



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA
MECÁNICA E INDUSTRIAL

**SISTEMA PARA CAPTURA DE *TIME-LAPSE* Y
ESTABILIZACIÓN DE IMAGEN**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECATRÓNICO

P R E S E N T A:
MIGUEL ÁNGEL RUIZ GÁLVEZ

DIRECTOR DE TESIS:
MA. LUIS YAIR BAUTISTA BLANCO



MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA, 2015

Agradecimientos

A mis padres, por todos su apoyo en la búsqueda de mis sueños a lo largo de estos años, por el amor y paciencia que me han tenido y por los consejos y valores que me hacer ser lo que soy, los amo.

A mis hermano Gerhard, por apoyarme en todo momento y molestarme tanto para siempre ser una mejor persona.

*A mis amigos:
Mario, Angel, Julio, Calejía, Vanessa y Amaury: Por aguatarme y tolerarme a lo largo de la carrera, por esas desveladas y proyectos interminables, y ser de las personas con las que puedo contar en cualquier momento.*

Vick: Por ser mi compañero de aventuras a lo largo de todos estos años y por apoyarme en todas las decisiones que he tomado.

Ixek: Por ser una de las personas que mas admiro en este mundo y demostrarme que el éxito se alcanza con trabajo duro y uno que otro tatuaje.

Reki, Robert, Pablo: Por ser una fuente de inspiración a lo largo de estos años y denostarme como se poder ser un niño en el cuerpo de un adulto.

Hueso, Marquitos y Nadia: Por no ser solo compañeros de entrenamiento si no amigos y mentores de toda la vida.

Diana: Por apoyarme en todo momento y enseñarme que tengo todo el tiempo del mundo para lograr mis objetivos.

A mi asesor Yair Bautista, por ser un excelente profesor, mentor, jefe y sobre todo amigo, por compartir conmigo su pasión por la enseñanza y la tecnología, y por todas esas charlas de comics, y cosas ñoñas que tanto nos gustan.

*A mis profesores:
Ulises Peñuelas, Erick Castañeda, Jesús Manuel Dorador, Leopoldo González, María del Pila y Hanna García.*

A la Facultad de Ingeniería y la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de pertenecer a la mayor casa de estudios del país y ayudarme a

cumplir un sueño mas y darme las herramientas y recursos para formarme como una personas capaz de resolver cualquier problema con un pensamiento crítico.

***A** mis ídolos, Adam Savage y Steve Jobs por ser una fuente de inspiración a lo largo de estos años y enseñarme que la pasión y la obsesión son piezas fundamentales para el éxito.*

*“Be curious. Read widely. Try new things. What people call intelligence just boils down to curiosity. - **Aaron Swartz***

“Stay obsessed. That thing you can't stop thinking about? Keep indulging it. Obsession is the better part of success. You will be great at the things that you can't not do.” -

Adam Savage

*“I hope... you make mistakes. Because if you are making mistakes, then you are making new things, trying new things, learning, living, pushing yourself, changing yourself, changing your world. You're doing things you've never done before, and more importantly, you're doing something. So that's my wish for you, and all of us, and my wish for myself. Make new mistakes. Make glorious, amazing mistakes. Make mistakes nobody's ever made before. Don't freeze, don't stop, don't worry that it isn't good enough, or it isn't perfect, whatever it is: art, or love, or work or family or life. Whatever it is you're scared of doing, do it. Make your mistakes, next year and forever.” - **Neil Gaiman***

Tabla de contenido

Introducción.....	10
1. Planteamiento del Problema.....	12
1.1 Justificación.....	12
1.2 Objetivo general.....	14
1.3 Alcances.....	14
2. Antecedentes.....	17
2.1 <i>Time-lapse</i>	17
2.1.1 Control de Disparo.....	18
2.1.2 Dispositivos Comerciales.....	25
2.2 Estabilización de Imagen.....	27
2.2.1 Tipos de estabilizadores de imagen.....	29
2.2.2 Dispositivos Comerciales.....	38
2.3 Motores sin escobillas.....	41
2.4 Industria de la Programación Móvil.....	50
3. Identificación de Necesidades y Especificaciones.....	54
3.1 Identificación de Necesidades.....	54
3.2 Generación de Especificaciones.....	57
3.3 Restricciones.....	59
4. Diseño Conceptual.....	63
4.1 Generación de Concepto.....	63
4.2 Diagrama de Bloques.....	63
4.3 Generación, selección y evaluación de conceptos de solución.....	67
5. Diseño de Configuración.....	89
6. Diseño a Detalle.....	104
6.1 Selección de elementos electrónicos.....	104
6.2 Diseño de Estructura y Diseño de Ensamble.....	116
6.3 Análisis de Contrapeso.....	128
6.4 Programación Control de Movimiento Motores BLCD.....	130
6.5 Programación captura de ángulos de rotación.....	135
6.6 Programación Control de disparo y <i>time-lapse</i>	140
6.7 Programación Control de Estabilización.....	143
6.8 Diseño de interfaz Móvil.....	145
7. Fabricación de Modelo Funcional.....	160
7.1 Manufactura y Ensamble de Estructura Móvil.....	160
7.2 Diseño y Manufactura de Circuito Impreso.....	166
7.3 Estructura de soporte de usuario.....	173
8. Pruebas y Resultados.....	179
8.1 Evaluación de características físicas.....	180
8.1.1 Peso del dispositivo.....	180
8.1.2 Dimensiones del soporte.....	181
8.2 Evaluación de características Operativas.....	182

8.2.1	Reducción de oscilaciones	182
8.2.2	Resolución de rotación.....	183
8.3	Evaluación de características de uso.....	184
8.3.1	Número de piezas para la operación del sistema.....	184
8.3.2	Número de pasos para montar el equipo	185
8.3.3	Número de paso para programar	187
9.	Conclusiones.....	189
9.1.1	Trabajo a futuro.....	190
10.	Apéndice I: Tablas Boothroyd.....	192
10.1.1	Análisis de ensamble manual estructura 1.	192
10.1.2	Análisis de ensamble automático estructura 1.	193
10.1.3	Análisis ensamble manual estructura 2.	194
10.1.4	Análisis ensamble automático estructura 2.	195
10.1.5	Análisis ensamble manual: Ensamble de Equipo.....	196
10.1.6	Análisis ensamble manual: Ensamble de Estabilización	197
11.	Apéndice II: Planos y esquematicos	198
11.1.1	Conjunto de planos electrónicos	198
11.1.2	Conjunto de planos mecánicos	198
12.	Apéndice III: Elementos Audiovisuales.....	199
13.	Apéndice IV: Archivos de Código.....	200
14.	Referencias	201

Lista de Imágenes

Figura 1. Gráfico de venta de unidades Nikon® 2013. A la izquierda cámaras de lentes intercambiables y a la derecha cámaras compactas. [2].....	13
Figura 2. Cuerpo de cámara Nikon® D3100 [11].....	19
Figura 3. Fases de disparo. [11].....	20
Figura 4. Mecanismo para control de disparo [12].....	20
Figura 5. Diagrama de disparo remoto.	22
Figura 6. Conexión por cable USB [11].....	24
Figura 7. Posibles movimientos de la cámara [28].....	28
Figura 8. Movimientos de cámara [30].....	29
Figura 9. Elementos de compensación óptica [31].....	30
Figura 10. Unidad MSC IS desarrollada por Olympus®. [30].....	32
Figura 11. Proceso de estabilización digital [32].....	33
Figura 12. Efecto de SteadiCam [28].	34
Figura 13. Configuraciones de estabilizadores mecánicos.....	36
Figura 14. Operador y sujeto de apoyo [41].....	37
Figura 15. Sistemas de movimiento en 3 ejes. [42] [43].....	38
Figura 16. Esquema de BLCD. [53].....	41
Figura 17. Secuencia trapezoidal [54] [52].	45
Figura 18. Diagrama de bloques control de BLCD. [52].....	45
Figura 19. Inversor de seis pasos. [53].....	48
Figura 20. Gráfico de secuencia trapezoidal. [53].....	49
Figura 21. Inversor con entrada PWM. [60].....	49
Figura 22. Estadísticas de la industria móvil en México. [63].....	50
Figura 23. Cuota de mercado de sistemas operativos 2014. [64].....	52
Figura 24. Fragmentación del mercado móvil. [64].....	53
Figura 25. Lista técnica de equipos populares.	61
Figura 26. Diagrama de caja negra.	64
Figura 27. Diagrama de subsistemas.	65
Figura 28. Boceto Concepto Anillo.....	73
Figura 29. Boceto Concepto Soporte Rotatorio.....	74
Figura 30. Boceto Concepto Brazo.....	74
Figura 31 . Músculos Oculares [81].....	75
Figura 32. Soportes de dos manos. [82] [83].....	83
Figura 33. Soporte de pecho y mano. [84] [85].....	83
Figura 34. Soporte de hombro y manos. [86] [87].....	84
Figura 35. Soporte para una mano. [88] [89].....	84
Figura 36. Soporte para tomas de piso (una mano) [90].....	85
Figura 37. Boceto Propuesta 1.....	92
Figura 38. Boceto Propuesta 2.....	93
Figura 39. Boceto Propuesta 3.....	94
Figura 40. Diagramas de radar superpuestos.....	99

