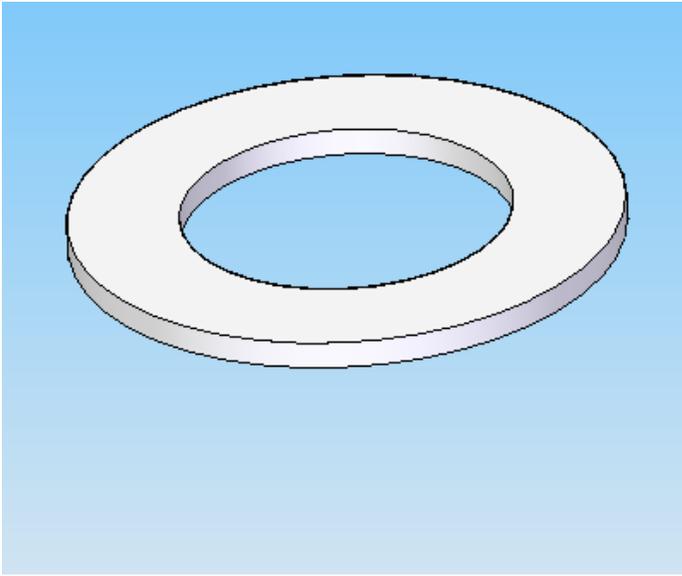


Figura 4.2.35 Modelado del rodamiento en azimuth 2

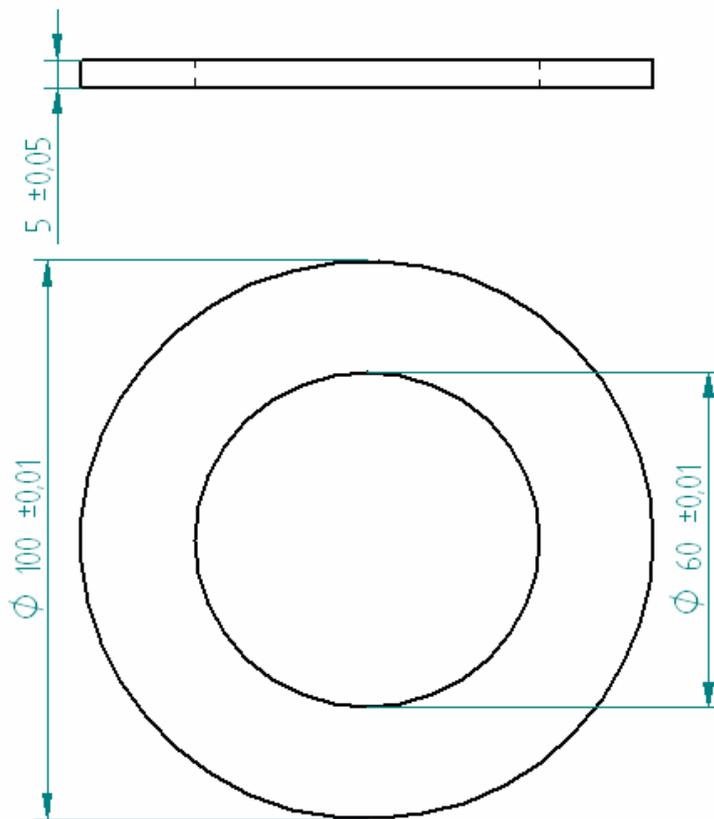


Figura 4.2.36 Dibujo dimensionado del rodamiento en azimuth 1

Volumen: 0.0000047 m^3

4.2.7.5 Rodamiento en azimuth 3

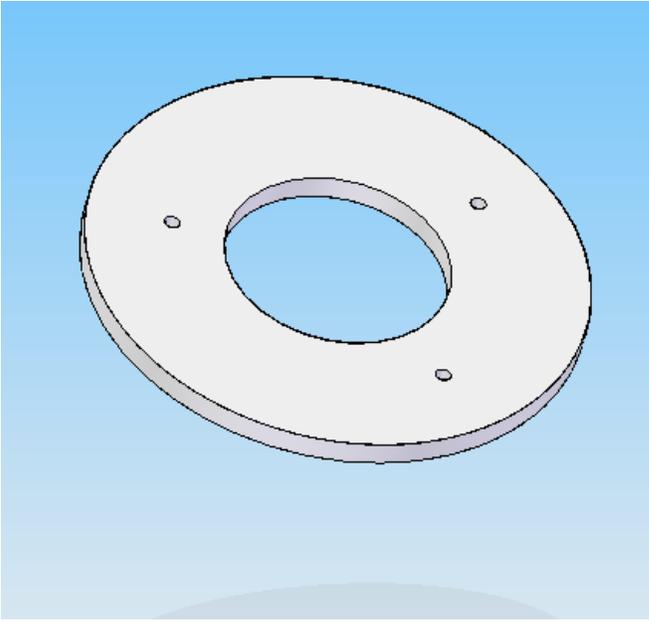


Figura 4.2.37 Modelado del rodamiento en azimuth 2

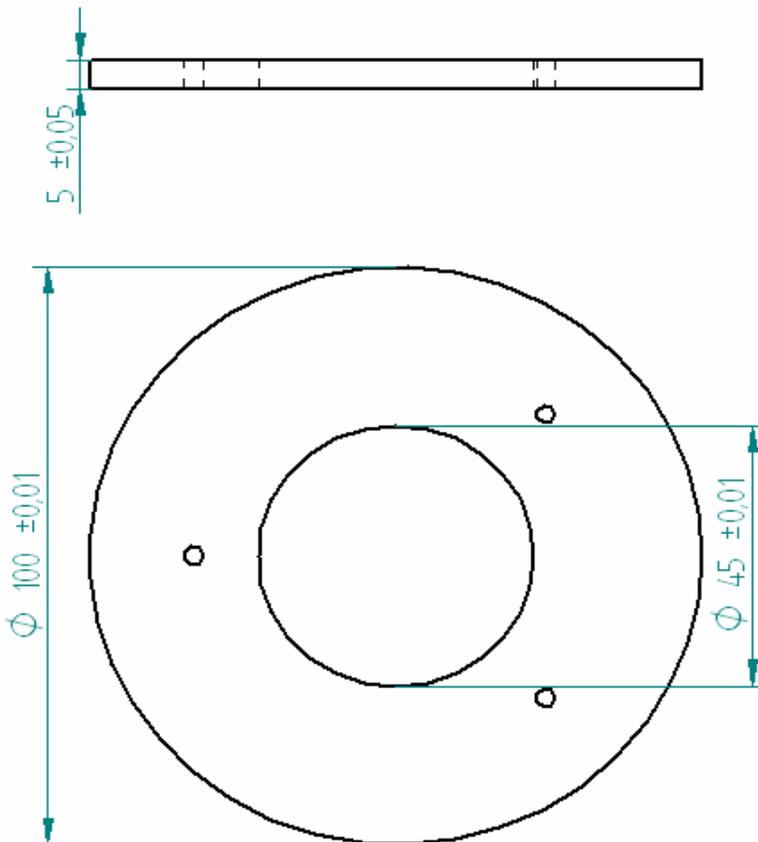


Figura 4.2.38 Dibujo dimensionado del rodamiento en azimuth 1

Volumen: 0.000031 m^3

Densidad del Teflón: 2150 Kg/ m^3

4.2.8 Engrane y piñón

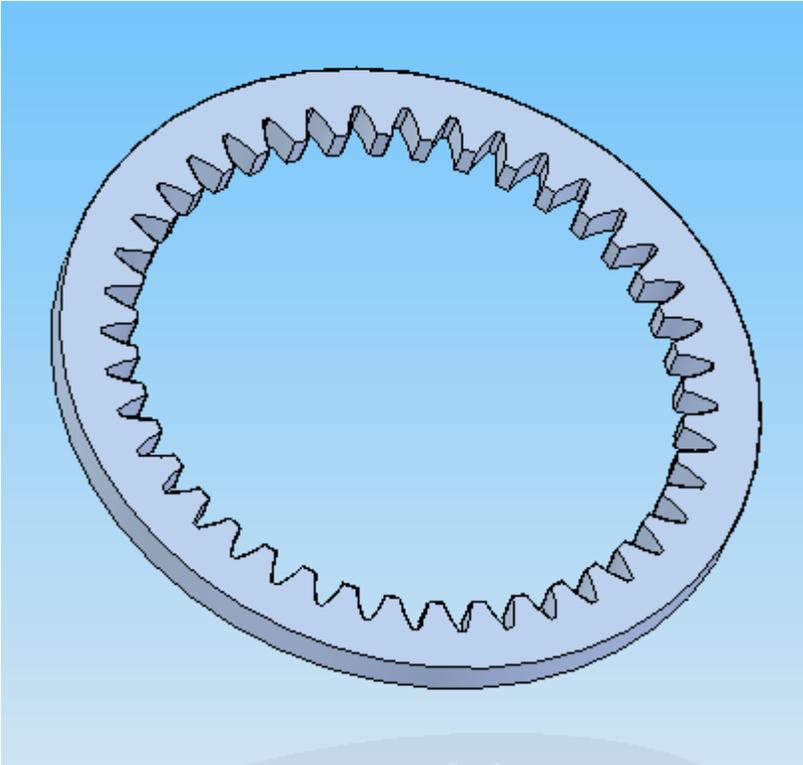
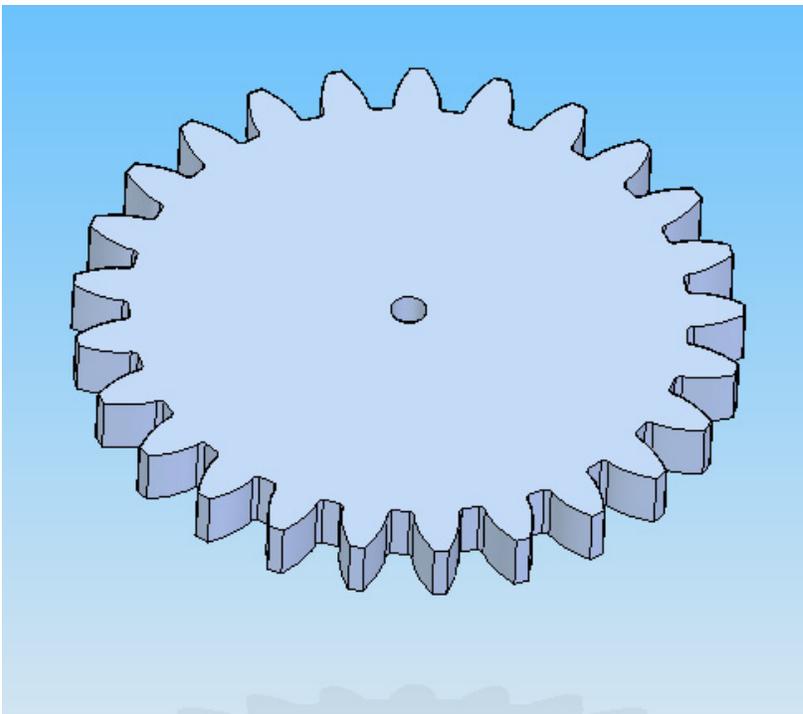


Figura 4.2.39 Modelado del engrane que da el movimiento en azimut



4.2.40 Modelado del piñón que da el movimiento en azimut

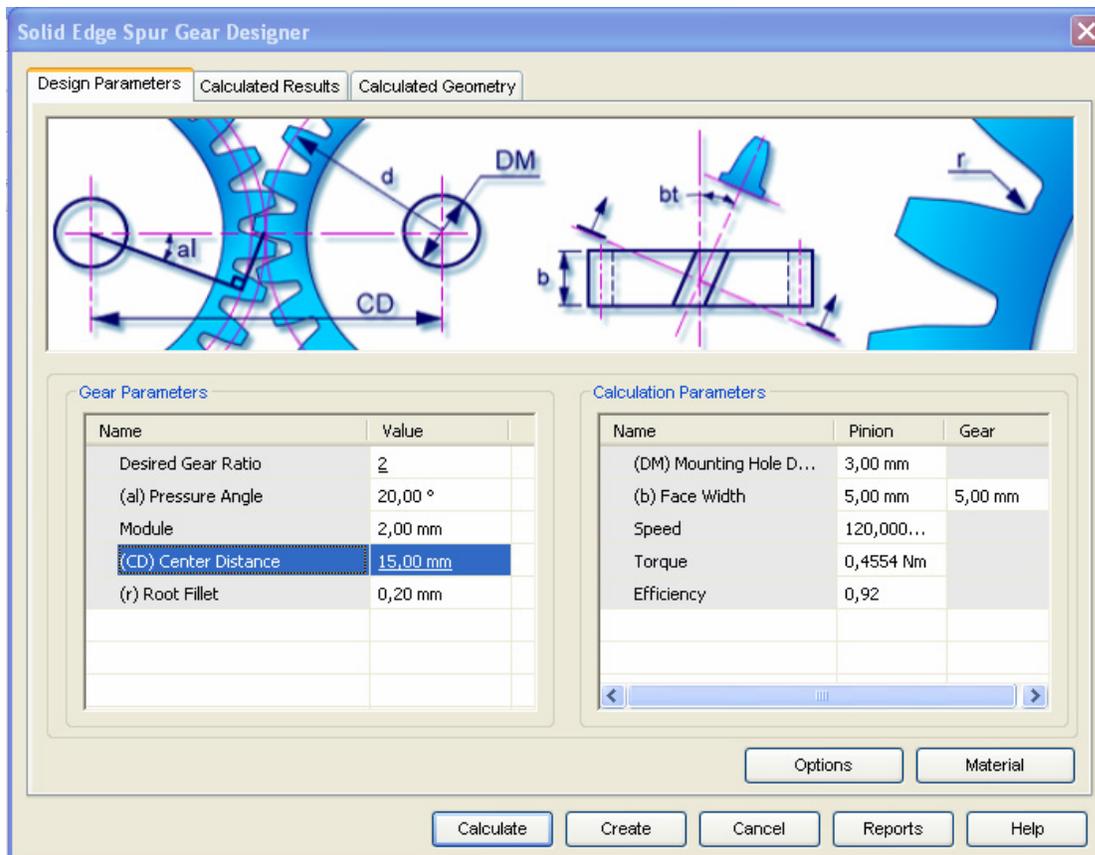


Figura 4.2.41 Tabla de resultados del módulo de diseño de engranes de Solid Edge 1