Figura 41. Boceto propuesta final.....	102
Figura 42. Diagrama de superposición.....	103
Figura 43. Motor GBM8108-90T.....	105
Figura 44. Circuito Base L6234. [94].....	106
Figura 45. Modulo ITG/MPU [99], a la izquierda el circuito interno y a la derecha la visualización del dispositivo.	108
Figura 46. Bluefruit LE [107].....	110
Figura 47. Cristal oscilador encapsulado DS10. [109].....	111
Figura 48. Optoacoplador 4N25. [113].....	112
Figura 50. Batería seleccionada.	115
Figura 51. EOS-1D® Mark IV.	116
Figura 51. Zapata estándar.	118
Figura 53. Estructura 1: Ensamblada.....	122
Figura 54. Estructura 1: Explosivo.	122
Figura 55 Estructura 2: Ensamblada.....	126
Figura 56 Estructura 2: Explosivo.	127
Figura 57. Diagrama de cuerpo libre.....	129
Figura 58. Gráfico de señal trifásica segmentada	131
Figura 59. Circuito controlador de motores BLCD	132
Figura 60. Valores de salida PWM para L6234.....	133
Figura 61. Diagrama de flujo para el movimiento de un motor BLCD.....	134
Figura 62. Cálculo de las proyecciones de la gravedad. [123]	136
Figura 63. Diagrama de flujo para cálculo de filtro complementario.	139
Figura 64. Circuito para control de disparo.	140
Figura 65. MC-DC2 a Audio Jack	141
Figura 66. Modificación de la placa Arduino® Mega.....	142
Figura 67. Diagrama de flujo para control de disparo.....	143
Figura 68. Diagrama de flujo para cálculo de PID.....	144
Figura 69. Tabla de salarios anuales en USDs por lenguaje.	146
Figura 70. La interfaz Tab Bar en la aplicación nativa de Reloj	149
Figura 71. Diagrama general del modelo MVC.....	153
Figura 72. MVC en acción. [135].....	154
Figura 73. Vista1: <i>Time-Lapse</i>	155
Figura 74. Vista 2: <i>Balance</i>	156
Figura 75. Vista 3: <i>Free Move</i>	156
Figura 76. Vista 4: <i>About</i>	157
Figura 77. Mensajes de conectividad.....	158
Figura 78. Visualización para múltiples dispositivos.....	158
Figura 79. Ícono de la aplicación.	159
Figura 80. Vista del ícono en entorno iOS®.....	159
Figura 81. Procesos de manufactura por rango de tamaño de lote recomendado. [138]	161
Figura 82. Molde perfil Roll.....	162
Figura 83. Molde perfil Pitch.	162

Figura 84. Pruebas de proporción de materiales.....	163
Figura 85. Distribución de capas.....	163
Figura 86. Molde sellado del perfil <i>Roll</i>	165
Figura 87. Piezas de estructura móvil.	165
Figura 88. Estructura móvil ensamblada.	166
Figura 89. Esquema electrónico.	167
Figura 90. Placa interfaz para L6234.....	168
Figura 91. Estructura de pruebas.....	168
Figura 92. Circuito implementado en <i>protoboard</i>	169
Figura 93. Diseño de placa.	170
Figura 94. Placa ensamblada vista superior.....	172
Figura 95. Placa ensamblada vista posterior.....	173
Figura 96. Encapsulamiento de sistema electrónico.....	174
Figura 97. Ensamble en modo <i>time-lapse</i>	175
Figura 98. Ensamble modo estabilización.....	176
Figura 99. Modelo funcional en modo <i>time-lapse</i>	177
Figura 100. Modelo funcional en modo estabilización.....	178
Figura 101. Nikon® D3200 y optometría.	179
Figura 102. Equipo fotográfico montado.....	181
Figura 103. Ensamble: Modo Estabilización.	185
Figura 104. Ensamble de equipo fotográfico.....	186
Figura 105. Mapa de Navegación.....	188

Lista de Tablas

Tabla 1. Tabla de intervalos.....	17
Tabla 2. Tabla de conectores de disparo remoto.....	23
Tabla 3. Tabla de dispositivos comerciales para captura de <i>time-lapse</i>	26
Tabla 4. Tabla de Dispositivos Comerciales para Estabilización de Imagen.....	39
Tabla 5. Tabla de comparación motor BLDC y motor DC [54].....	43
Tabla 6. Requisitos de un uC para control de BLDC. [58].....	47
Tabla 7. Tabla de relación entre necesidades.....	57
Tabla 8. Determinación de especificaciones.	58
Tabla 9. Tabla de especificaciones y restricciones.....	62
Tabla 10. Matriz de selección para sistema de medición.....	70
Tabla 11. Matriz de selección para sistema de intervalómetro.....	72
Tabla 12. Matriz de selección sistema de movimiento.....	76
Tabla 13. Matriz de selección actuador.....	79
Tabla 14. Matriz de selección para sistema de control.....	82
Tabla 15. Matriz de selección para interfaz de soporte.....	86
Tabla 16. Tabla de selección de propuestas de configuración.	89
Tabla 17. Propuestas de configuración.....	90
Tabla 18. Diagrama de Radar Propuesta 1.	97
Tabla 19. Diagrama de Radar Propuesta 2.	97
Tabla 20. Diagrama de Radar Propuesta 3.	98
Tabla 21. Propuesta de Configuración 4.....	100
Tabla 22. Diagrama de Radar Propuesta 4.	102
Tabla 23. Requerimientos de periféricos.	113
Tabla 24. Lista de piezas estructura 1.....	120
Tabla 25 Lista de piezas estructura 2.....	125
Tabla 26. Comparación de plataformas.....	147
Tabla 27. Storyboard	150
Tabla 28. Medición de pesos del dispositivo	180
Tabla 29. Resolución de movimiento	183
Tabla 30. Tabla de especificaciones obtenidas	190

Introducción

En el presente documento se expone la investigación, análisis y desarrollo, así como construcción del modelo funcional del “Sistema para captura de *time-lapse* y estabilización de imagen”.

En este proyecto se plantea el proceso de diseño de un sistema orientado a la industria de la fotografía y cinematografía, el cual propone ayudar al usuario conjuntando dos funciones recurrentes en el campo, la captura de *time-lapse* (variación de la frecuencia de captura de fotogramas) y la estabilización de imagen para escenas en movimiento.

Lo anterior con el fin de sentar las bases de un nuevo producto que conjunte en un solo sistema herramientas recurrentes de captura de imagen en una industria en constante crecimiento como lo es la fotografía, representando un nicho de oportunidad para el desarrollo tecnológico en México.

En el primer capítulo se presenta el planteamiento del problema así como los objetivos y alcances de este trabajo. Por otra parte, en el segundo capítulo se presenta una recopilación de conocimientos teóricos que fungen como antecedentes para la comprensión de las tecnologías actuales y su posterior implementación en el trabajo. En el capítulo tres se identifican las necesidades de un sector de usuarios y se establecen las especificaciones del trabajo.

A lo largo del capítulo cuatro se desglosan las funciones y sub-funciones del sistema lo que permite la generación de conceptos utilizando como apoyo los antecedentes presentados en el capítulo dos se generan propuestas de solución para cada una de las sub fusiones. En el capítulo cinco se ponen a juicio las diferentes propuestas de solución y la posterior elección de aquellas que se ajustan mejor a las necesidades del usuario y las exigencias del sistema.

Una vez determinada la configuración del sistema se prosigue en el capítulo seis con el diseño a detalle del sistema, seleccionado, analizando y diseñando los diferentes componentes del sistema, así como el diseño de algoritmos de programación. En el capítulo siete se resume el proceso de integración, implementación y construcción de los múltiples elementos que comprenden el sistema. Continuando a través del capítulo ocho, se presenta la serie de pruebas realizadas a los elementos que conforman la solución con la finalidad de observar que su comportamiento es el esperado y predecir posibles fallas que afecten al dispositivo. Para finalizar, en el capítulo nueve se presentan las conclusiones generadas a partir del desarrollo de este trabajo y posibles sugerencias para trabajo a futuro.

Del mismo modo este documento contiene cuatro apéndices en los cuales se encuentra a detalle el conjunto de planos electrónicos y mecánicos, los códigos implementados en los sistemas y material audiovisual como evidencia del funcionamiento del sistema.

1. Planteamiento del Problema

En la actualidad existen distintos dispositivos que dan solución a la captura de imágenes por intervalos, control de movimiento y estabilización de imagen, sin embargo estos equipos resuelven por separado cada uno de los problemas antes mencionados por lo que los usuarios, en caso de requerirlos, se ven obligados a adquirir múltiples equipos a precios elevados. Además de esto, algunos de los equipos requieren de capacitación especializada para su uso, por lo que tales productos resultan poco atractivos para sector de principiantes o aficionados ya que al no ser su actividad económica principal, la adquisición de equipo profesional resulta un gasto no esencial.

1.1 Justificación

En los últimos años, el mundo de la fotografía ha tenido un incremento considerable en el número de usuarios de cámaras fotográficas. Siendo que actualmente portar una cámara digital es común, al grado de encontrarlas en teléfonos móviles, computadoras y tabletas electrónicas.

La fotografía analógica ha quedado en el pasado, como menciona el estudio titulado “El sector de la fotografía e imagen”:

“El sector de la fotografía ha experimentado en la última década un cambio profundo en su composición y evolución de mercado. La fotografía digital pasa de ser un mercado incipiente en 1998 a desbancar completamente a la fotografía analógica en 2008.” [1]

En el “Nikon Anual Report” 2013 [2] y el “Canon Anual Report 2013” [3] se informa de un aumento considerable en las ventas mundiales de cámaras de lentes

intercambiables. Se puede observar en la Figura 1 un gráfico donde se ilustran las ventas anuales de Nikon®, con un incremento anual considerable.



Figura 1. Gráfico de venta de unidades Nikon® 2013. A la izquierda cámaras de lentes intercambiables y a la derecha cámaras compactas. [2]

El incremento en las ventas representa un incremento en los usuarios de cámaras de gama media y alta. Ya que la fotografía no solo requiere de la cámara en sí, sino de múltiples aditamentos para lograr diversos efectos visuales que van desde lentes, trípodes, flashes, luces y más, estos compradores así como nuevos usuarios, tenderán a comprar accesorios; para fotógrafos no profesionales esto representa una gran inversión de capital para la adquisición de productos especializados con una función específica.

Con base en lo anterior, se ve una oportunidad para el desarrollo de un nuevo concepto de equipo fotográfico, tomando una de las técnicas más populares en la fotografía el *time-lapse* y una de las necesidades más antiguas, el mantener una cámara libre de movimientos mientras se sostiene. Se propone un equipo que agrupa soluciones para cada una de estas técnicas, siendo este un sistema multifuncional.

A lo largo del presente documento se presenta el proceso de diseño del dispositivo propuesto, es por ello que es necesario aclarar los límites de este proyecto así como un objetivo y los alcances deseados.

1.2 Objetivo general

Diseñar, construir e implementar en un modelo funcional, un sistema que conjunte herramientas para la captura de imagen, asistiendo a un operador en la toma de video estable y captura de *time-lapse* con movimiento, orientado a cámaras fotográficas semiprofesionales.

1.3 Alcances

En esta tesis se presentan los datos relevantes relacionados a las necesidades y especificaciones del sistema, así como el diseño conceptual, diseño de configuración para finalizar la implementación en un modelo funcional y la evaluación del mismo a través de un conjunto de pruebas para determinar el desempeño y cualidades técnicas del sistema propuesto.