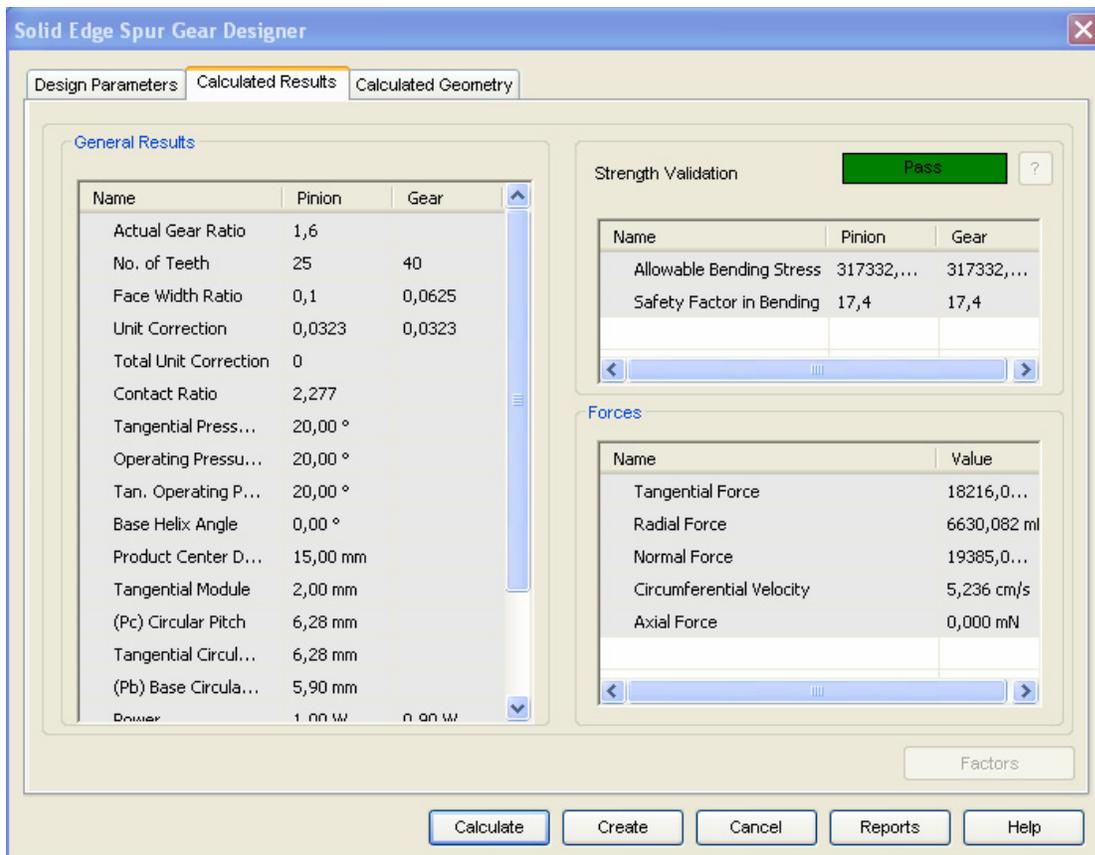


Figura 4.2.42 Tabla de resultados del módulo de diseño de engranes de Solid Edge 2

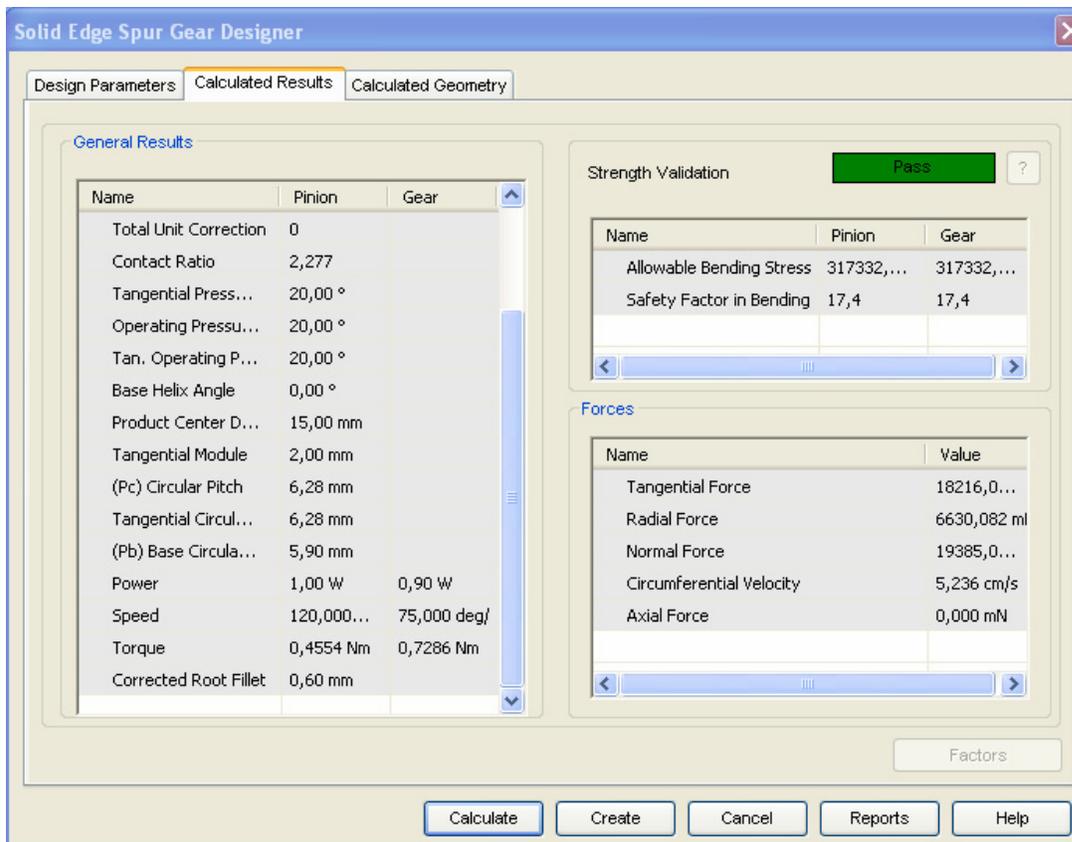


Figura 4.2.43 Tabla de resultados del módulo de diseño de engranes de Solid Edge 3

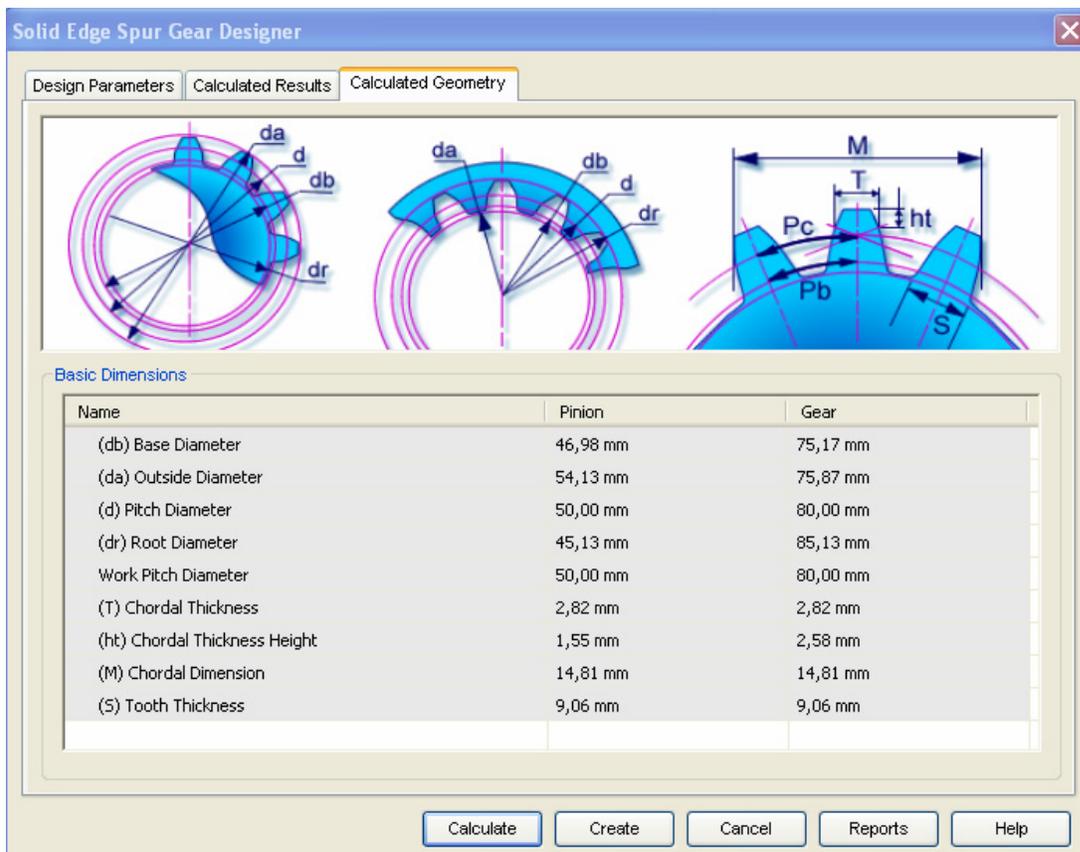


Figura 4.2.44 Tabla de resultados del módulo de diseño de engranes de Solid Edge 4

Material: Zytel 450 (Nylon)

Volumen Engrane: 0.0000124 m^3

Volumen Piñon: 0.0000106 m^3

Densidad del polietileno: 1080 Kg/ m^3

4.2.9 Espacio de acoplamiento en góndola

Este espacio fue diseñado dentro del interior de la góndola, una vez teniendo el diseño de ésta, desarrollado por el equipo del Instituto.

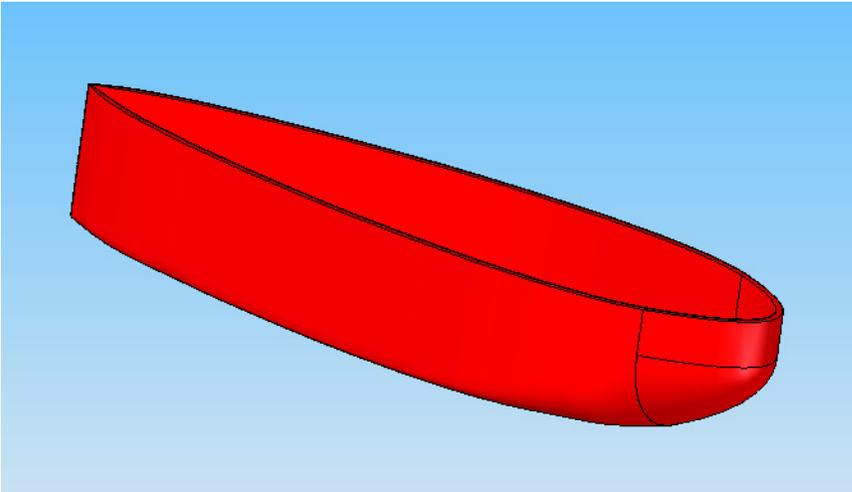


Figura 4.2.45 Modelado de la góndola del dirigible

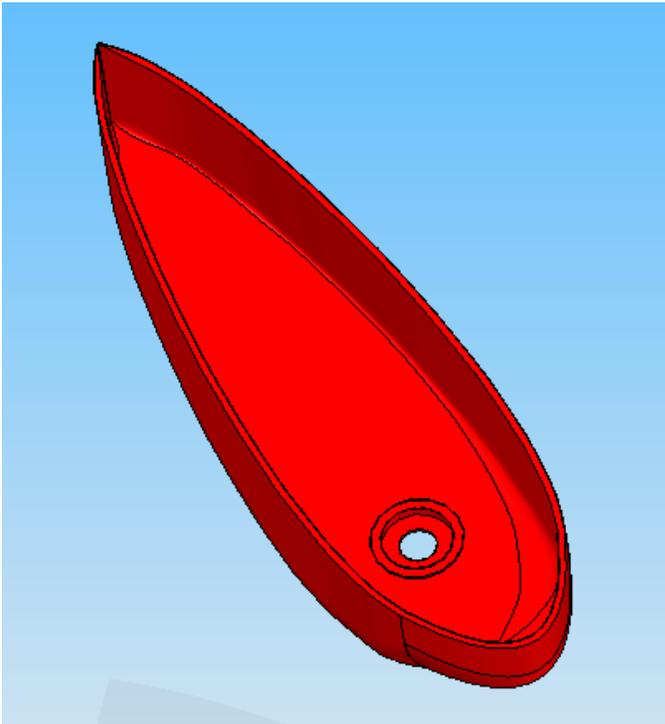


Figura 4.2.46 Vista del espacio diseñado para el SVVIVAA dentro de la góndola del dirigible

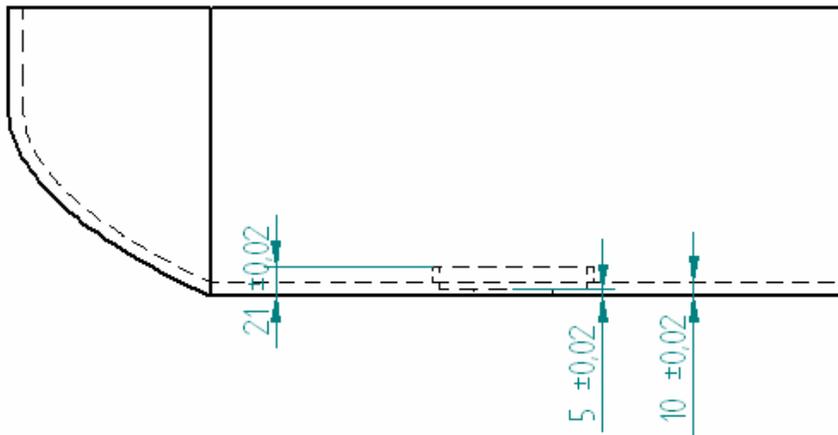


Figura 4.2.47 Dibujo dimensionado de la cara lateral de la góndola del dirigible

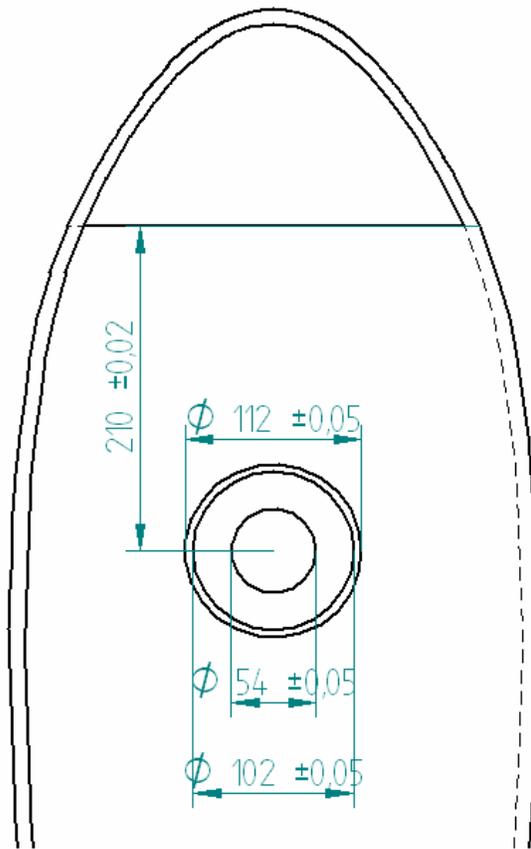


Figura 4.2.48 Dibujo dimensionado de la cara superior de la góndola del dirigible