Siendo que el proceso de diseño puede tener múltiples variantes, ya que un mismo problema puede resolverse desde distintos puntos de vista y/o tomar en cuenta diversos factores, resulta útil establecer una serie de pasos para lograr alcanzar el objetivo planteado.

Los pasos propuestos para dar solución al tema en cuestión están basados en distintas publicaciones de autores reconocidos en el campo, como lo son “*Product design and Development*” [4] e “*Engineering Desing*” [5] junto con la metodología de diseño para ensamble de Boothroyd [6] y la metodología MVP (*Minimum Viable Product*) [7]. Esto complementado por la influencia en el proceso de diseño,

de múltiples profesores a lo largo de la carrera y la experiencia adquirida por el autor por el desarrollo de proyectos académicos y personales.

A continuación se presentan, cada uno de los pasos a seguir en el proceso de diseño en esta tesis:

- **Identificación de necesidades:** Establecer los elementos indispensables para el usuario con base en productos existentes, patentes, revisiones de productos, comentarios de usuarios y experiencias personales.
- **Generación de especificaciones:** Obtener parámetros medibles y cuantificables para dar solución a las necesidades del usuario.
- **Diagrama de bloques del Sistema:** Desarrollo de una visualización general del sistema a diseñar, considerando entradas, salidas y procesos internos, así como la identificación de los subsistemas que comprenden el funcionamiento.
- **Generación de concepto:** Se establece una idea general para dar una posible solución a las especificaciones previamente generadas.
- **Selección y evaluación de conceptos de solución:** Se identifican los conceptos físicos, matemáticos y científicos que aporten una posible solución a los procesos internos de los sistemas.
- **Diseño de configuración:** Una vez presentados los conceptos de solución para el sistema, se procede a realizar combinaciones entre los mismos para obtener una configuración óptima para la aplicación.
- **Diseño a detalle:** Cálculo y/o selección de componentes y piezas así como elaboración e implementación de algoritmos y/o controladores. Para el diseño mecánico se utilizará como apoyo la metodología para ensamble de Boothroyd con el fin de reducir piezas a manufacturar, así como facilitar el ensamble del sistema [6].

- **Fabricación de modelo funcional:** Construcción de un modelo a escala real que permita poner a prueba los conceptos seleccionados.
- **Pruebas:** Someter el sistema a ensayos cualitativos y cuantitativos para observar el desempeño y posibles fallas del mismo.

Durante los pasos del proceso de diseño se realiza la investigación pertinente para el desarrollo de cada rubro; ésta información se contiene en el apartado de “Antecedentes” (Sección 2). Se contempla el material mesográfico y bibliográfico de temas científicos relacionados, así como patentes y/o productos relacionados al campo; las respectivas referencias a los documentos consultados se presentan en el apartado de “Referencias” (Sección 14).

Al finalizar los pasos previamente planteados se tendrá un modelo funcional, así como información específica para generar un prototipo final y/o establecer los elementos a considerar en una futura iteración.

2. Antecedentes

2.1 Time-lapse

Una de las técnicas cinematográficas que se han popularizado en los últimos años es la conocida como *time-lapse* o lapso de tiempo, esta técnica consiste en reducir considerablemente la frecuencia de captura de fotogramas. Posteriormente, al reproducir estos fotogramas a velocidad normal, se crea la ilusión de que el tiempo transcurrido en la película parece ser más rápido y pausado.

Esta técnica es utilizada para capturar el movimiento de las nubes, astros y el crecimiento de plantas. En el campo de la ciencia se utiliza para registrar de forma visual experimentos, procesos y estudios.

Diversos profesionales de la fotografía han dedicado su carrera a determinar intervalos de tiempo apropiados para capturar diferentes escenarios; en el artículo “10 consejos para hacer time-lapse” [8] del fotógrafo Enrique Pacheco Toledo recomienda la utilización de ciertos intervalos. En la Tabla 1 se presenta el compendio de las recomendaciones de éste fotógrafo.

Tabla 1. Tabla de intervalos.

Situación	Intervalo [segundos entre fotogramas]
Nubes moviéndose despacio.	20
Nubes moviéndose deprisa.	10
Multitud de personas.	2
Trayectoria del sol en un día despejado.	30
Paisajes nocturnos, estrellas, luna.	5

Como se puede observar en la Tabla 1, los intervalos para las diferentes situaciones rondan de cinco segundos a medio minuto. Si se considera que la velocidad de un video estándar, para un *time-lapse*, es de veinticuatro fotogramas por segundo (en

el sistema PAL¹), además de que la duración estándar de los planos es de 10 segundos, se concluye que son necesarios 250 tomas para obtener 10 segundos de vídeo. Por lo tanto, se deberá presionar el disparador de la cámara cada 5 segundos durante 20 minutos aproximadamente, lo que puede resultar en una actividad sumamente tediosa.

Aunque el método descrito es una herramienta muy utilizada, la mayoría de las cámaras comerciales no cuentan con una función de fábrica que permita programar disparos por intervalos, por lo que es necesario que el usuario adquiera un dispositivo externo llamado temporizador, el cual envía una señal periódica a la cámara para activar el disparador.

Para lograr diferentes efectos visuales en el *time-lapse* es necesario desplazar y/o rotar la cámara, por lo que es necesario en algunos casos, que otro dispositivo controle el movimiento de forma coordinada a la frecuencia de disparo.

2.1.1 Control de Disparo

Hoy en día las cámaras digitales cuentan con diversos modos para activar la captura de imagen, existen tres sistemas que son recurrentes en las cámaras comerciales:

Captura Manual

Este modo de captura es el más utilizado por los usuarios ya que usa los distintos controles incorporados en el cuerpo de la cámara para configurar los parámetros de captura y posteriormente tomar la fotografía presionando el disparador. En la

¹ PAL (*Phase Alternating Line*): Estándar de reproducción de video, el cual fija la reproducción a una frecuencia de veinticuatro fotogramas por segundo [145].

Figura 2 se ilustra en (A) la ubicación del disparado en una de las cámaras de lentes intercambiables más populares y recomendadas [9] [10].

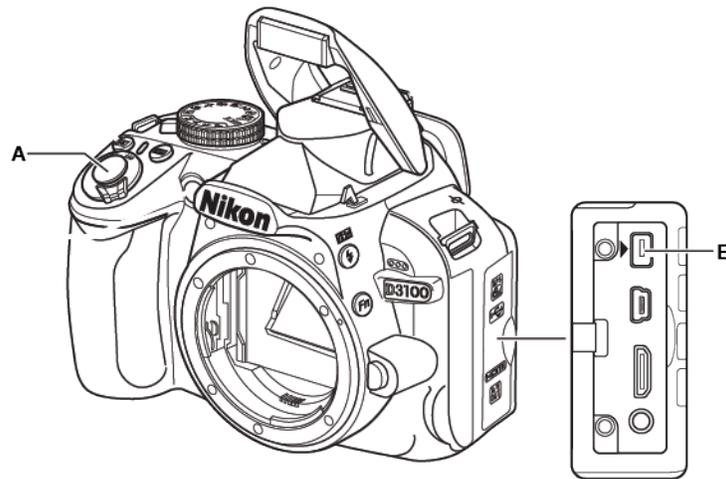


Figura 2. Cuerpo de cámara Nikon® D3100 [11]

Convencionalmente el botón de disparo funciona en dos fases, la primer fase se activa al presionar el botón hasta la mitad, con esto se acciona el enfoque y los parámetros automáticos (**balance de blancos**², **exposición automática**³, etc.), posteriormente presionando el botón por completo, se realiza el disparo. Para liberar a la cámara del estado de disparo basta con dejar de presionar el botón. La secuencia de disparo se muestra en la Figura 3.

El modo de captura manual resulta útil para el fotógrafo, ya que al estar montado el botón sobre el cuerpo de la cámara se tiene acceso a otros botones únicamente con cambiar el dedo de posición, de este modo se pueden cambiar los distintos parámetros de captura de forma rápida. Sin embargo resulta poco eficiente cuando

² **Balance de blancos:** Ajuste realizado por software que consigue una reproducción de color correcta sin mostrar dominantes de color.

³ **Exposición Automática:** Ajuste de la cantidad de luz que recibe el material fotosensible o el sensor de imagen para que se forme una imagen.

se desea hacer un número elevado de disparos como los necesarios para las técnicas de *time-lapse* o *stop motion*⁴.



Figura 3. Fases de disparo. [11]

Existen diversos intentos de automatizar éste método de disparo utilizando mecanismos de barras y/o levas [12] [13] e incluso existen patentes [14] que utilizan un sistemas de cables. Sin embargo, estos sistemas deben ser diseñados para la geometría de la cámara utilizada por lo que resulta complicado generalizar el sistema para cámaras de diferente gama o diferente fabricante. Se puede observar un ejemplo de dispositivo que utiliza este método en la Figura 4.



Figura 4. Mecanismo para control de disparo [12].

⁴ *Stop motion*: Es una técnica de animación que consiste en aparentar el movimiento de objetos estáticos por medio de una serie de imágenes fijas sucesivas.

Captura por control remoto o disparador externo

Actualmente no es necesario activar el disparador de forma manual, existen diversos dispositivos, disparadores y mandos a distancia, los cuales permiten realizar el disparo de dos etapas de forma remota; esta función es soportada gracias a un interruptor electrónico disponible en un conector llamado “terminal de accesorios” (página 19,

Figura 2, marca (B)), éste conector es utilizado como interfaz de controles a distancia como sistemas de GPS.

El disparo remoto es soportado por la mayoría de las cámaras de lentes intercambiables utilizando un cable de control. Desafortunadamente los conectores utilizados para el disparo externo tienen formas únicas determinadas por el fabricante de la cámara. Sin embargo, a pesar de la diferencia de conectores entre fabricantes, el funcionamiento interno del sistema se puede considerar estándar. Consiste en tres cables (tierra, enfoque y disparo) [15] y su funcionamiento se puede describir en tres pasos:

Paso 1: Al interconectar tierra y enfoque es activado el enfoque y los parámetros automáticos (**balance de blancos, exposición automática,** etc.)

Paso 2: A la conexión de tierra y enfoque se agrega el cable de disparo, esto activa la función de disparo en la cámara.

Paso 3: Se desconectan los tres cables para liberar a la cámara del estado de disparo.

En la Figura 5 se ilustra con un diagrama los tres pasos para el uso del disparo remoto.

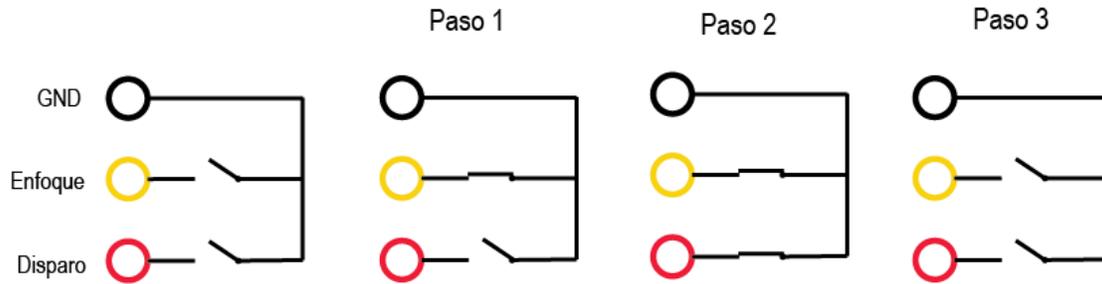


Figura 5. Diagrama de disparo remoto.

Dado que éste método de captura es sencillo de implementar, diversas empresas y desarrolladores independientes comenzaron a generar sistemas genéricos de control a distancia donde se utiliza un cable donde se tiene el conector específico del fabricante de un lado y del lado opuesto se utiliza un conector de audio de tres pasos tipo hembra de 3.5 [mm] para obtener una entrada estándar.

Existen diversas iniciativas de software y hardware libre que se han inclinado por este modo de control. Tales tecnologías como doc-diy [15], photoduino [16] y OpenMoCo [17], proponen diversos circuitos y listas detalladas de cámaras que soportan el sistema de disparo a distancia junto con el diagrama del conector del fabricante. En la Tabla 2 se presenta una compilación de los distintos conectores para disparo remoto, según el fabricante, modelos de cámaras y geometrías.

Tabla 2. Tabla de conectores de disparo remoto

Nombre	Fabricante y Modelos	Imagen
Generic	<p>Canon® EOS: 60D, Rebel: 300D, 350D, 400D, 450D, 500D, 550D, 600D, 1000D, 1100D, EOS Rebel: T1i, T2, T2i, T2ixt, T3, T3i, T4i, XT, XTi, XS, XSi, EKiss, KISS X2, Kiss X5, PowerShot: G10, G11, G12, G1 X. Contax: 645, N, N1, NX, N Digital. Hasselblad: H series. Pentax: K-5, K-7, K-m, K10D, K20D, K30, K100D, K110D, K200, K200D, K2000, MZ-6, ZX-L, x70, x90, *ist,*istD, *istDL, *istDL2, *istDs, *istDS2. Samsung: GX-1L, GX-1S, GX-10, GX-20, NX10, NX100, NX5. Sigma: SD1, SD9, SD10, SD14, SD15</p>	
Canon®	<p>Canon EOS: 1D Mark II, 1Ds Mark II, 1D Mark III, 1Ds Mark III, 1D Mark IV, 5D, 5D Mark II, 5D Mark III, 6D, 7D, EOS-1V/1VHS, EOS-3, EOS-D2000, 10D, 20D,30D, 40D, 50D</p>	
Conector 10 pines	<p>Nikon®: D1, D1H, D1X, D2, D2H, D2X, D2Xs, D2Hs, D200, D3, D3X, D3s, D4, D300, D300S, D700, D800, D800 E, F90x, F90, F100, F6, F5, N90s Fuji®: S3 Pro, S5 Pro Kodak: DCS-14N</p>	
MC-DC1	<p>Nikon®: D70s, D80</p>	
MC-DC2	<p>Nikon®: D90, D600, D3100, D3200, D5000, D5100, D5200, D7000, D7100</p>	
Panasonic®	<p>Panasonic®: DMC-GXS, DMC-GX1S, DMC-GX1XS, DMC-G1, DMC-GH1, DMC-G1A, DMC-G1R, DMC-G2, DMC-G2A, DMC-G2R, DMC-G10, DMC-GH2, DMC-GH2S, DMC-G3, DMC-GF1, DMC-G10, DMC-FZ50 series, DMC-FZ100, DMC-FZ150, DMC-FZ30 series, DMC-FZ20S, DMC-TS2A, DMC-TS2D, DMC-TS2S, DMC-TS2Y, LC-1,L-1, L-10</p>	
Olympus®	<p>Olympus®: E1, E3, E5, E10, E20,E30</p>	
Olympus® 2	<p>Olympus®: OM-D series, PEN series, E-P1, E-P2, E-P3, E-PL2, XZ-1, E300, E400, E420, E450, E510, E520, E600, E620, SP-510 UZ, SP-550 UZ, SP-560 UZ, SP-570 UZ, SP-590 UZ</p>	
Sony®	<p>Sony®: A100, A100k, A200, A300, A350, A500, A550, A560, A580, A700, A850, A900, SLT-A33, A35, A55, A65, A57, A77 Minolta®: Dimage: A1, A2, 3, 4, 5, 7, 7I, 7HI, 9, Maxxuum: 5D, 5xi, 7D, 7xi, 9xi, 505si, 600si, 700si, 800si, 807si</p>	

Sin embargo este método de captura sólo es útil para activar el enfoque y disparo, por lo tanto sí se desea modificar algún parámetro de captura (**ISO**⁵, **tiempo de exposición**⁶, **apertura de diafragma**⁷, etc.) será necesario utilizar los controles en el cuerpo de la cámara.

Captura por Software

Existe una tercer forma de control de captura la cual se realiza a través del puerto USB o MicroUSB con el que cuentan las cámaras y con ello establecer una comunicación entre una computadora y la cámara. En la Figura 6 se ilustra la conexión mediante un cable USB.

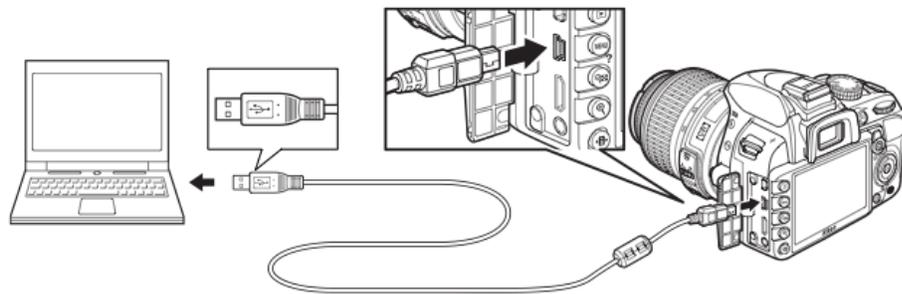


Figura 6. Conexión por cable USB [11].

Con ayuda de esta conexión y de un software proporcionado por el fabricante por un costo extra, es posible tener acceso a la memoria de la cámara para descargar imágenes, además de tener acceso a todos los controles de configuración de la cámara (control de disparo, ISO, apertura de diafragma, balance de blancos, etc.).

La captura por software proporciona un control completo sobre los parámetros de configuración de la cámara, desafortunadamente cada compañía cuenta con

⁵ **ISO:** Escala de sensibilidad fotográfica que define sensibilidad en función del tipo de emulsión fotográfica.

⁶ **Tiempo de exposición:** Hace referencia al periodo de tiempo durante el cual está abierto el obturador de una cámara fotográfica.

⁷ **Apertura de diafragma:** La capacidad de regular la cantidad de luz que entra a la cámara.

protocolos específicos. Algunas compañías cuentan con un protocolo para cada gama de productos, por lo que internamente la compañía puede llegar a tener de dos a tres protocolos distintos según las capacidades de la cámara o el año de fabricación.

Existen iniciativas para generar un protocolo estándar, siendo uno de ellos el Protocolo de Transferencia de Imágenes o PTP por sus siglas en inglés (*Picture Transfer Protocol*), propuesto en el año 2000 por la *Photographic and Imaging Manufacturers Association, INC.* [18], donde se establece un protocolo único para portar imágenes de una cámara fotográfica a una computadora. Sin embargo, en esta propuesta no se establece un protocolo para el control de disparo o modificación de parámetros de captura.

Finalmente existen diversas iniciativas de código abierto que se concentran en descifrar los protocolos de los fabricantes. Entre ellos se encuentra *digiCamControl* [19] una iniciativa escrita en C# que se enfoca en el protocolo de Nikon®, *PTPCanon* [20] un sistema basado en Linux para el control de cámaras Canon® y finalmente *gPhoto2* [21] un sistema implementado en Python que controla alrededor de 400 cámaras de distintos fabricantes.

2.1.2 Dispositivos Comerciales

Para establecer una visión general de los distintos dispositivos que se encuentran en el mercado, se presenta en la Tabla 3 algunos de los dispositivos más populares y representativos así como sus características y precios.

Tabla 3. Tabla de dispositivos comerciales para captura de *time-lapse*

Nombre	Imagen	Características	Precio [\$]
<p>Multi-Exposure [22]</p>		<p>Disparador remoto alámbrico, controla la frecuencia de disparo. Cuenta con un conector genérico para dar soporte a 7 fabricantes distintos.</p>	<p>\$ 34.95</p>
<p>Aputure Pro® Coworker II [23]</p>		<p>Disparador remoto inalámbrico, controla la frecuencia de disparo, el conector esta integrado al dispositivo por lo que existe un dispositivo distinto para cada fabricante.</p>	<p>\$ 44.95</p>
<p>Astro® [24]</p>		<p>Dispositivo que permite controlar el desplazamiento de la cámara sobre un eje rotacional seleccionando el rango de movimiento desde 0° a 360°, además de seleccionar el tiempo en el que la cámara recorrerá el rango de movimiento seleccionado. Junto con esto el dispositivo envía la señal de disparo remoto por lo que es posible controlar la frecuencia de disparo. Cuenta con un conector genérico para dar soporte a 7 fabricantes distintos.</p>	<p>\$ 279</p>
<p>Genie® [25]</p>		<p>Dispositivo que permite controlar el desplazamiento de la cámara sobre un eje rotacional y un eje lineal. Cuenta con una interfaz programable junto con un conector genérico para dar soporte a 7 fabricantes distintos.</p>	<p>\$ 890</p>

<p>Merlin® Head [26]</p>		<p>Sistema capaz de controlar el movimiento de la cámara en 2 grados de libertad, sin embargo no permite controlar el disparador de forma remota.</p> <p>\$ 372</p>
<p>Stage Zero 6' Pro® [27]</p>		<p>Kit para captura de <i>time-lapse</i>, cuenta con un disparador remoto genérico, se monta sobre un riel de dos metros para generar un movimiento lineal de la cámara. Es posibles establecer movimientos programados o manuales con ayuda de una palanca inalámbrica.</p> <p>\$ 1,500</p>

Los precios mostrados en la **Tabla 3** son obtenidos directamente del fabricante y se expresan en dólares, no se consideran gastos de importación, impuestos por aduana y/o cargos de mediadores.