4.2.10 Tapa góndola

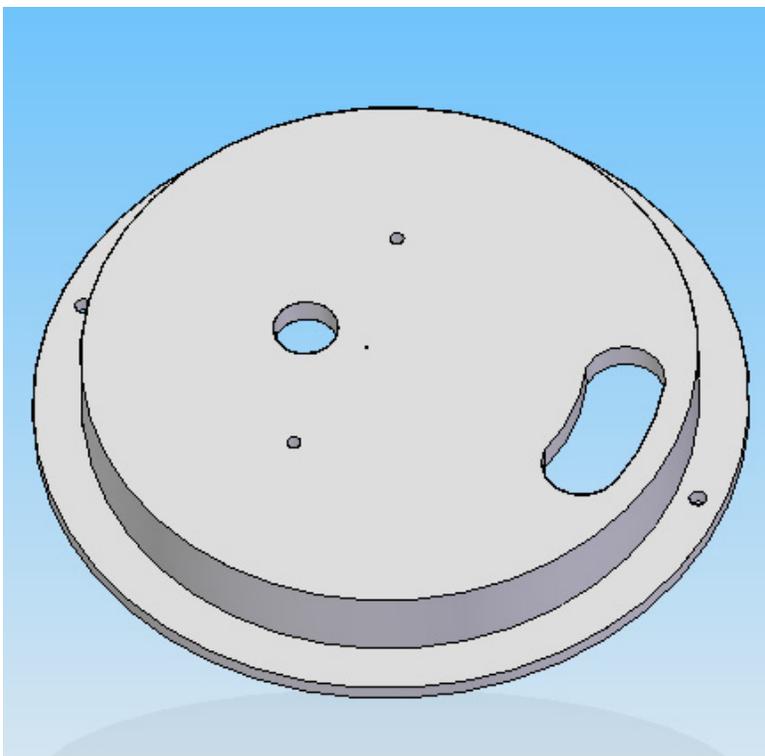


Figura 4.2.49 Modelado de la tapa de la góndola

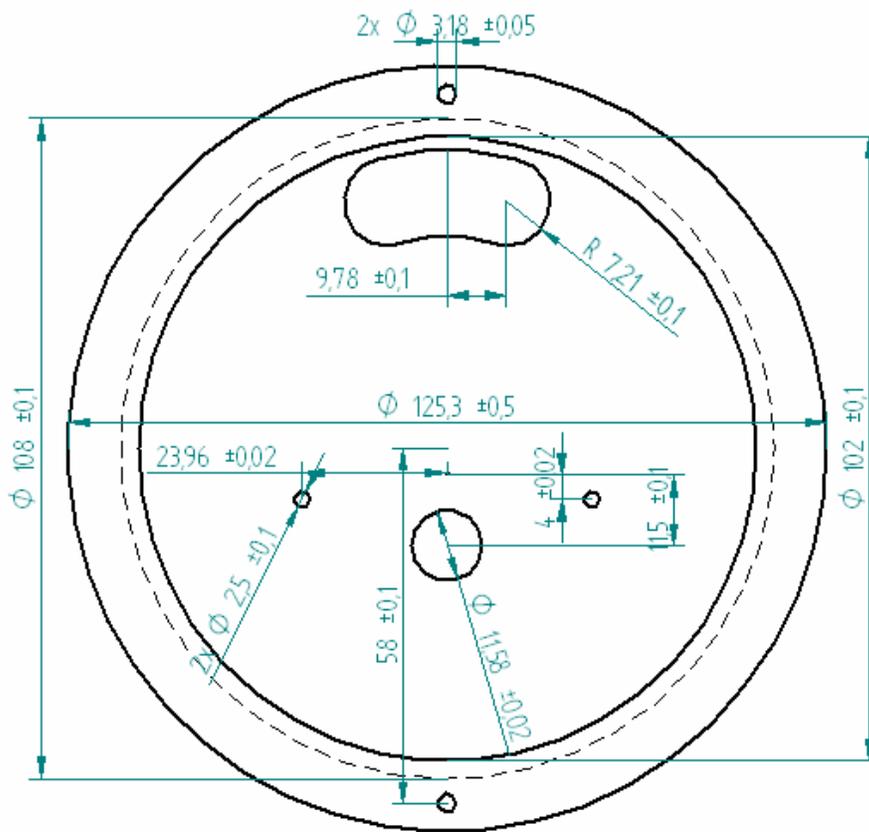


Figura 4.2.50 Dibujo dimensionado superior de la tapa de la góndola

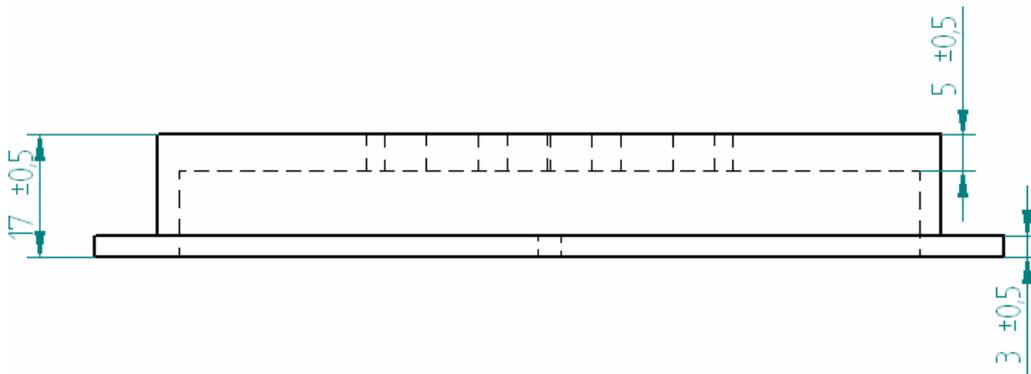


Figura 4.2.51 Dibujo dimensionado lateral de la tapa de la góndola

Material: Kevlar

Volumen: $0,0000643 \text{ m}^3$

Densidad del Kevlar: 1440 Kg/ m^3

4.3 Ensamble del sistema

Conociendo todos los componentes que conforman el SVVIVAA, se mostrará paso a paso como deberá ser el ensamble.

4.3.1 Estructura-Motor 1



Figura 4.3.1 Ensamble del motor 1 con la estructura a través de la sujeción de este

El motor se ensambla a la estructura del sistema, a través de la sujeción ya presentada y dos tornillos, como se puede ver en la figura. El motor ajusta con el orificio de la estructura, dejando al eje por fuera de esta.

El movimiento de elevación, se produce al estar el motor fijo dentro de la estructura, y fijando el eje a la diadema, como se verá más adelante.

4.3.2 Estructura-rodamiento en elevación 1

El rodamiento en elevación 1, tiene tolerancia de apriete con el orificio de la estructura, pero además lleva un pegamento en esta unión, para evitar que haya movimiento.

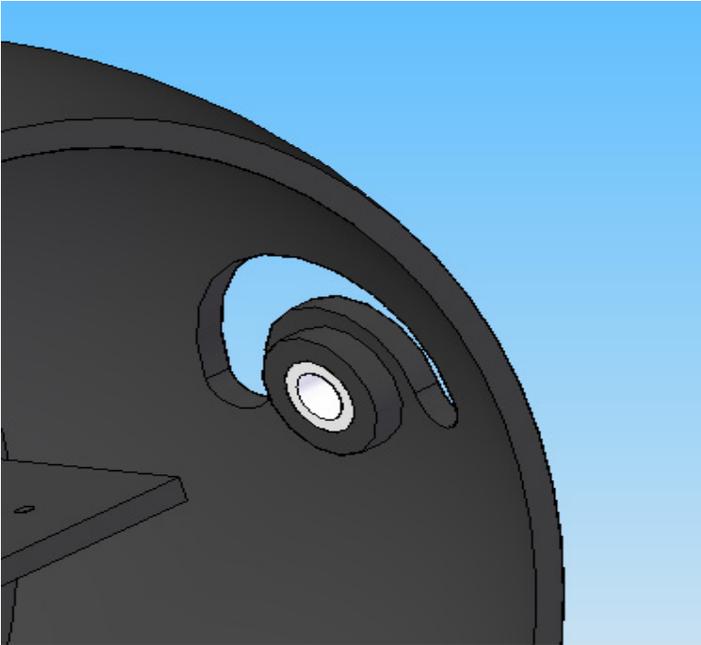


Figura 4.3.2 Rodamiento en elevación 1 pegado a la estructura del sistema

4.3.3 Estructura-potenciómetro

El potenciómetro, que tiene la función de medir los grados de movimiento en elevación, va unido a la cara del rodamiento en elevación 1 y la estructura con un adhesivo. El eje quedará dentro del rodamiento en elevación 2.

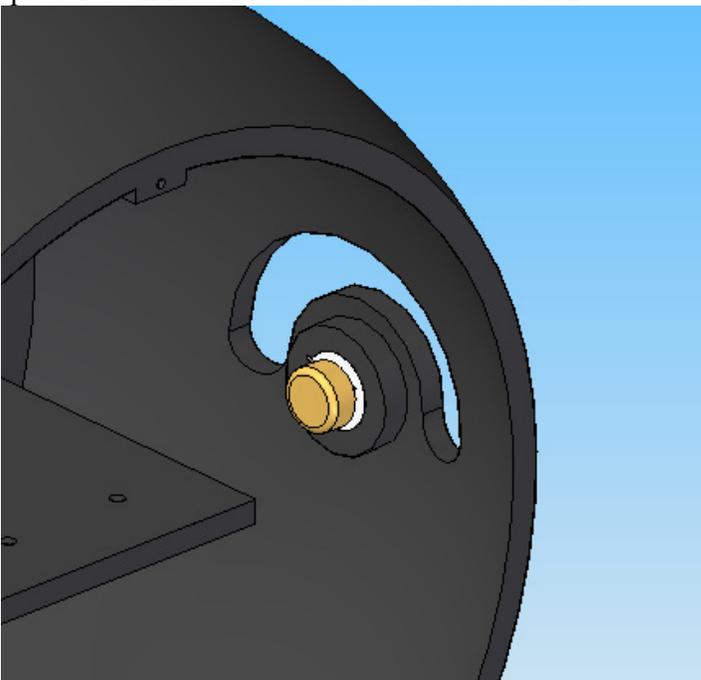


Figura 4.3.3 Potenciómetro eléctrico pegado al rodamiento en elevación 1

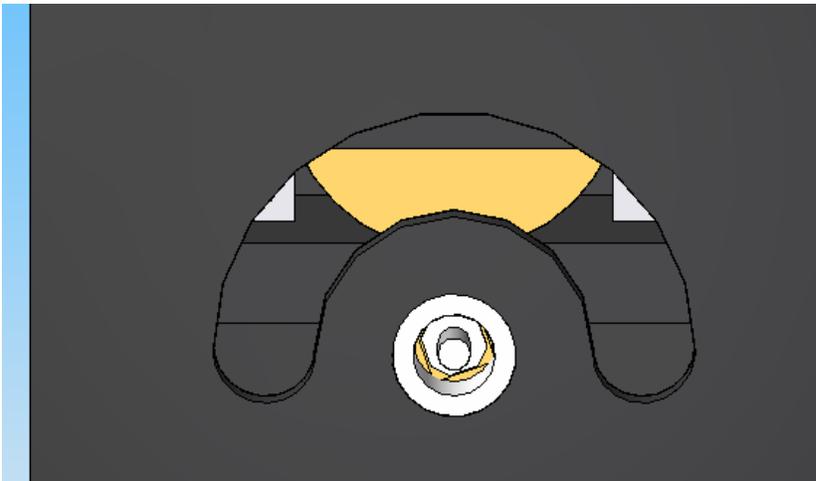


Figura 4.3.4 Vista frontal del rodamiento en elevación 1 y la perilla del potenciómetro

4.3.4 Sujeción módulo visible-módulo visible

La sujeción del módulo visible es una corredera, debido a que los botones que controlan las funciones del módulo HD están a un costado, por lo que la cámara tiene que tener un movimiento hacia fuera del módulo.

El módulo se ensambla con la sujeción, mediante dos remaches, por lo que el módulo visible siempre estará unido a la sujeción.

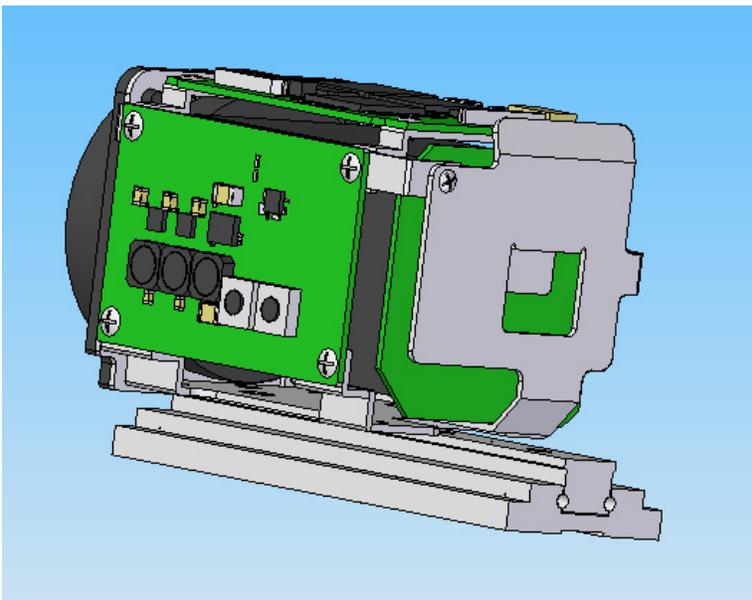


Figura 4.3.5 Módulo visible acoplado a la corredera que le da soporte

4.3.5 Estructura-módulo visible con sujeción

La corredera cuenta con orificios para ser acoplada a través de tornillos de 3.5 mm de diámetro. En los planos de la estructura se pueden observar las perforaciones en la parte donde se acopla la sujeción.

El orificio de la estructura donde entra el lente del módulo, tiene tolerancia de ajuste, para evitar el movimiento hacia atrás durante el vuelo.