Se puede observar que según las capacidades de los sistemas varían los precios de los productos, se toma como referencia que los dispositivos sin movimiento resultan más económicos en comparación de los productos que permiten desplazar el equipo fotográfico en uno o más ejes de rotación y/o traslación.

2.2 Estabilización de Imagen

Una cámara está expuesta a una serie de fuerzas durante su uso. Por costumbre se toma una videocámara con la mano, la cámara dispone de masa y un centro de gravedad enfocado a un punto en el interior de ésta. Lo anterior implica que cuando el operador realiza un movimiento en realidad se está perturbando la posición de la cámara en múltiples direcciones [28]. En la Figura 7 se muestra a la izquierda una imagen que ilustra algunos de los posibles movimientos y direcciones que puede sufrir la cámara mientras se encuentra en operación mientras que a la derecha se ilustra la rotación de la cámara con respecto a su centro de masa.



Figura 7. Posibles movimientos de la cámara [28]

En el mundo de la fotografía, las tomas en movimiento son elementos recurrentes, por lo cual estas tomas pueden ser afectadas de forma visual si no se tiene el cuidado para evitar vibraciones en la cámara. Las vibraciones reducen la calidad de la toma e incluso pueden ser un elemento distractor para la audiencia, al punto que para algunas personas esto causa mareos y/o dolores de cabeza.

Un estabilizador es un dispositivo que busca reducir las perturbaciones en la cámara aislando el movimiento del operador de la cámara o alterando física y/o digitalmente la posición del cuadro.

Incluso antes de que Garret W. Brown solicitara una patente de un *SteadyCam* en 1977 [29], hubo una serie de consideraciones sobre la compensación de las vibraciones que se producen mientras se sujeta la cámara. Con el paso de los años se ha modificado la geometría de la cámara para mejorar la forma en la que se sujeta, hasta el uso de trípodes que permiten mantener el equipo completamente estático.

El desarrollo de los estabilizadores de imagen integrados se inició en 1980. Canon fue el primer fabricante en introducir un lente intercambiable con estabilización de imagen en 1995. Actualmente se sigue innovando en el campo de las estabilización concentrándose en la implementación de dispositivos de visión en

drones teledirigidos, automóviles autónomos e incluso sistemas de seguimiento de misiles balísticos.

Las vibraciones presentadas en una cámara pueden actuar sobre cinco grados de libertad, tres rotacionales y dos lineales. Al igual que en la navegación se utilizan tres movimientos para definir la posición del equipo con respecto a sus ejes de rotación, en la Figura 8 se ilustran los movimientos rotacionales *pitch*, *roll* y *yaw* y los movimientos lineales vertical y horizontal.

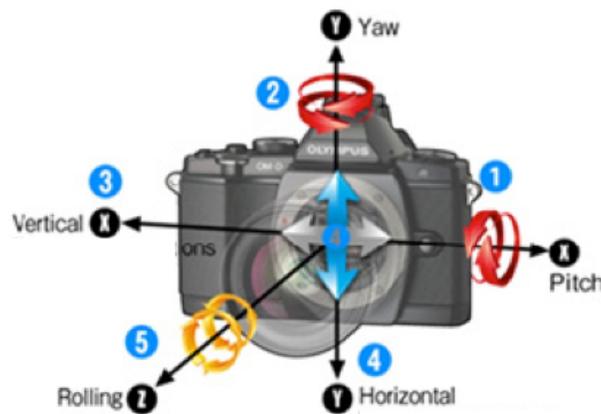


Figura 8. Movimientos de cámara [30]

Usualmente no se considera un tercer desplazamiento lineal ya que se logra la ilusión de desplazamiento utilizando elementos ópticos para lograr un acercamiento o alejamiento aplicando un *zoom*.

2.2.1 Tipos de estabilizadores de imagen

En este apartado se explica la funcionalidad básica de sistemas de estabilización, dividiendo éstos en cuatro categorías. Los ejemplos elegidos son representativos considerando la creciente diversidad de estabilizadores.

Estabilización por Compensación Óptica

La estabilización por compensación óptica es un sistema interno en los objetivos intercambiables. Consiste en un lente ubicado en la zona media del objetivo el cual se encuentra suspendido por un sistema resorte-amortiguador de tres puntos, lo que le permite desplazarse fuera del eje óptico original del objetivo mientras los elementos ópticos delanteros y traseros del objetivo permanecen estacionarios. En la Figura 9 se ejemplifica la disposición de los distintos lentes que componen el sistema.

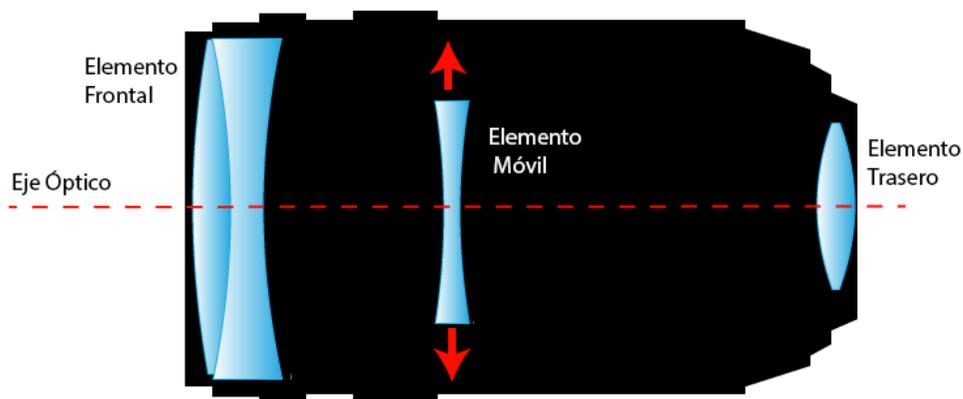


Figura 9. Elementos de compensación óptica [31]

El movimiento del lente suspendido es controlado por sensores inerciales tales como giroscopios y acelerómetros que detectan sutiles movimientos del objetivo, quienes activan pequeños actuadores que desplazan la lente flotante en dirección opuesta el movimiento para compensar los movimientos ocasionados por una mano temblorosa.

El sistema logra con éxito reducir las pequeñas vibraciones en los ejes de *pitch* y *yaw* sin posibilidad de corregir vibraciones en el eje *roll*, sin embargo resulta

deficiente en escenarios donde las vibraciones en el equipo son de una mayor amplitud como lo es subir escaleras o correr.

A lo anterior se suma el problema económico ya que el sistema de compensación óptica está incluido en cada lente aumentando el precio del producto, aunque puede ser benéfico si se considera que cada nueva lente que sale al mercado asegura tener el último sistema de estabilización. [31]

Estabilización por Compensación de Sensor de Imagen

La estabilización por compensación de sensor de imagen sustituye al sistema de compensación óptica ya que es un sistema embebido en la cámara y no en el lente. Para su funcionamiento las cámaras digitales cuentan con un sensor fotosensible que es el responsable de traducir la incidencia de la luz en la cámara a un formato imagen digital.

El sistema de compensación por sensor de imagen consiste en utilizar sensores inerciales tales como acelerómetros y giroscopios para determinar el desplazamiento del equipo y posteriormente con ayuda de pequeños actuadores orientar la posición del sensor fotosensible, modificando la incidencia de la luz en el sensor y estabilizando la captura final [30]. En la Figura 10 se muestra un dispositivo de estabilización de sensor comercial, así como sus ejes de acción.

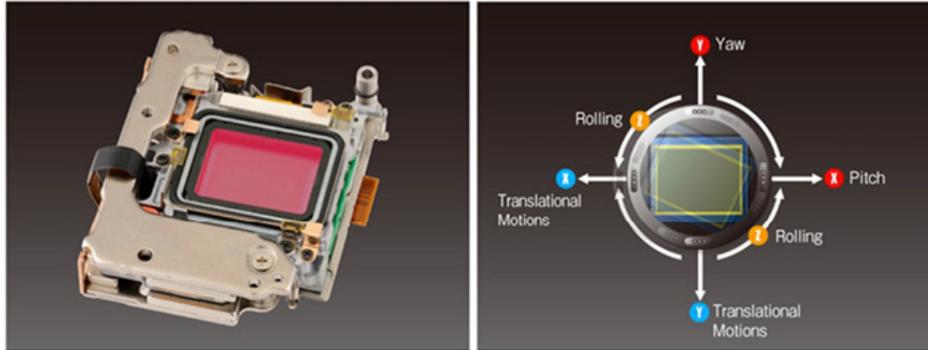


Figura 10. Unidad MSC IS desarrollada por Olympus®. [30]

La unidad presentada en la Figura 10 es un desarrollo de la empresa Olympus® el cual permite la reubicación del sensor de imagen en cinco grados de libertad, tres rotacionales y dos lineales, siendo éste el sistema más avanzado en estabilización de sensor.

El mayor problema del sistema se presenta en que el visor de la cámara carece de estabilización y solo se le puede utilizar en el modo de pantalla completa. Debido a que en éste caso es el sensor el que se mueve, la proyección de luz que realiza la lente debe ser más grande que lo normal, ya que en caso contrario el movimiento del sensor puede dejar partes del mismo sin exponer o sin ser impactado por la luz.

Estabilización Digital

La estabilización digital es un método que no involucra ningún elemento mecánico o móvil, y se considera un método de postproducción que altera del video por medio de software. Recordando que un video puede ser considerado como un grupo de fotografías que tienen una secuencia, es posible alterar cada uno de los fotogramas de la película para corregir las vibraciones.

Por medio de un software de procesamiento de imagen se toma la película y separa en sus múltiples fotogramas. El software toma como referencia el primer

fotograma y desplaza el siguiente fotograma de forma que se alinee con el primer fotograma y así se realiza con cada uno de los fotogramas. Para finalizar, el software recorta el espacio vacío que se genera al desplazar los fotogramas dejando como resultado una película con mínimas vibraciones [32]. En la Figura 11 se muestra el proceso que realiza el software.

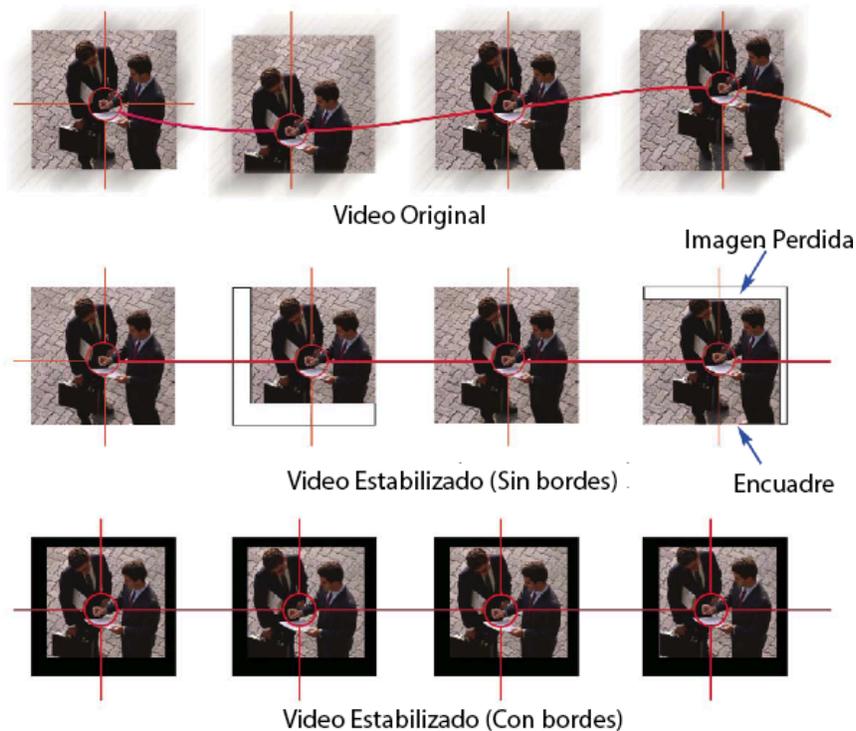


Figura 11. Proceso de estabilización digital [32].

Al ser un método de posproducción resulta sencillo de aplicar, sin embargo resulta contraproducente para la calidad del video al reducir el tamaño final de la imagen. Para solucionar el problema se proponen dos opciones, bien se escala el vídeo para que sea más grande y llene el espacio faltante perdiendo calidad en la imagen o se graba a un tamaño mayor del necesario y luego se utiliza la resolución deseada [33].

Estabilización Mecánica

Ésta es probablemente la forma más antigua para reducir el movimiento de la cámara y tiene un efecto sobre todo el dispositivo de captura, no sólo algunas partes del mismo. Se puede utilizar para cámaras fotográficas y videocámaras. La forma más antigua y por lo general más barata de apoyar a las cámaras es un trípode o monopié. Sin embargo, la vibración de la cámara en el trípode también puede ocurrir debido a los movimientos mecánicos dentro de la cámara (**espejo de retorno rápido**⁸ y **cortinilla del obturador**⁹). También hay otros dispositivos tales como los *Steadicam* o estabilizadores giroscópicos.

Un *steadicam* es un dispositivo mecánico que aísla el movimiento del operador desplazando el centro de masa de la cámara con ayuda de un sistema de contrapesos para crear una mayor resistencia a la rotación. En la Figura 12 se puede observar el desplazamiento del centro de masa al utilizar un *steadicam*.

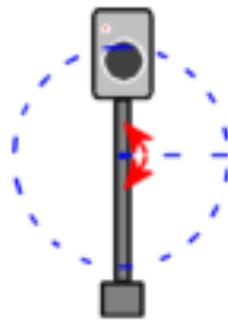


Figura 12. Efecto de SteadiCam [28].

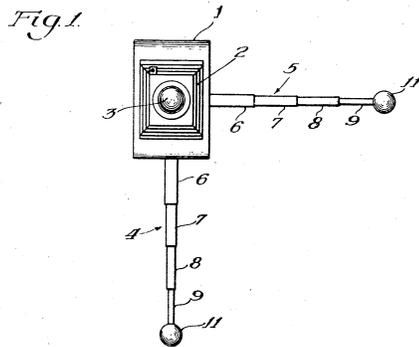
Al ser un sistema completamente mecánico diferentes fabricantes se han dado a la tarea de generar múltiples configuraciones. En 1941 se patenta el primer

⁸ **Espejo de retorno rápido:** Para dirigir la imagen capturada por el lente al visor o mirilla se utiliza el reflejo en un espejo a 45°, en el momento del disparo se abre el paso de luz hacia la placa fotosensible desplazando el espejo y regresándolo a su posición original en fracciones de segundo.

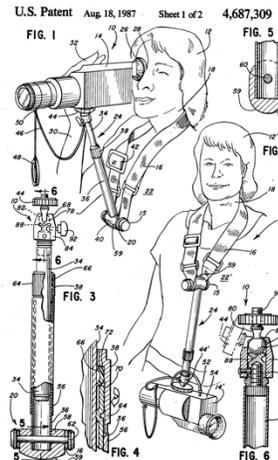
⁹ **Cortinilla del obturador:** Mecanismo interno que permite controlar la entrada de luz a la placa foto sensible.

“Estabilizador para Cámaras de mano” [34] y en 1977 aparece la primer patente con el nombre de *SteadyCam* por Garret W. Brown [29]. En la Figura 13 se presentan distintas configuraciones de estabilizadores de imagen, todas las imágenes presentadas son obtenidas de patentes concedidas.

April 22, 1941. R. F. PYZEL 2,239,201
 STABILIZER FOR HAND CAMERAS
 Filed Oct. 10, 1930

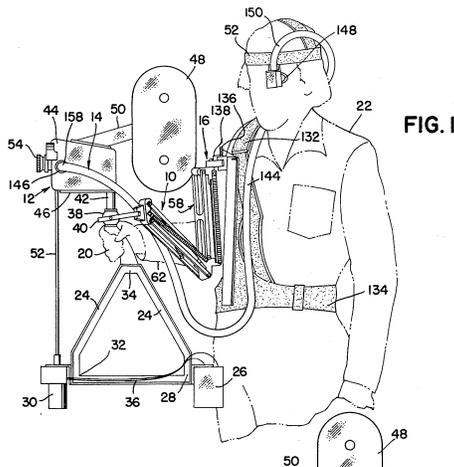


Estabilizador para cámara de mano [34]

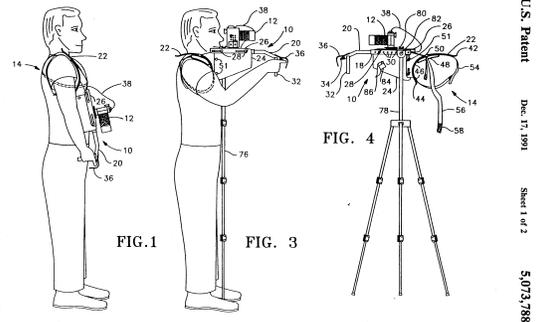


Estabilizador de cámara de video [35]

U.S. Patent April 12, 1977 Sheet 1 of 3 4,017,168



Equipo de ayuda para captura de video en movimiento [29]



Soporte para cámara [36]

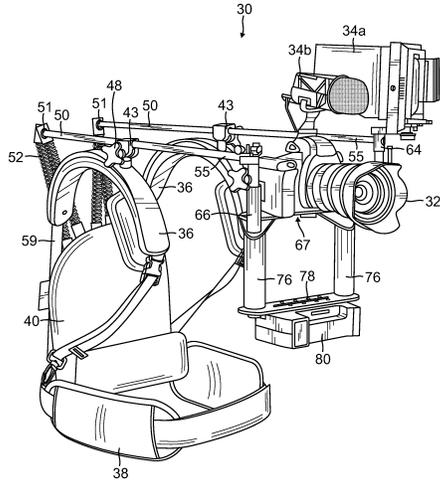


FIG. 1

Sistema para estabilización de cámara [37]

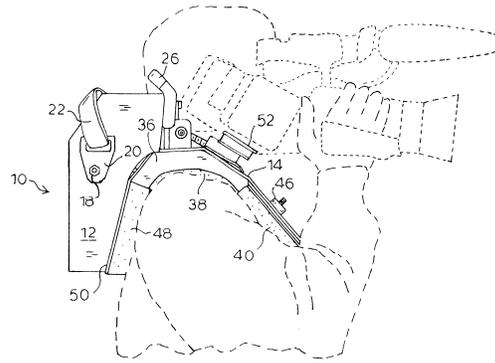


FIG. 2

Plataforma de hombro para cámara [38]

U.S. Patent Oct. 31, 1995 Sheet 1 of 5 5,462,214

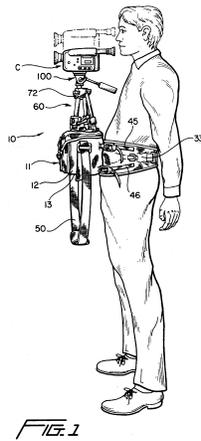
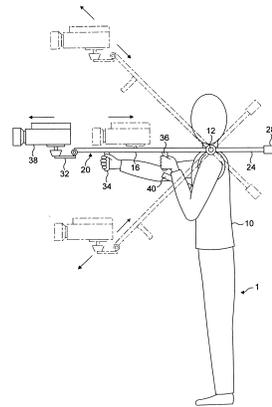


FIG. 1

Conjunto de soporte de la cámara [39]



Aparato para el soporte y movimiento de cámara [40]

Figura 13. Configuraciones de estabilizadores mecánicos.

Gracias a estos diagramas de patentes se puede observar que la mayoría de los sistemas aumentan los puntos de apoyo de la cámara, ya sea apoyándose de los hombros como los sistemas “Plataforma de hombro para cámara” y “Sistema para estabilización de cámara” u otras secciones del cuerpo del usuario como la cadera en el sistema “Conjunto de soporte de la cámara”. Otros además de alojar la cámara permiten sostener más equipo, ya sean luces o micrófonos como “Equipo

de ayuda para captura de video en movimiento” y “Sistema para estabilización de cámara”.