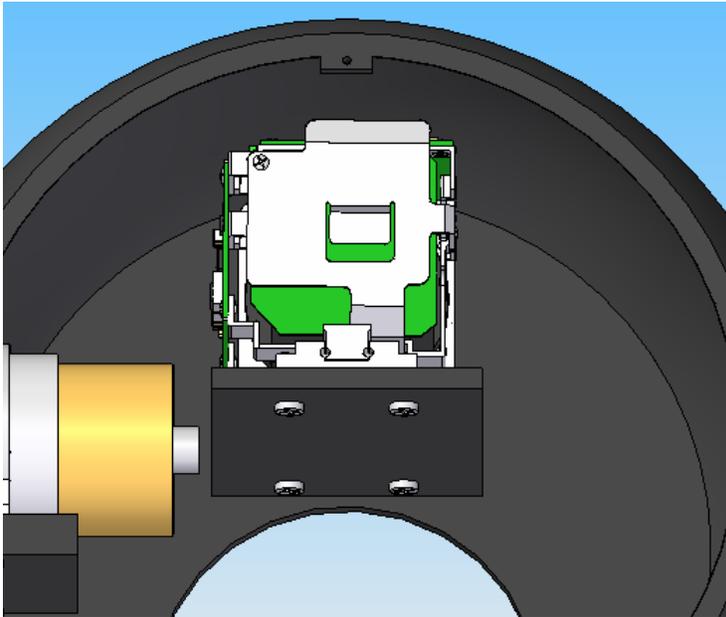


Figura 4.3.6 Módulo y corredera acoplados a la estructura del SVVIVAA

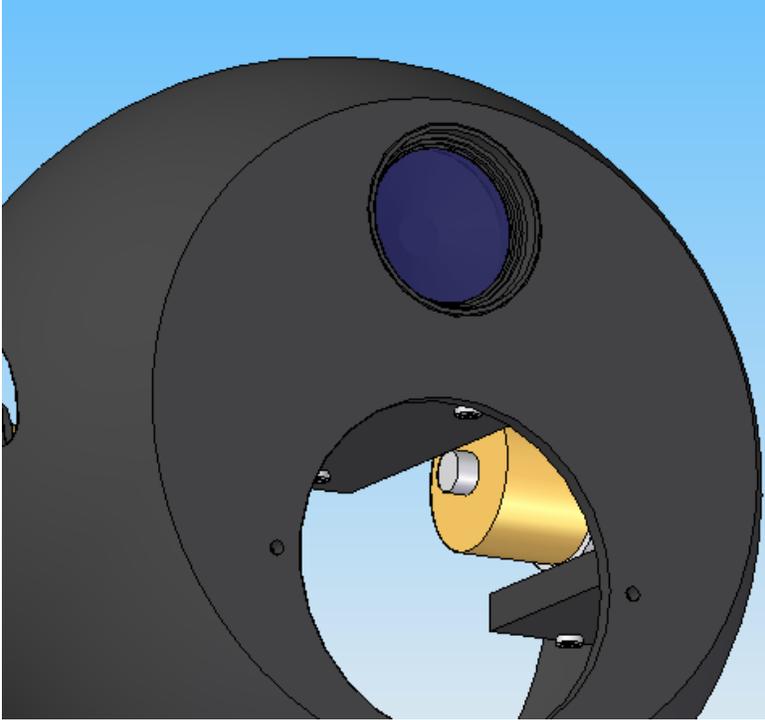


Figura 4.3.7 Vista mostrando el lente del módulo visible con el orificio de la estructura

La figura 4.3.8 muestra al módulo visible con la corredera desplegada hacia atrás

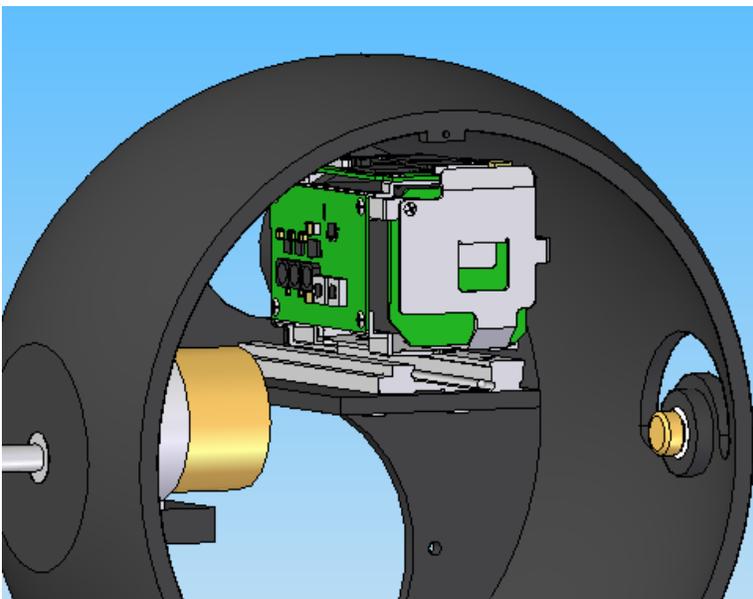


Figura 4.3.8 Módulo recorrido hacia atrás

4.3.6 Módulo IR-sujeción IR

La sujeción del módulo infrarrojo, cuenta con un tornillo de apriete, sin embargo, el apriete debe ser el necesario para sujetar bien al módulo, pues si se tiene un apriete mayor, podría dañar el lente.

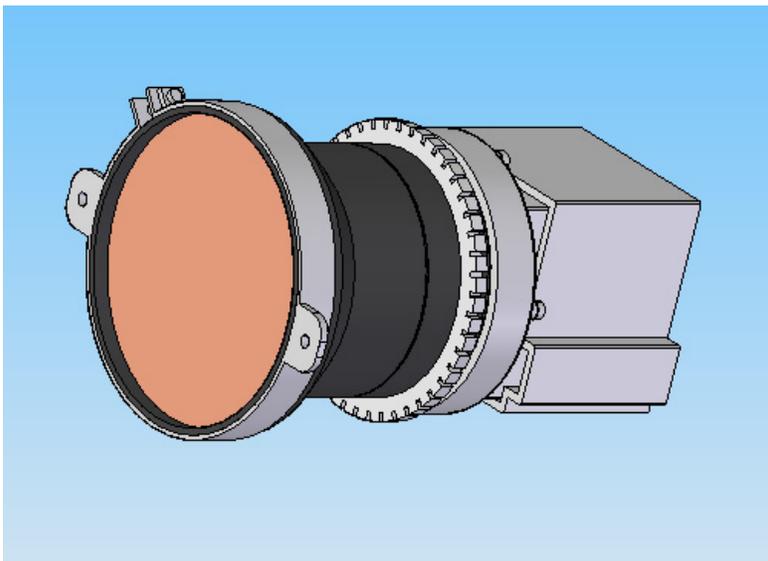


Figura 4.3.9 Sujeción acoplada al lente del módulo infrarrojo

4.3.7 Estructura-módulo IR con sujeción

Dos tornillos de 2.5 mm, ensamblan la sujeción con la cara frontal de la estructura.

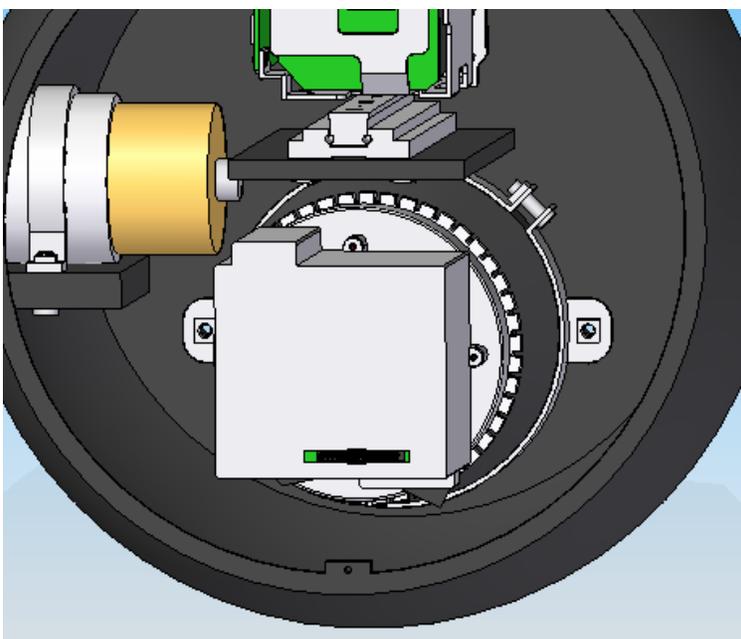


Figura 4.3.10 Ensamblaje del módulo infrarrojo con la estructura

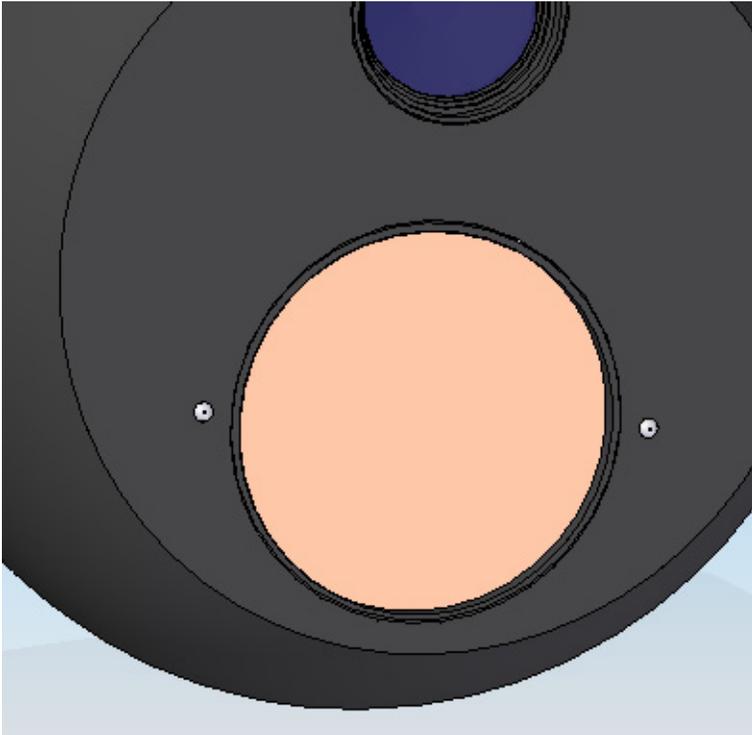


Figura 4.3.11 Vista frontal mostrando los tornillos que sujetan el módulo infrarrojo

4.3.8 Estructura-tapa posterior

Teniendo todos los componentes interiores de la estructura, debe colocarse la tapa posterior. Esta tapa es desprendible para el posible acceso a los componentes interiores y va sujeta con dos tornillos.

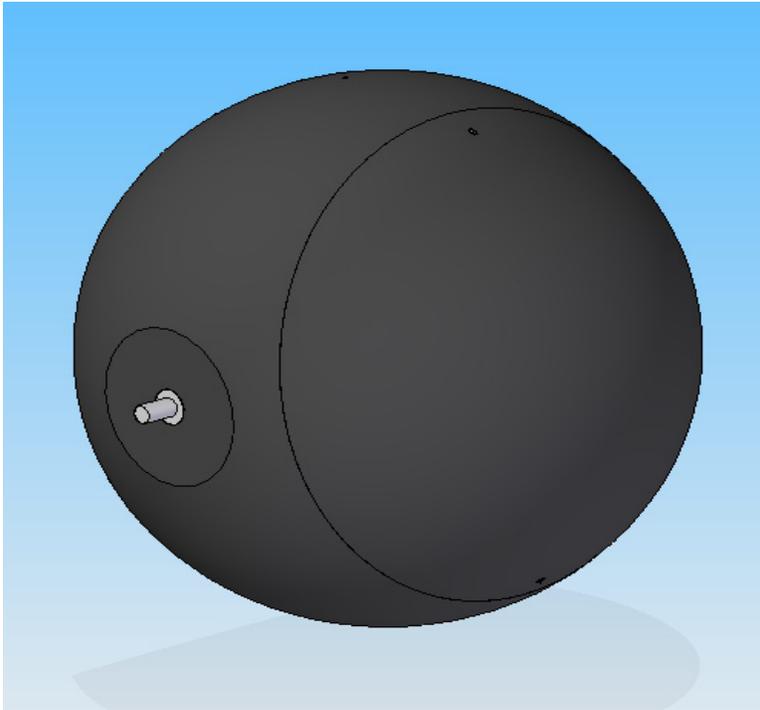


Figura 4.3.12 Vista trasera de la estructura con la tapa

4.3.9 Diadema-rodamiento en azimut 3

Un rodamiento con el que es posible el movimiento en azimut, va pegado al cuello de la diadema con pegmento. Esto debe realizarse durante la manufactura de esta última, como puede verse en la imagen. Los planos de estos dos componentes muestran tres barrenos, en caso de se quiera unir estas dos piezas con tornillos.

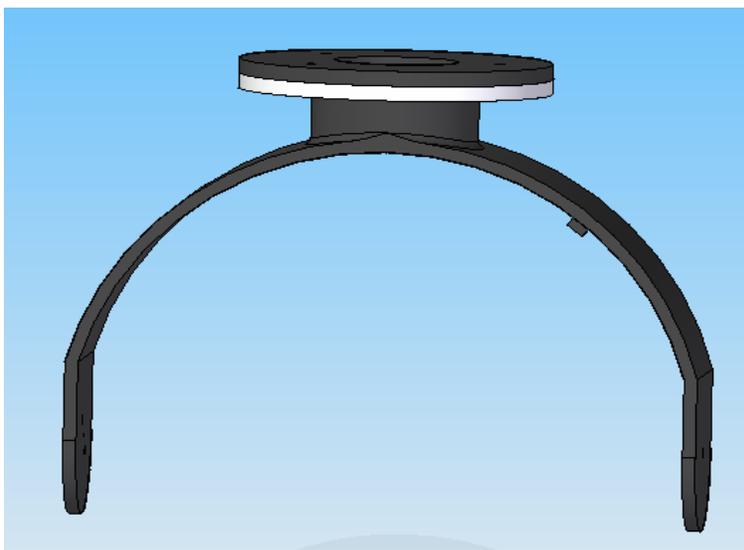


Figura 4.3.13 Diadema con rodamiento en azimut 3 pegado a ella

4.3.10 Diadema-sujeción del eje motor 1

Esta sujeción va unida a la diadema del sistema con dos remaches. Al estar fijo el eje del motor a la diadema, la cual está fija en el movimiento en elevación con la góndola del dirigible, como se verá más adelante, el único grado de movimiento en elevación lo tiene la estructura que contiene a las cámaras.