El equipo “Soporte para cámara” destaca al ser un sistema que puede portar el usuario además de ser alojado por un tripié facilitando la transición de la cámara de un lugar a otro.

Es necesario señalar que los sistemas aquí presentados tienen como concepto base el uso de contrapesos mecánicos, por lo que requieren completamente de la pericia del camarógrafo para lograr las tomas deseadas, siendo que el equipo de estabilización limita el movimiento del operador a tal grado que la complejidad de algunos dispositivos requieren de capacitación especializada para poder operar el sistema correctamente, o es necesario un segundo sujeto que oriente al operador ya que el primero es incapaz de girar el torso para ver obstáculos [41]. En la Figura 14 se observa una fotografía tomada durante el rodaje de una película donde se observa la incapacidad del operador para visualizar distintos obstáculos y la necesidad de un segundo sujeto de apoyo.



Figura 14. Operador y sujeto de apoyo [41]

Para dar mayor libertad al operador se utilizan estabilizadores giroscópicos, estos utilizan acelerómetros y giroscopios para determinar la posición de la cámara y

corregir ésta con actuadores en los ejes *pitch*, *roll* y *yaw*. Es común encontrar que los sistemas de estabilización se concentren en estos tres movimientos, como en las patentes “*Three-axis remote camera head*” [42] y “*Camera head with pan, roll and tilt movement*” [43] ambas de Leonard T. Chapman. En estas se muestran configuraciones de marcos que permiten el libre movimiento en los tres ejes rotacionales. En la Figura 15 se muestran ilustraciones obtenidas de cada una las patentes respectivamente.

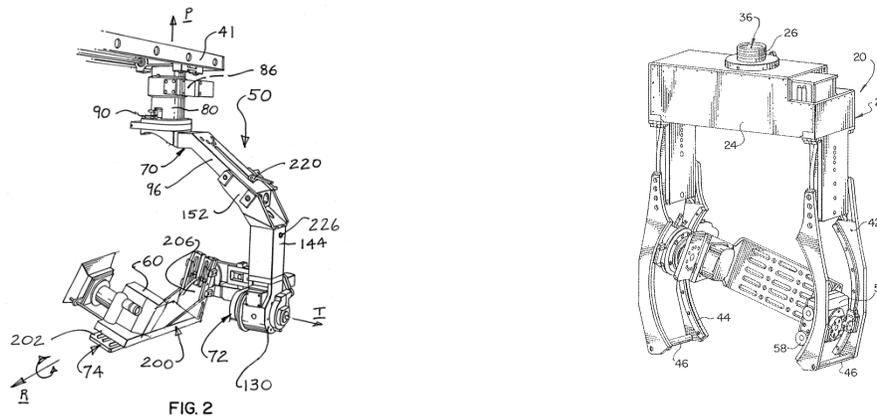


Figura 15. Sistemas de movimiento en 3 ejes. [42] [43]

Los sistemas giroscópicos al tener retroalimentación permiten al operador alcanzar ángulos de visión complejos sin perder movilidad además de hacer el sistema simple, sin tener necesidad de una capacitación previa.

2.2.2 Dispositivos Comerciales

En la Tabla 4 se presentan algunos de los dispositivos disponibles en el mercado, junto con una imagen, características y precios. Los ejemplos elegidos son representativos considerando la creciente diversidad de estabilizadores, esto con la finalidad de establecer una visión general del mercado y comparar con las patentes encontradas.

Tabla 4. Tabla de Dispositivos Comerciales para Estabilización de Imagen.

Nombre	Imagen	Características	Precio
<p>Rhino® Steady [44]</p>		<p>Dispositivo mecánico que utiliza contrapesos y permite sostener el equipo con una sola mano.</p>	<p>\$325.00</p>
<p>Fig Rig® [45]</p>		<p>Anillo estabilizador que permite soportar el equipo de video además de accesorios extra, es necesario sujetar el dispositivo con ambas manos.</p>	<p>\$320</p>
<p>Glidecam® XR-2000 [46]</p>		<p>Equipo de estabilización por contrapeso que permite sujetar el equipo con una sola mano.</p>	<p>\$289</p>
<p>GH4® Run'n'Gun Kit [47]</p>		<p>Equipo de estabilización de 2 puntos de apoyo para cámaras de lentes intercambiables.</p>	<p>\$900</p>

<p>Rhino® Rig Full Kit [48]</p>		<p>Equipo de estabilización por soporte de hombro genérico para cámaras de lentes intercambiables.</p> <p>\$1200</p>
<p>GH4® Recoil Kit [49]</p>		<p>Equipo de estabilización por soporte de hombro profesional para apoyo de cámaras de lentes intercambiables, además de soporte de accesorios.</p> <p>\$3,300</p>
<p>AllSteady-7® [50]</p>		<p>Estabilizador giroscópico de 3 ejes.</p> <p>\$4,000</p>
<p>Steadicam Archer® [51]</p>		<p>Sistema de estabilización profesional.</p> <p>\$30,000</p>

Los precios mostrados en la **Tabla 4** son obtenidos directos del fabricante y se expresan en dólares, no se consideran gastos de importación, impuestos por aduana y/o cargos de mediadores.

Una vez más se puede observar una variación considerable de precios, según las capacidades que ofrecen los sistemas donde destacan los puntos de apoyo del sistema, materiales y tecnología de estabilización.

2.3 Motores sin escobillas

Los motores sin escobillas o BLDC (por sus siglas en inglés *BrushLess Direct Current*) se utilizan en industrias como la automotriz, aeroespacial, electrodomésticos, de consumo, médicos, equipos industriales de automatización e instrumentación.

El motor BLDC es un motor síncrono de corriente alterna con imanes permanentes en el rotor y un estator bobinado. Los imanes permanentes crean el flujo en el rotor y los devanados del estator energizados crean polos electromagnéticos. El rotor es atraído por la fase de estator energizado. La Figura 16 es una ilustración simplificada de los elementos que constituyen un motor BLDC, en la cual se puede observar el rotor de imán permanente y el embobinado de alambre que conforman los polos del estator [52] [53].

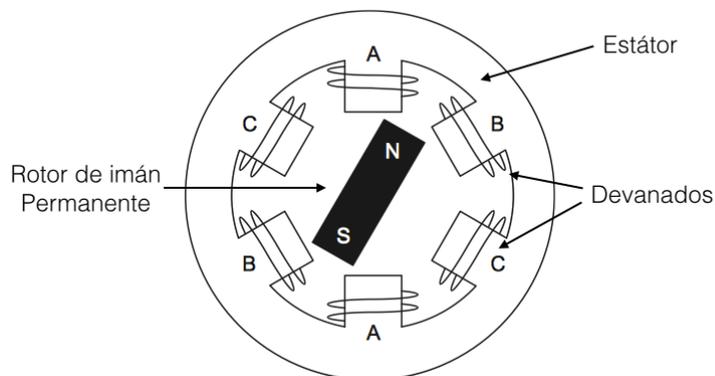


Figura 16. Esquema de BLCD. [53]

Internamente un motor BLDC está conformado por tres circuitos electromagnéticos conectados en un punto común. La mayoría de los motores

BLDC tienen una topología de tres fases con conexión estrella. Un motor con esta topología es impulsado por la activación de al menos dos fases a la vez.

El control de velocidad y posición requiere de la manipulación en la dirección de la corriente en las diferentes fases además tener conocimiento de la posición del rotor para determinar que devanado energizar.

Como su nombre lo indica, los motores BLDC no utilizan cepillos o escobillas para la conmutación; en cambio, están electrónicamente conmutados. Los motores BLDC tienen muchas ventajas sobre los motores de corriente directa con escobillas y motores de inducción [54] [55] [56].

En la **Tabla 5** se muestran una lista comparativa entre motores de DC y motores BLDC obtenida del “*Application Note: Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*” de Microchip Technology Inc.

Tabla 5. Tabla de comparación motor BLDC y motor DC [54]

Característica	Motor BLDC	Motor DC
Computación	Conmutación electrónica requiere de retroalimentación de posición.	Conmutación por escobillas
Mantenimiento	Menos requerido debido a la ausencia de escobillas.	Se requiere mantenimiento periódico.
Vida	Larga.	Corta.
Relación Velocidad/Par	Permite el funcionamiento en todas las velocidades con carga nominal.	A velocidades más altas, aumenta la fricción del cepillo, lo que reduce el par útil.
Eficiencia	No hay caída de tensión en los cepillos.	Moderada.
Potencia de salida /Tamaño constructivo	Tamaño reducido debido a las características térmicas superiores. Debido a que un BLDC tiene los devanados en el estator, que está conectado al casco, la disipación de calor es mejor.	El calor producido por la armadura se disipa en el espacio de aire, aumentando así la temperatura lo que limitan el tamaño de la salida de potencia.
Inercia	Baja, debido a que tiene imanes permanentes en el rotor. Esto mejora la respuesta dinámica.	Superior inercia del rotor que limita las características dinámicas.
Rango de velocidad	No hay limitación mecánica impuesta por los cepillos.	Limitaciones mecánicas de los cepillos.
Generación de Ruido Electrónico	Bajo.	Arcos en los cepillos generarán ruido eléctrico en el equipo cercano.
Costos de Manufactura	Ya que tiene imanes permanentes, los costos de construcción son más altos.	Bajo.
Control	Complejo y costoso.	Simple y barato.
Requerimientos de Controlador	Un controlador es siempre necesaria para mantener el motor en marcha. El mismo controlador puede ser usado para el control de velocidad variable.	No se requiere ningún controlador para la velocidad fija; un controlador sólo es necesario si se desea velocidad variable.

Control de Conmutación Trapezoidal

Un motor BLDC es impulsado por cambios de tensión asociados a la posición del rotor. Tales cambios deben aplicarse adecuadamente a las fases activas del sistema de bobinado trifásico, de modo que el ángulo entre el flujo del estator y el flujo del rotor se mantiene cerca de 90° para obtener el máximo par. Por lo tanto, el controlador necesita algún medio para determinar la orientación o posición del rotor (con respecto a las bobinas del estator). La clave para la conmutación BLDC es detectar la posición del rotor y energizar las fases que producen la mayor cantidad de par. Usualmente se utilizan sensores de efecto Hall para detectar la posición del rotor de imán permanente. El proceso de conmutación de la corriente a través de dos fases para cada 60 grados de rotación eléctrica se denomina control trapezoidal [53] [57].