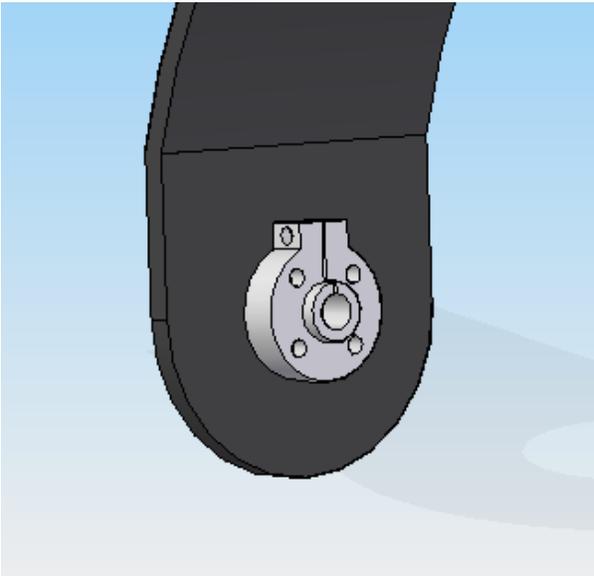


Figura 4.3.14 Sujeción del eje del motor 1 atornillado al brazo de la diadema

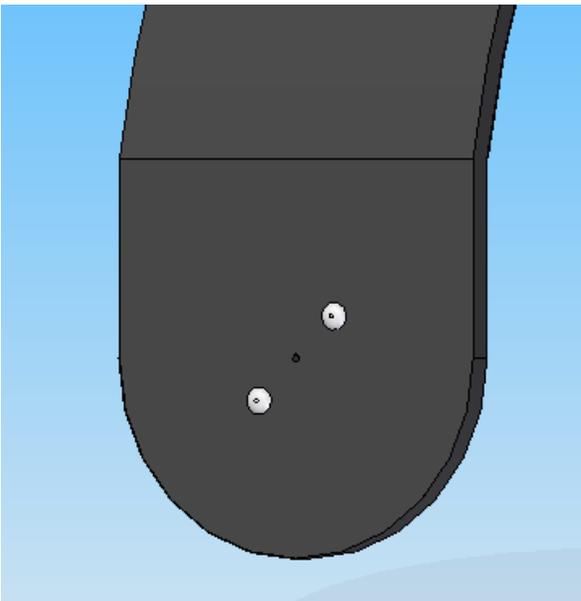


Figura 4.3.15 Vista de los tornillos que soportan a la sujeción

4.3.11 Diadema-rodamiento en elevación 2

El movimiento en elevación de la estructura, mencionado en el inciso anterior, es posible al sistema de rodamientos constituido por el rodamiento en elevación 1, que se encuentra pegado a la estructura, y el movimiento en elevación 2, presentado a continuación. Este último rodamiento va unido a la diadema a través de un tornillo de 3.5 mm que lo une a está.

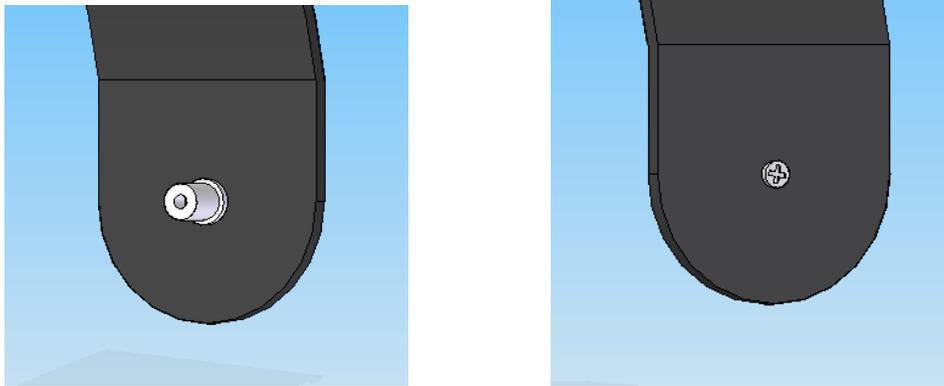


Figura 4.3.16 Rodamiento en elevación 2 sujeto a la diadema

4.3.12 Góndola-rodamiento en azimut 1

Una parte del sistema de rodamiento en azimut, se encuentra ensamblado en la góndola. Este ensamble contiene a dos de los discos de teflón (rodamiento en azimut 1 y rodamiento en azimut 2) que tienen tolerancias de ajuste, llevan pegamento con la pared de la góndola para evitar su movimiento.

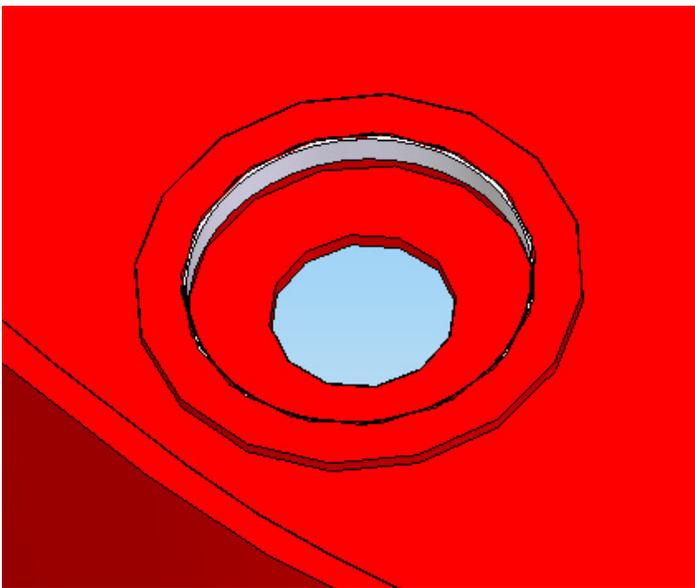


Figura 4.3.17 Rodamiento en azimut 1 pegado a la pared del espacio de la góndola

4.3.13 Góndola-rodamiento en azimut 2

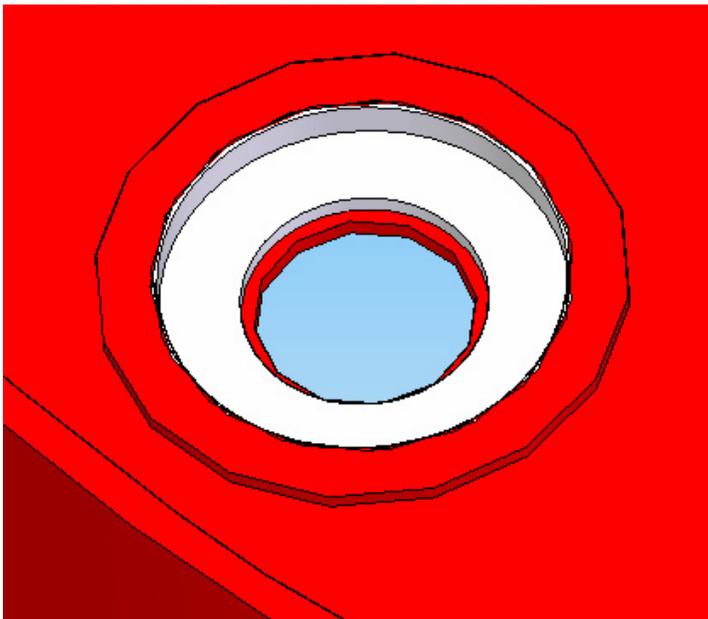


Figura 4.3.18 Rodamiento en azimut 2 pegado a la superficie del espacio en la góndola

4.3.14 Góndola-diadema

Teniendo acoplados los rodamientos en azimut 1 y 2 en la base de la góndola y el rodamiento en azimut 3 acoplado a la diadema, el sistema de rodamiento en azimut se completa al acoplar la diadema con la góndola, como se muestra en la imagen.

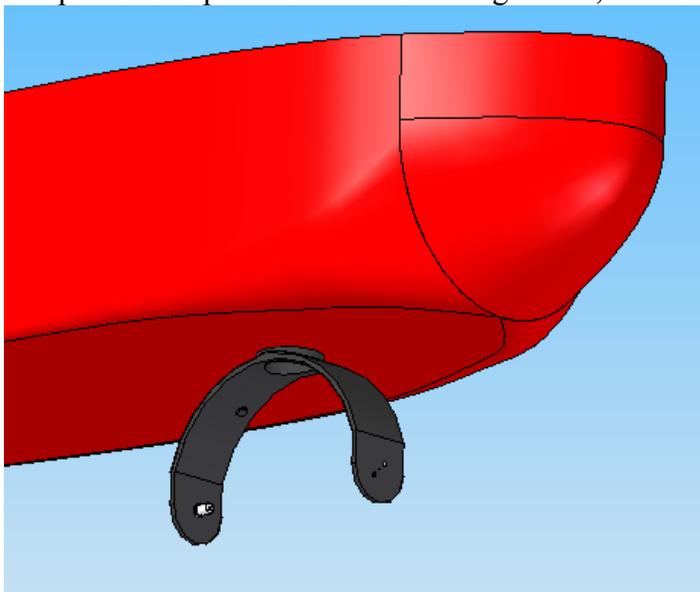


Figura 4.3.19 Diadema con rodamiento en elevación 3 colocada sobre el rodamiento en elevación 2

4.3.15 Estructura-tapa estructura-diadema-góndola

Una vez que la diadema está unida a la góndola a través del sistema de rodamiento en azimut, se tiene que ensamblar la estructura tapada, colocando el rodamiento en elevación 2 unido a la diadema dentro del rodamiento en elevación 2 acoplado a la estructura. Posteriormente se debe ajustar el eje del motor 1 con la sujeción unida a la diadema y fijar el eje.

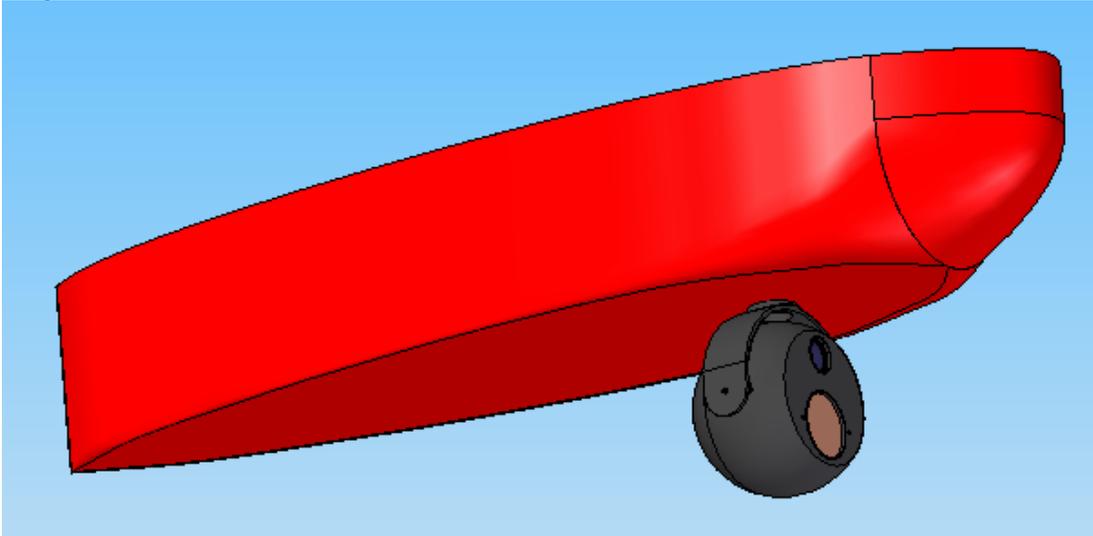


Figura 4.3.20 Estructura acoplada a la diadema y a la góndola del dirigible

4.3.16 Estructura-tapa estructura-diadema-góndola-engrane

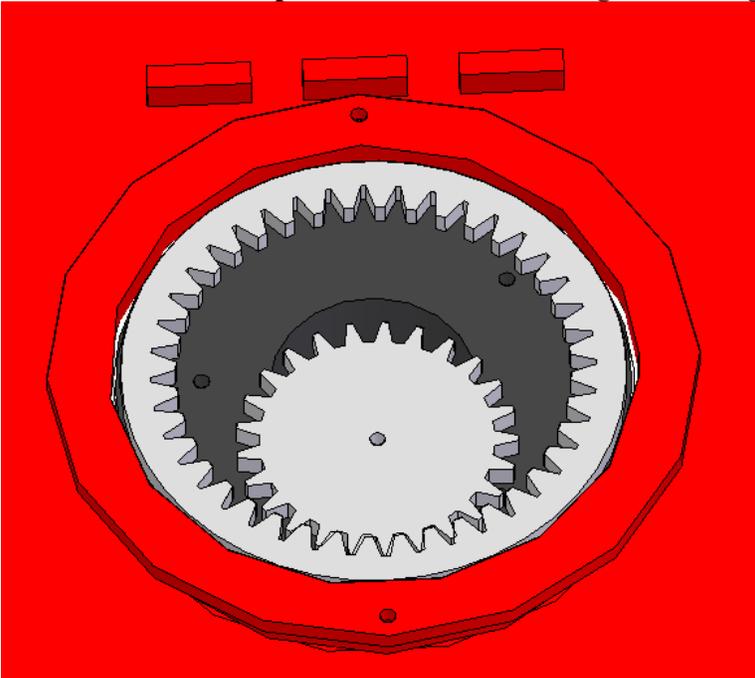


Figura 4.3.21 Imagen del sistema de engranes que transmiten el movimiento en azimut

4.3.17 Tapa góndola-motor 2

El motor 2 se acopla a la tapa de la góndola a través de la sujeción del motor 2 diseñada en esta investigación y presentada con anterioridad. La base del eje del motor 2 se acopla al orificio de la tapa.

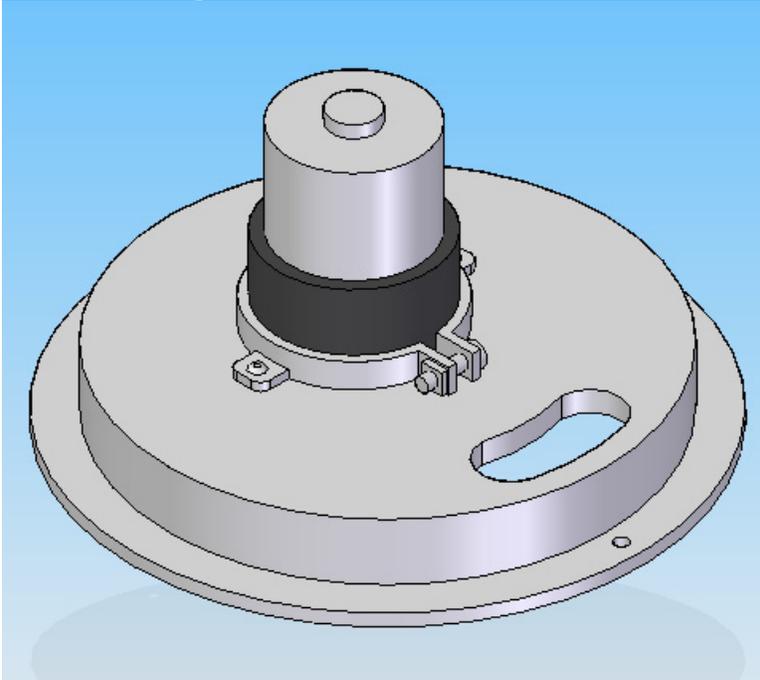


Figura 4.3.22 Ensamble del motor 2 a la tapa de la góndola

4.3.18 Tapa góndola-motor 2-encóder

El encóder se introduce en el eje del motor 2, pegando el lector óptico a la cara inferior de la tapa de la góndola. Esto se muestra en la figura 4.3.23.

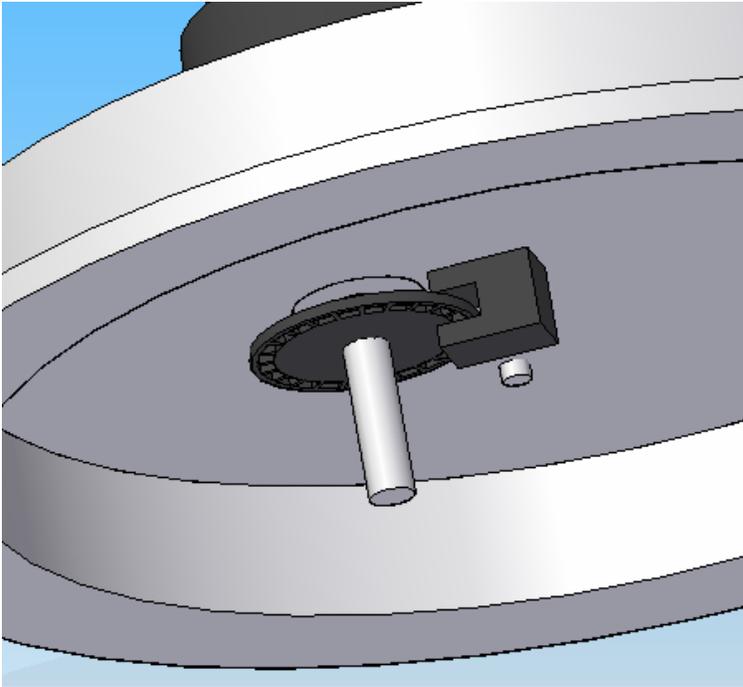


Figura 4.3.23 Encóder acoplado al eje del motor 2 y lector óptico pegado a la tapa de la góndola

4.3.19 Tapa góndola-motor 2-encoder-piñón

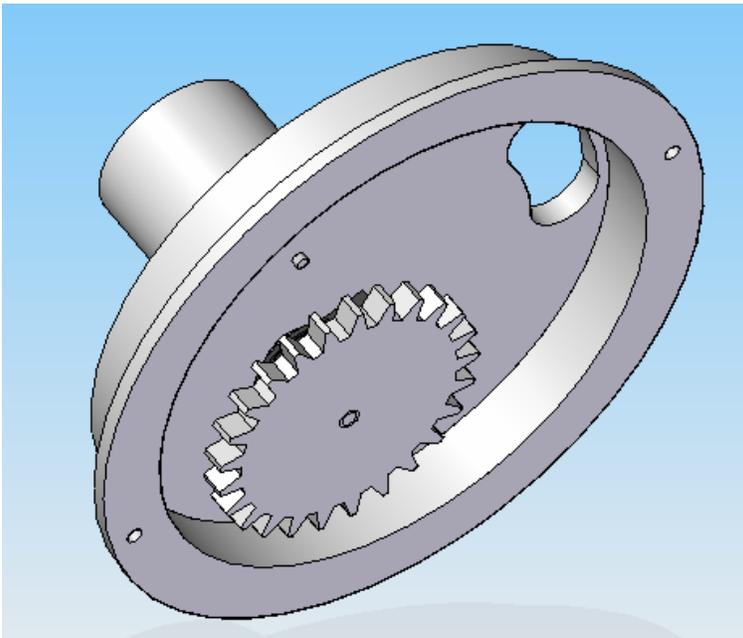


Figura 4.3.24 Piñón acoplado al eje del motor 2

4.3.20 Tapa góndola-motor 2-encoder-piñón-góndola

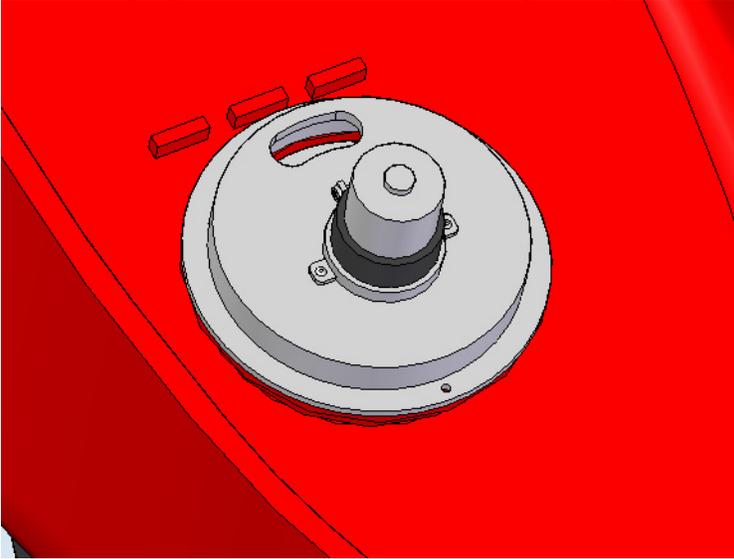


Figura 4.3.25 Ensamble de la tapa con la góndola del dirigible

4.3.21 Sistema final

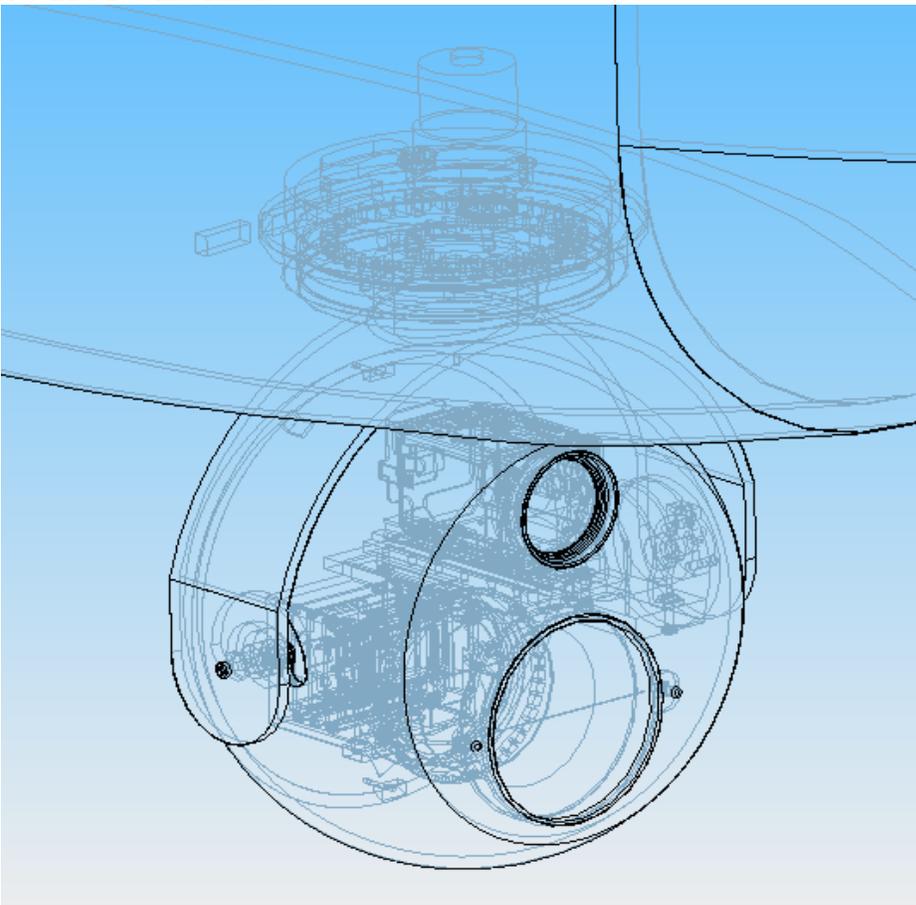


Figura 4.3.26 Vista fantasma del SVVIVAA acoplado a la góndola del dirigible

4.4. Revisión del sistema

En esta sección del capítulo, se revisará que el sistema diseñado durante la investigación, el cual se presentó en el inciso anterior de este mismo capítulo, cumple con las especificaciones de diseño que se tienen.

Para esto, se determinará el peso total del sistema, su dimensión, la cantidad de voltaje que requiere para su funcionamiento, la velocidad de movimiento en sus dos grados de movimiento así como la cantidad de grados que puede moverse. Los valores que se tienen como especificación se dieron a conocer en el capítulo 3, a continuación se presenta nuevamente la tabla 3.1 como referencia.

Tabla 3.1 Especificaciones de diseño SVVIVAA.

Especificación	Valor	Unidad
Peso	2	Kg
Dimensión	150 * 210 mm (Diámetro * Altura)	mm
Consumo de energía	12 V DC	V
Rango de visión	360 Azimut, 180 Elev.	Grados
Velocidad de movimiento elevación	10-15	rev/min
Velocidad de movimiento azimut	10-15	rev/min

4.4.1 Peso

En el inciso 1 de este capítulo, se dieron a conocer los pesos de los componentes adquiridos, y los volúmenes y densidades de los componentes diseñados. A continuación, se presenta una tabla con los valores de pesos de todos los componentes del sistema, al final de ésta, viene indicado el peso total del sistema para ser comparado con el de la especificación que se tiene.

Tabla 4.1 Pesos de los componentes del SVVIVAA

Componente	Volumen(m ³)	Densidad (kg/m ³)	Peso (kg)
Módulo HD			0.12
Módulo infrarrojo			0.25
Sujeción mod. HD			0.105
Potenciómetro			0.06
Motor 1			0.12
Motor 2			0.12
Sujeción eje motor 1			0.0076
Encóder			0.003
Estructura	0.000279	1440	0.401
Tapa estructura	0.000002	1440	0.00288
Diadema	0.0000125	1440	0.018
Rodamiento. elev.1	0.0000006	2150	0.00129
Rodamiento. elev.2	0.0000047	2150	0.010
Rodamiento. azi.1	0.000025	2150	0.053

Rodamiento. azi.2	0.0000047	2150	0.010
Rodamiento. azi .3	0.000031	2150	0.066
Sujeción motor 1	0.0000018	7833	0.014
Sujeción motor 2	0.0000017	7833	0.013
Sujeción IR	0.00003	7833	0.235
Engrane	0.0000124	1080	0.0134
Piñón	0.0000106	1080	0.0114
Tapa góndola	0.0000064	1440	0.0092
15 Tornillos			0.15
Peso Total			1.8

Peso Total del SVVIVAA = 1.8 Kg

Valor de la especificación de peso = 2 Kg

4.4.2 Dimensión

Como se mencionó en el capítulo anterior, la especificación de dimensión está referida al área que ocupa el acoplamiento dentro de la góndola del dirigible y la altura del sistema por debajo de la superficie inferior de la góndola.

Se presentan primero el área y la altura del sistema, y a continuación los valores de la especificación de dimensión.

Tabla 4.2 Dimensiones del SVVIVVA

SVIVVA	Dimensión
Área en góndola	10 387(mm ²)
Altura	207 mm

Tabla 4.3 Especificación de diseño para las dimensiones

Especificación	Dimensión
Área en góndola	15 000(mm ²)
Altura	250 mm

4.4.3 Consumo de energía

No todos los componentes dentro del sistema requieren un consumo de energía eléctrica, por esta razón se presenta a continuación una lista con los componentes eléctricos del SVVIVAA y la cantidad de volts que requieren para funcionar. El valor que se debe comparar con la especificación de diseño para el consumo de energía, es el valor máximo en Volts que tenga cualquier componente de la tabla siguiente.

Hay que mencionar que el consumo de energía de los componentes eléctricos del SVVIVAA viene dado en rango, pues este depende de las funciones que se utilicen en los módulos visible e infrarrojo, o que el torque utilizado en los motores para mover el sistema. En la tabla se presenta el rango de consumo de energía de cada componente.

Tabla 4.4 Consumo de energía de los componentes eléctricos del SVVIVAA

Componente	Consumo de energía (V)
Módulo visible	6-12
Módulo infrarrojo	6-12
Motor 1	6-12
Motor 2	6-12
Potenciómetro	1
Encóder	1

Especificación de consumo de energía: 12 V

4.4.4 Rango de visión

Conociendo el modelado virtual del sistema, es posible determinar la cantidad de grados angulares que puede tener en elevación y azimut. Desde un principio se sabía que los cables de los componentes eléctricos serían el principal factor en los grados de movimiento que tendría el SVVIVAA. Como se menciona en el capítulo anterior, para cumplir con los grados de la especificación de diseño, el diseño debería ser creativo.

A continuación se presentan imágenes del diseño mostrando los cables de los componentes eléctricos del SVVIVVA y su trayectoria hasta la base de la góndola donde se encuentran los enchufes para cada cable. Los cables restringen el movimiento en elevación, sin embargo en el plano azimut no restringen el movimiento en ningún rango.

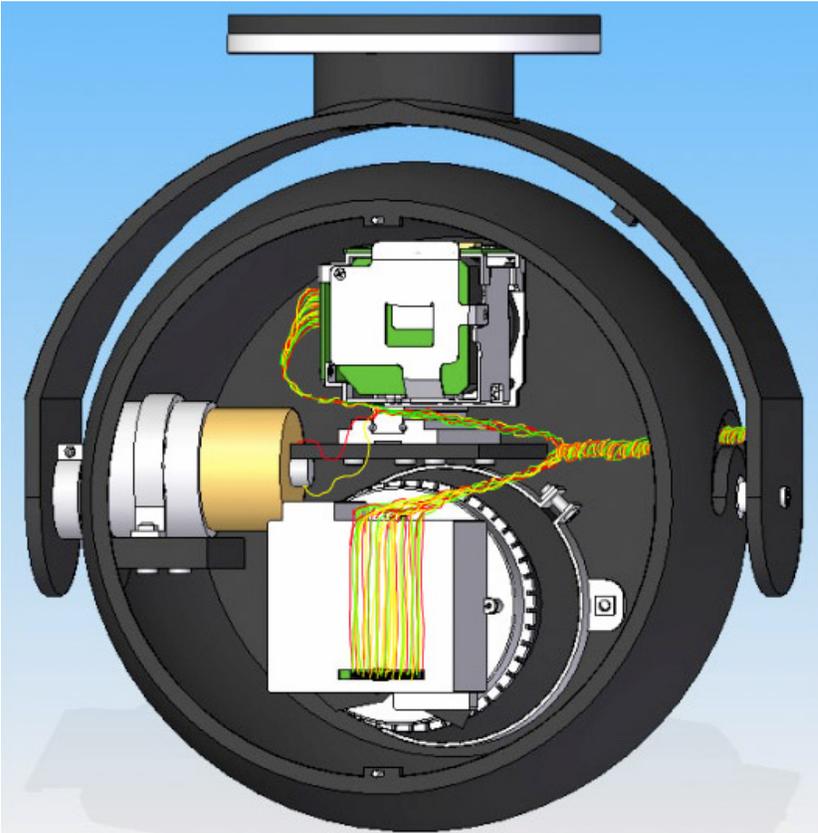


Figura 4.4.1 Imagen mostrando la trayectoria de los cables dentro de a estructura

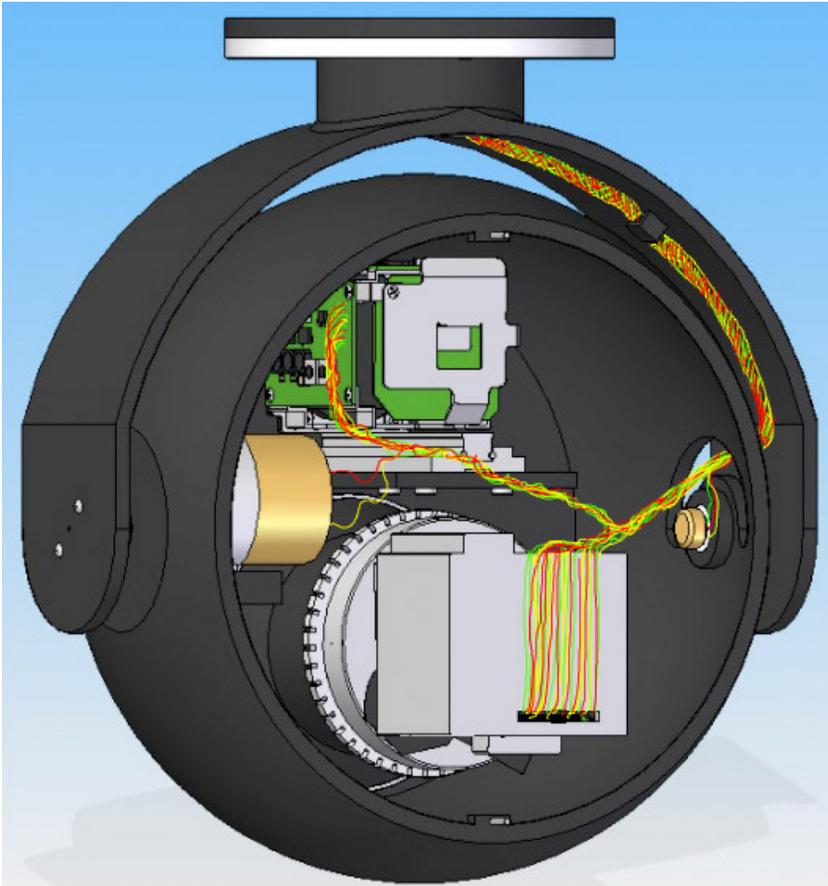


Figura 4.4.2 Trayectoria de los cables a la salida de la estructura, esta imagen muestra el rango de movimiento en elevación

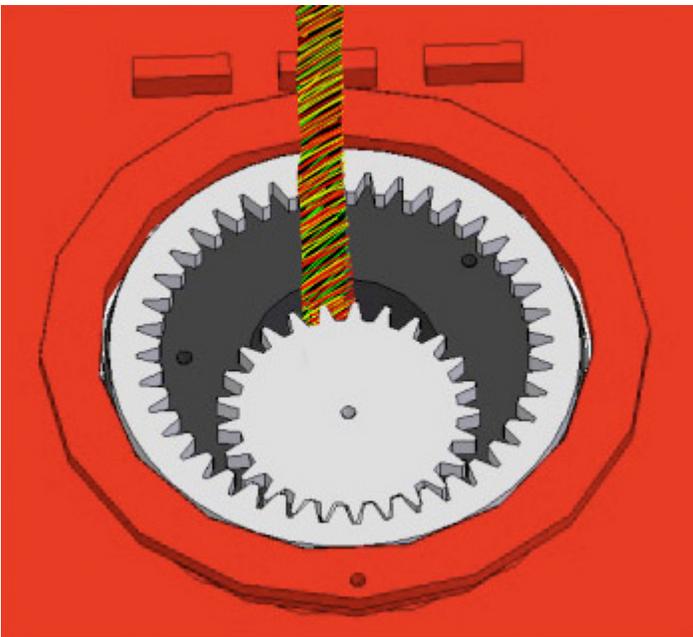


Figura 4.4.3 Cables saliendo por el espacio entre los engranes

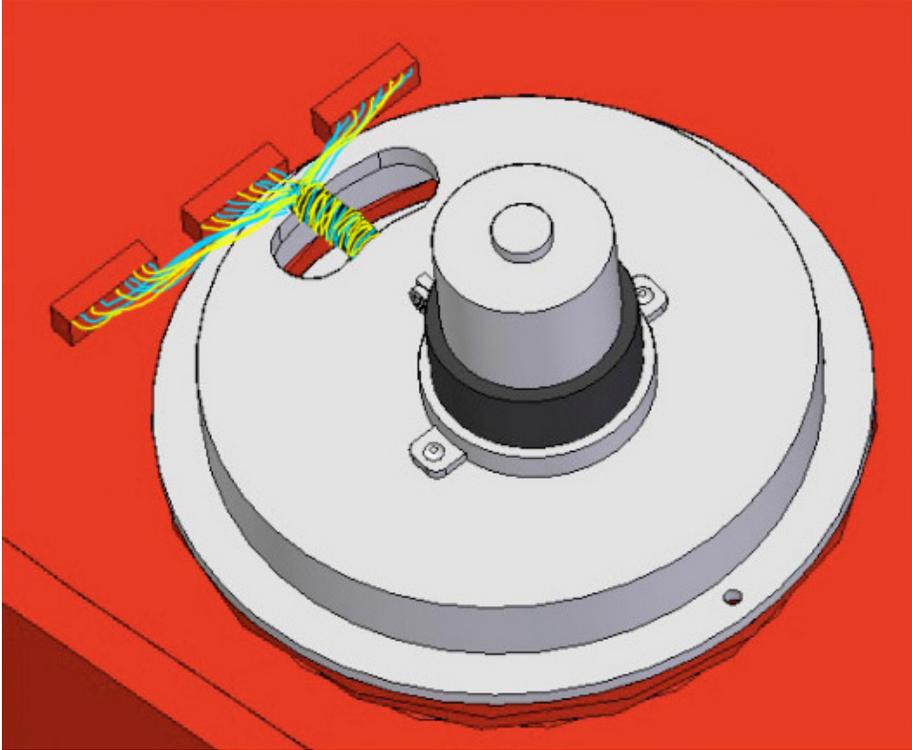


Figura 4.4.4 Cables saliendo por el orificio de la tapa de la góndola y conectándose a las bases en la góndola

Observando las imágenes, se puede ver cómo está restringido el movimiento del SVVIVAA en el plano elevación. Sin embargo en el plano azimut los cables pasan a través del orificio central del sistema, aún cuando el espacio es reducido en tamaño por el piñón, como muestra la figura 4.4.3. A continuación se presentan los rangos de movimiento en los planos azimut y elevación que puede girar el SVVIVVA, así como las especificaciones para el rango de movimiento y confirmar que el diseño cumple con ellas.

Tabla 4.5 Rangos de movimiento del SVVIVAA

Plano	Rango de movimiento (grados)
Azimut	180
Elevación	360

Tabla 4.6 Especificación de diseño para el rango de movimiento

Plano	Rango de movimiento (grados)
Azimut	0-180
Elevación	0-360

4.4.5 Velocidad de movimiento

El SVVIVAA cuenta con dos motores eléctricos que generan el movimiento en los dos planos que se tienen. Como se pudo observar en la sección anterior de este capítulo, solamente en el plano azimut se tiene un sistema de transmisión de movimiento, conformado por los engranes diseñados. En el plano elevación no se tiene un reductor de velocidad, y es el mismo eje del motor 1 el que transmite el movimiento a la estructura. Por esta razón, la velocidad en este plano será menor a la que se tiene en azimut, ya que la fuerza necesaria será mayor.

La velocidad del piñón será la velocidad del motor 2 y la velocidad del engrane y del sistema viene indicada en la figura 4.2.43.

La tabla 4.7 presenta los datos técnicos de los motores 1 y 2, comentados en el capítulo anterior; aquí se puede observar la velocidad de cada motor, así como el torque que manejan.

Tabla 4.7 Datos técnicos de los motores eléctricos

	Motor 1	Motor 2
Consumo de energía (V)	3-12	3-12
Peso (Kg)	0.12	0.12
Velocidad de movimiento (rpm)	10	20
Torque (kg-cm)	0.71	0.71

El motor 2 tiene una velocidad de 20 rpm, que equivale a 120 grados sobre segundo, por lo que la velocidad del engrane y del SVVIVAA será de 12.5 rpm. La velocidad en el plano azimut es la velocidad del motor 1.

Tabla 4.8 Velocidad de movimiento angular del SVVIVA

	Velocidad de movimiento (RPM)
SVVIVAA Plano elevación	10
SVVIVAA Plano azimut	12.5

Tabla 4.9 Especificación para la velocidad de movimiento

	Velocidad de movimiento (RPM)
Plano elevación	10-15
Plano azimut	10-15

Habiendo hecho la revisión del sistema y comparando los valores con las especificaciones, se verificó que el diseño cumple con todas ellas. Para el caso del peso no se superó el límite que se tenía, y además éste quedó cerca del valor de la especificación, lo cual es bueno que esto sucediera por cuestiones de estabilidad. La altura del SVVIVAA.

Con esto se presenta el diseño del sistema de visión visible e infrarrojo para vehículo aéreo autónomo desarrollado en esta investigación, y que de realizarse, dará apoyo en la toma de

imágenes aéreas al dirigible autónomo de investigación que se desarrolla actualmente en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

En el siguiente y último capítulo se presenta un análisis comparativo del cual se desprenden las principales conclusiones y recomendaciones.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.

Habiendo concluido con la revisión del diseño, es necesario hacer un análisis de los resultados obtenidos durante esta investigación. El SVVIVAA cumple con las cinco especificaciones de diseño que se tienen, por lo que es la principal ventaja que tiene sobre cualquiera de los demás sistemas de los que se pudo obtener información y que fueron presentados en el capítulo 2.

Estos sistemas comerciales están diseñados para vehículos como son helicópteros o vehículos aéreos no tripulados de mayor tamaño y potencia que el dirigible que se piensa construir, por lo que son capaces de elevar un mayor peso. Sin embargo, cuentan con mayores funciones que el SVVIVAA, como es el distanciómetro láser y mejor resolución en las imágenes infrarrojas. Además, hay que mencionar que el SVVIVAA no contempla dentro de los valores de peso, dimensión, y consumo de energía la aportación que daría la computadora y el sistema de almacenamiento de información. Como se mencionó en el capítulo 2, se compartirán estas funciones con otros sistemas del dirigible como es el control de vuelo y el sistema de geo-localización. Algunos de los sistemas con los que se hizo la comparación en el capítulo 3 tampoco contemplan el procesamiento y almacenamiento de información.

La principal restricción es el peso, el cual se encuentra 0.2 Kg por debajo de los 2 kilogramos de valor máximo que se tiene. Esta reducción en peso se debe en parte al menor número de componentes y menor calidad en las imágenes, pero también en buena parte a la búsqueda en diversas fuentes, que dio como resultado la selección de componentes y materiales de bajo peso y con la calidad necesaria para ser integrados en el SVVIVAA, como son los módulos visible e infrarrojo, que también redujeron en buena manera las dimensiones.

Por otro lado, el consumo de energía si está ligado completamente al tamaño y peso del sistema, pues si estos se incrementaran, los motores eléctricos necesitarán mayor torque para poder mover un peso superior, incrementándose la potencia eléctrica, además de engranes más grandes por el incremento de volumen. Si se hubiera montado una cámara infrarroja de mejor resolución, se necesitaría un consumo mayor de energía para alimentar el sistema de enfriamiento necesario en este tipo de cámaras.

Gracias al Benchmarking comparativo que se realizó, se obtuvieron ideas para el diseño y la arquitectura del SVVIVAA, por lo que el rango de visión es el mismo que el de los sistemas comparados. Este rango permite realizar giros de más de 360 en el plano azimut, debido al buen diseño que se realizó con la trayectoria de los cables, pues eran principalmente estos los que restringían el rango de movimiento. Sin embargo, no fue posible obtener información sobre la velocidad de giro en los sistemas comerciales, pues son productos de alta tecnología, y como ya se mencionó, están diseñados para helicópteros, que son vehículos usados por gobiernos, empresas de seguridad, transporte, petroleras, etc. y no tanto por universidades, por lo que la información es poca al público en general. Por lo anterior, no es posible saber el tiempo que tardan estos sistemas en cambiar

de una posición a otra, lo que orilló a que se tomara como especificación de diseño y a que el cliente determinara un valor para quedar satisfecho con el producto.

Una cuestión muy importante cuando un nuevo producto es desarrollado, es el costo final de este. De nada sirve que el SVVIVAA cumpla con todos los requerimientos del cliente, si el costo de este se encuentra muy por encima al costo de los demás productos. Sin embargo, no se discutirá el costo en esta investigación, por ser parte de un proceso de diseño, pero se da un buen comienzo para la siguientes etapas, como la manufactura, la cuál no está incluida en esta investigación.

El SVVIVAA fue diseñado para que su fabricación fuera realizada por el grupo a cargo del dirigible, de forma manual, por eso los componentes diseñados cuentan con geometrías simples como lo son el cilindro y la esfera. El día en que el SVVIVAA se encuentre documentando el vuelo del dirigible de investigación a través de imágenes visibles e infrarrojas y se contemple producirlos para su venta, será necesario realizar las correcciones encontradas a este prototipo y definir un plan de manufactura que incluya el proceso de cada componente, lo cual es tema de una nueva investigación. Una vez teniendo lo anterior, será posible realizar una comparación en costos, ya que los precios de los componentes y materiales del SVVIVAA pueden ser de igual o menor costo que el de los componentes y materiales de los sistemas comerciales, pero no mayor.

Dentro de la parte de las recomendaciones, el SVVIVAA se diseño tomando en cuenta que el equipo a cargo del diseño de la góndola y la distribución de los equipo al interior de ésta, incluiría al menos un giroscopio electrónico capaz de detectar cambios en la posición del plano inferior de la góndola, con respecto a un sistema coordenado. Como el SVVIVAA está acoplado con la góndola a través del plano inferior, cualquier movimiento en este plano moverá de igual forma al sistema de toma de imágenes. Es por esto que el diseño obtenido durante esta investigación cuenta con componentes capaces de medir la posición de la estructura en el plano elevación y azimut, como los son el encóder y el potenciómetro. Por lo que la primera recomendación sería incluir al menos un giroscopio electrónico dentro de la góndola para lograr la calidad de imágenes que se busca durante un vuelo del vehículo.

Otra recomendación es que se fabriquen a mano los componentes diseñados del SVVIVAA y se realicen pruebas con objetos que simulen las dimensiones y el peso de los módulos visible e infrarrojo antes de ser adquiridos, y con esto demostrar experimentalmente que el prototipo del SVVIVAA funciona y si no, encontrar porqué está fallando. El módulo infrarrojo tiene un valor de \$ 11 000 USD incluyendo los lentes y el módulo visible tiene un precio de \$ 1 550 USD, por lo que lo anterior es prácticamente necesario antes de decidirse a adquirir los módulos.

Por último me gustaría mencionar, que esta investigación es parte de un proceso de diseño que involucra muchas áreas y que es necesario en cualquier desarrollo de un nuevo producto, por lo que el prototipo presentado a lo largo de este documento, es muy buena base si el proyecto del dirigible consigue lo fondos suficientes para lograr que este se encuentre en vuelo algún día y el SVVIVAA o su mejora

Bibliografía

1. S.G. Burnay, T.L. Williams, C.H. Jones, “Applications of Thermal Imaging”, Editorial Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, Estados Unidos, 1988.
2. Aubrey I. Brown, Salvatore M. Marco, “Transmisión de calor”, Tercera edición, Compañía Editorial Continental S.A., México, 1958.
3. Holst C. Gerald, “CCD Arrays, Cameras and Displays”, Tercera edición, Editorial SPIE, Estados Unidos, 1998.
4. Segura Jaume, Hawkins F. Charles, “CMOS electronics: how it Works, how it fails”, Editorial Wiley-Interscience, Estados Unidos, 2004.
5. Uyemura P. John, “CMOS Logic Circuit Design”, Editorial Kluwer Academic, Estados Unidos, 1999.
6. Vaseghi V. Saeed, “Advanced digital signal processing and noise reduction”, Tercera edición, Editorial J. Wiley, Inglaterra, 2006.
7. Min Sheen, Min-Su Shin, and Jong-Hyun Oh, “Noise of CCD data and its reduction”, Department of Astronomy, Yonsei University, Seoul, Korea.
8. HAMAMATSU Company, “Photodiode Technical Information”.
9. Ulrich T. Karl, “Product design and development”, Cuarta edición, Editorial McGraw-Hill, Estados Unidos, 2008.
10. Skalak Susan Carlson, “Implementing concurrent engineering in small companies”, Editorial Marcel Dekker, Estados Unidos, 2002.
11. Otto K. & Wood K., “Product Design”, Editorial Prentice Hall, Estado Unidos, 2001.
12. Ashby F. Michael, “Materials Selection in Mechanical Design”, Tercera edición, Ed. Elsevier, Estados Unidos, 2005.
13. Mangonon L. Pat, “The principles of materials selection for engineering design”, Editorial Prentice Hall, Estados Unidos, 1999.
14. H.H. Yang, “Kevlar Aramid Fiber”, Ed. John Wiley & Sons, Estados Unidos, 1992.
15. http://www2.dupont.com/Teflon_Industrial/en_US/tech_info/techinfo_compare.html
16. Martin L.D. “Injection Molded Plastic Gears”, Plastic Design and Processing Magazine, part 1. pp: 38-45, Agosto 1968.

17. <http://www.sony.com>
18. <http://www.flir.com>
19. <http://www.infrared.com>
20. <http://plastics.dupont.com/plastics/pdflit/europe/zytel/ZYTPPe.pdf>
21. <http://www.servocity.com>
22. <http://linearmotion.skf.com>

Apéndices

- 1. Motores eléctricos (especificaciones técnicas)**
- 2. Sujeción del módulo visible (especificaciones)**
- 3. Potenciómetro (modelo)**
- 4. Sujeción del motor 1 (especificaciones)**
- 5. Encóder**

1. Motores Eléctricos

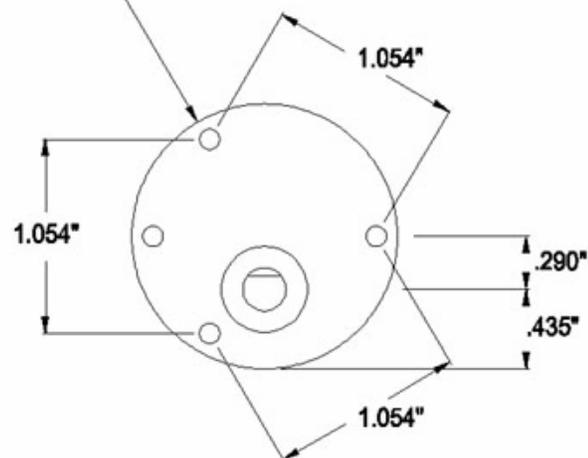
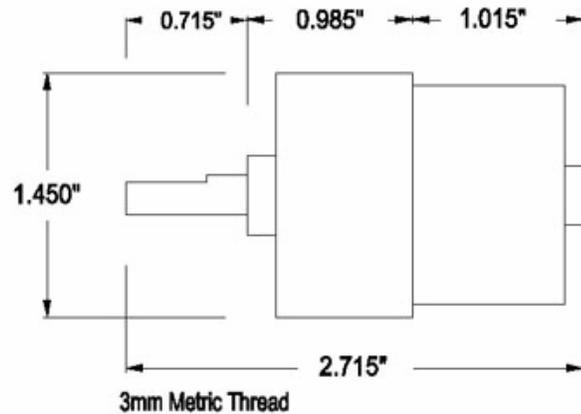
Motor 1

20 RPM Gear Motor

[Shopping Cart](#) → 🛒

MAXIMUM TORQUE → **65** oz-in. (12VDC)

MAXIMUM SPEED → **20** RPM (12VDC)



- Operating Range: 3-12VDC
- Torque @ Max Efficiency: **64.5 oz-in. (12V)**
- Torque @ Stall: 312 oz-in. (12V)
- .240" (6mm) Diameter Shaft
- No load current: 45mA
- No load current @ Max Efficiency: 95mA (12V)
- No load speed: **20 RPM**
- No load speed @ Max Efficiency: 15.9 RPM
- Gear ratio: 150:1
- Motor size: 1.30"Dia. x 1.015"L
- Gear size: 1.45"Dia. x .985"L
- Shaft size: 0.24" (6mm) Dia. x 0.715"L
- Weight: 0.2813 lbs. (4.5 oz.)
- DC reversible motors
- Solder type terminal
- High torque construction
- Oil bearing design for long service life
- Insulation resistance: 10 MOhm
- Dielectric Strength: 300VDC

Stall Torque is the torque which is produced by a motor when the output rotational speed is zero, it may also mean the torque load that causes the output rotational speed of a motor to become zero - ie to cause stalling. Electric motors continue to provide torque when stalled. However, electric motors left in a stalled condition are prone to overheating and possible damage since the current flowing is maximum under these conditions.

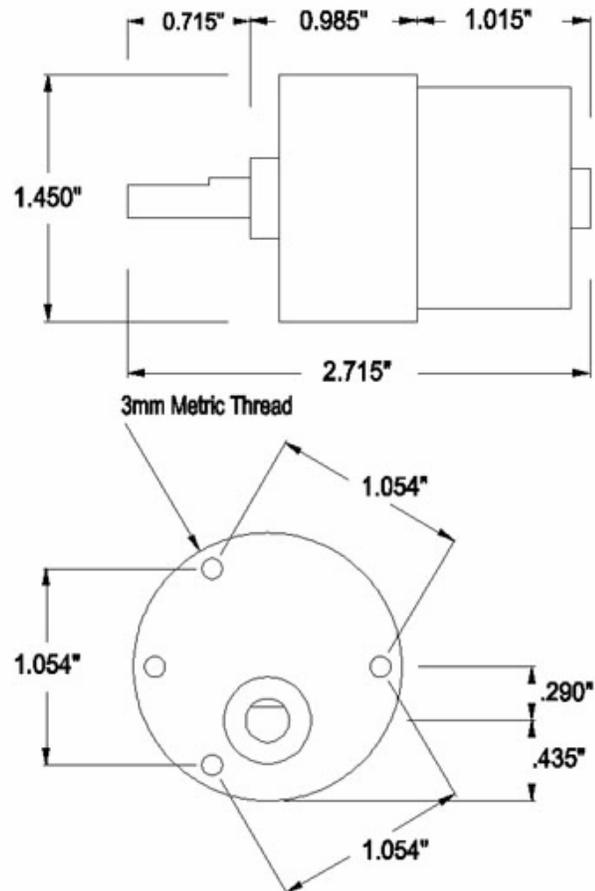
Motor 2

10 RPM Gear Motor

[Shopping Cart](#) 

MAXIMUM TORQUE  **130*** oz-in. (12VDC) **MAXIMUM SPEED**  **10** RPM (12VDC)

* Stalling this gearmotor could cause geartrain damage.



- Operating Range: 3-12VDC
- Torque @ Max Efficiency: **130.29 oz-in.@12VDC**
- Torque @ Stall: 624 oz-in (12V)
- **Gear train damage can occur if stalled (locked)**
- .240" (6mm) Diameter Shaft
- No load current: 45mA
- No load current @ Max Efficiency: 95mA (12V)
- No load speed: **10 RPM**
- No load speed @ Max Efficiency: 7.96 RPM
- Gear ratio: 300:1
- Motor size: 1.30"Dia. x 1.015"L
- Gear size: 1.45"Dia. x .985"L
- Shaft size: 0.24" (6mm) Dia. x 0.715"L
- Weight: 0.2813 lbs. (4.5 oz.)
- DC reversible motors
- Solder type terminal
- High torque construction
- Oil bearing design for long service life
- Insulation resistance: 10 MOhm
- Dielectric Strength: 300VDC

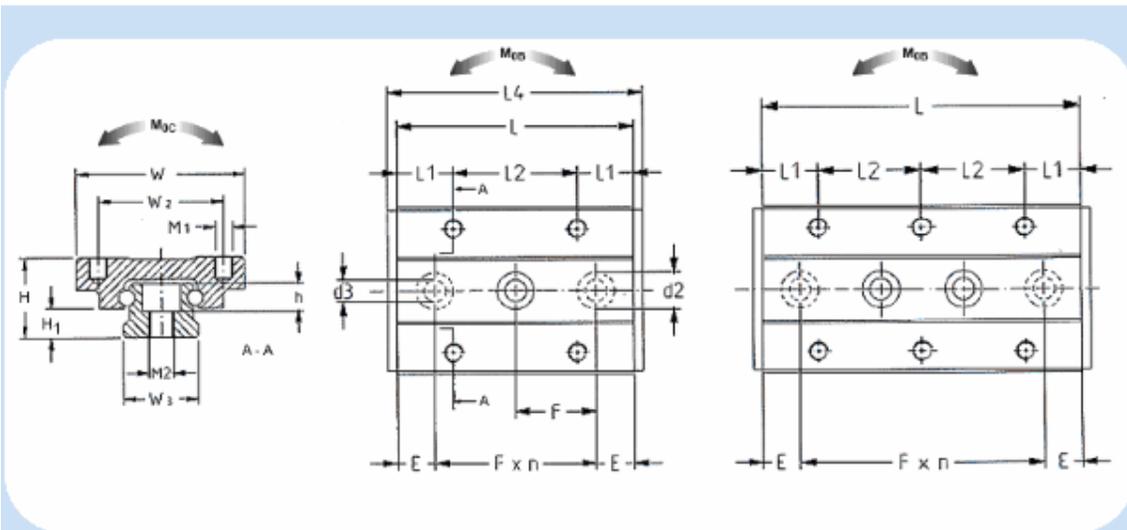
Stall Torque is the torque which is produced by a motor when the output rotational speed is zero, it may also mean the torque load that causes the output rotational speed of a motor to become zero - ie to cause stalling. Electric motors continue to provide torque when stalled. However, electric motors left in a stalled condition are prone to overheating and possible damage since the current flowing is maximum under these conditions.

2. Sujeción del módulo visible (especificaciones)



LZMHS9-94

Presentation | 3D drawings | PDF version

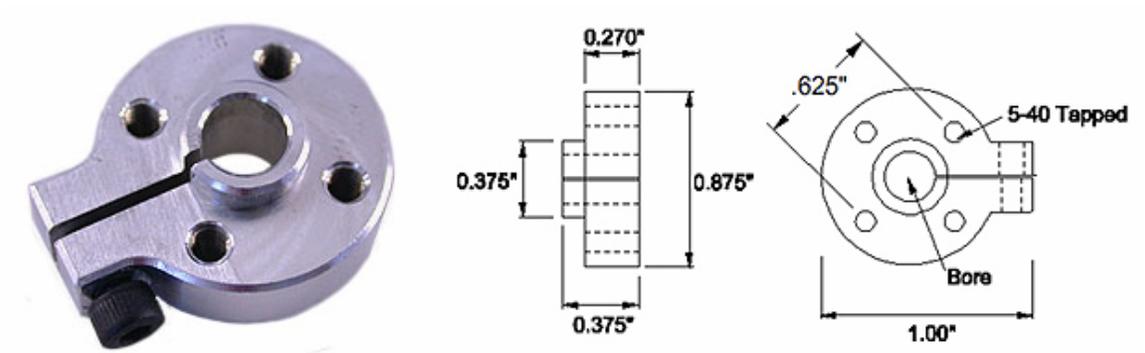


carriage width	W1 [mm]	20
W2	[mm]	15
W3	[mm]	9
L2	[mm]	13
M ₁		M3 x 2,5
d3	[mm]	3,5
d2	[mm]	6
h	[mm]	3,5
H	[mm]	10
H1	[mm]	3,55
M ₂		M4
F	[mm]	20
L	[mm]	94
L4	[mm]	97
Max. stroke	[mm]	92
E	[mm]	7
L1	[mm]	8
Load carrying capacity	C [N]	3 300
static load carrying capacity	C0 [N]	7 400
M _{0A/0B}	[Nm]	57
M _{0C}	[Nm]	33

3. Potenciómetro (modelo)

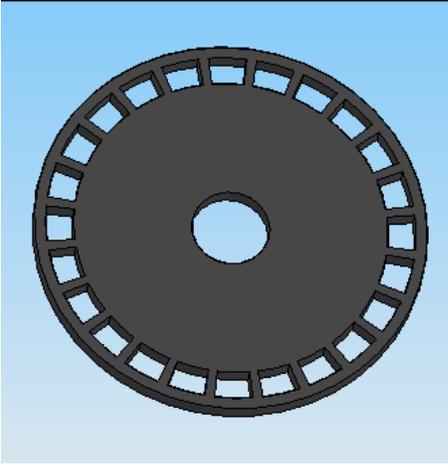


4. Sujeción del motor 1



Bore	Part #
1/8" (.125")	3150CH
5/32" (.1563")	3154CH
3/16" (.1875")	3158CH
1/4" (.250")	3162CH
5/16" (.3125")	3166CH
3/8" (.375")	3172CH
4mm	3120CH
5mm	3124CH
6mm	3128CH

5. Encóder



Este encóder, es un proyecto desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, a través de la materia de Diseño asistido por computadora, impartida por el Dr. Álvaro Ayala. En el proyecto se creó el diseño en 3D los moldes de inyección para su fabricación.