Para este tipo de control se suministra energía al motor desde un inversor trifásico. Con cada 60 grados eléctricos, la corriente de la fase de conmutación debe ser actualizada por lo que se requieren seis pasos para completar un ciclo eléctrico; sin embargo, un ciclo eléctrico no puede corresponder a una revolución mecánica completa del rotor. El número de ciclos eléctricos a repetirse para completar una rotación mecánica está determinada por los pares de polos del rotor. Para cada uno de pares de polos, se completa un ciclo eléctrico. En la Figura 17 se ilustra la secuencia trapezoidal para cada una de las fases así como la dirección de la corriente dentro del arreglo estrella .

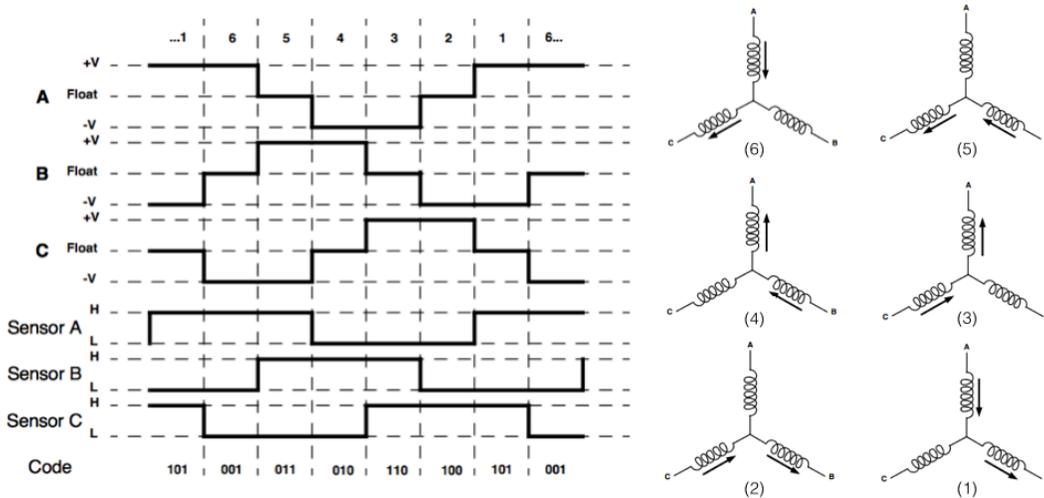


Figura 17. Secuencia trapezoidal [54] [52].

En la Figura 18 se muestra un diagrama de bloques que ilustra un motor BLDC controlado por un microcontrolador, un driver y alimentado por un inversor trifásico de seis pasos. Se puede observar el uso de sensores de efecto Hall como *encoder* para detectar la posición del rotor de imán permanente.

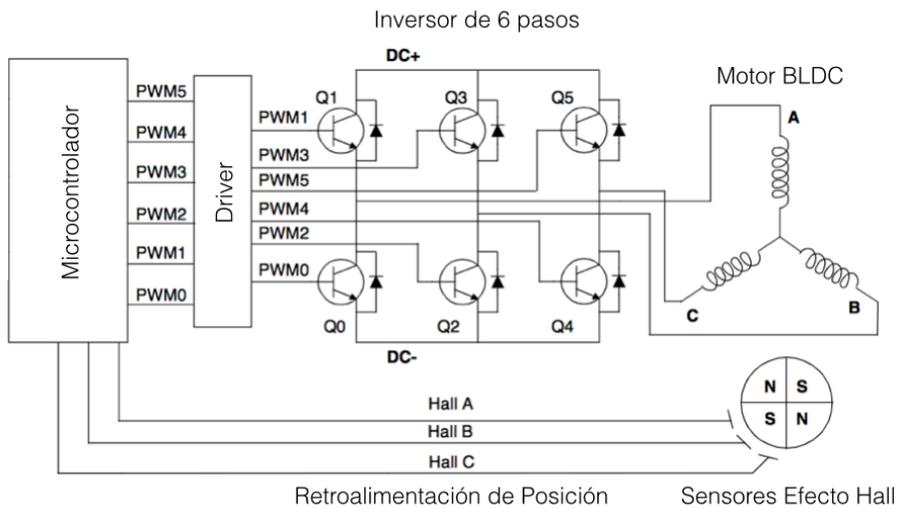


Figura 18. Diagrama de bloques control de BLCD. [52]

Es apropiado señalar que el control trapezoidal puede ser aplicado con cualquier sistema que permita controlar máquinas combinacionales o de estados, no es necesario el uso de un microcontrolador.

La forma de onda de corriente para cada devanado es una escalera de corriente positiva, cero y corriente negativa. Los sistemas de accionamiento-trapezoidales actuales son populares debido a la simplicidad de sus circuitos de control, pero sufren de un problema de ondulación del par durante la conmutación, sin embargo al estar excitadas la mayor parte del tiempo dos bobinas se considera un par constante. [58]

Control de Conmutación Sinusoidal

La conmutación trapezoidal es inadecuada para proporcionar un control suave y preciso de motores sin escobillas, en particular a bajas velocidades. La conmutación sinusoidal resuelve tal problema al excitar a las tres bobinas del motor con tres corrientes de forma sinusoidal. Las fases relativas de tales corrientes se eligen de modo que la resultante de las fuerzas electromagnéticas actúan para hacer girar al rotor, eliminando los picos de rizado y de conmutación de par asociadas con la conmutación trapezoidal. Sin embargo, ya que la excitación de las bobinas varia, el par que aporta el motor es variable.

Dado que las corrientes de los devanados se deben combinar para producir un vector, las corrientes en cada devanado deben simular dos ondas sinusoidales con fase desplazada en 120 grados una de la otra. La corriente en el tercer devanado del motor es la suma negativa de las corrientes en los devanados controlados.

Como resultado de la conmutación sinusoidal se obtiene un movimiento suave que es generalmente inalcanzable con la conmutación trapezoidal. Sin embargo, solo es

eficaz a velocidades bajas ya que a velocidades altas la repuesta del rotor ante la excitación genera vibraciones no deseadas. [58]

Requerimientos de Controlador

Una vez presentados algunos de los métodos de control más utilizados se debe comprender como es que estos sistemas de control afectan al sistema de procesamiento, por lo que se presenta en la Tabla 6 una lista de tipos de control para motores BLDC y los requerimientos de procesamiento para su implementación en microcontroladores.

Tabla 6. Requisitos de un uC para control de BLDC. [58]

Tipo de Control	Requisitos del uC
Trapezoidal con uso de driver	Captura de entrada de alta velocidad.
Sinusoidal con uso de driver	Captura de entrada, Timers y PWM
Control simplificado por vectores	Captura de entrada, de interrupción, temporizador PWM con tiempo muerto para el control del motor trifásico
Control de Vectores (FOC)	Alto rendimiento MCU de alta velocidad, ADC, Captura de entrada por interrupción, temporizador PWM con tiempo muerto para el control del motor trifásico
Control sin sensor trapezoidal unidad	Captura de entrada, PWM
Control vectorial sin sensores	Alto rendimiento MCU + MAC de alta velocidad, ADC, interrupción, PWM.

Por otro lado, se debe mencionar que los sensores para la retroalimentación de la posición del rotor pueden ser eliminados, reduciendo el costo y el tamaño de la aplicación. Para aquellas aplicaciones en las que sólo se requiere control de velocidad variable y la dinámica del sistema no es particularmente exigente, entiéndase exigente como cambios de par drásticos a altas velocidades. Existen muchas categorías y estrategias de control sin sensores, sin embargo estos

métodos sin sensores de respaldo reducen el rendimiento al trabajar a velocidades limitadas además de transformar el control en un sistema de lazo abierto [57].

Inversor de Tres Fases

Ya que los motores BLDC requieren de una señal trifásica para poder ser controlados, y un sistema lógico digital es incapaz de generar esta señal, se utilizan los inversores trifásicos; un inversor tiene como función cambiar un voltaje de corriente directa de entrada en un voltaje corriente alterna simétrico a la salida, procurando que éste posea la magnitud y frecuencia deseada por el usuario.

Existen múltiples tipos de inversores sin embargo para el control de motores BLDC se encuentra normalmente el inversor de seis pasos, en la Figura 19 se muestra el diagrama básico de un inversor de seis pasos. [53]

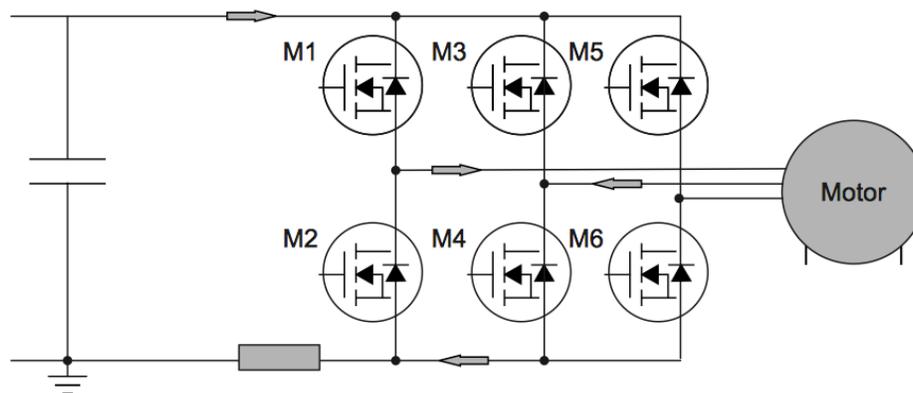


Figura 19. Inversor de seis pasos. [53]

El inversor de seis pasos utiliza tres inversores monofásicos independientes, cada uno de ellos produce una tensión de salida que tiene su frecuencia desplazada 120° con respecto a las demás salidas. Este tipo de inversores trifásicos solo son preferibles en aquellas condiciones donde se necesite acceso a las tres fases. Cada inversor monofásico produce un voltaje de corriente alterna, esto se logra

empleando interruptores tipo MOSFET o IGBT, para altas potencias se utilizan tiristores GTO o GCT. Este tipo de inversores tiene la desventaja de que requiere de seis entradas de control para controlar las tres diferentes fases. La salida de este tipo de inversor es una salida trapezoidal, esto quiere decir que únicamente puede alcanzar tres valores a la salida: V_{cc+} , tierra y V_{cc-} . En la Figura 20 se muestra la forma de onda escalonada para cada una de las fases así como su relación con el par del motor. [59] [60]

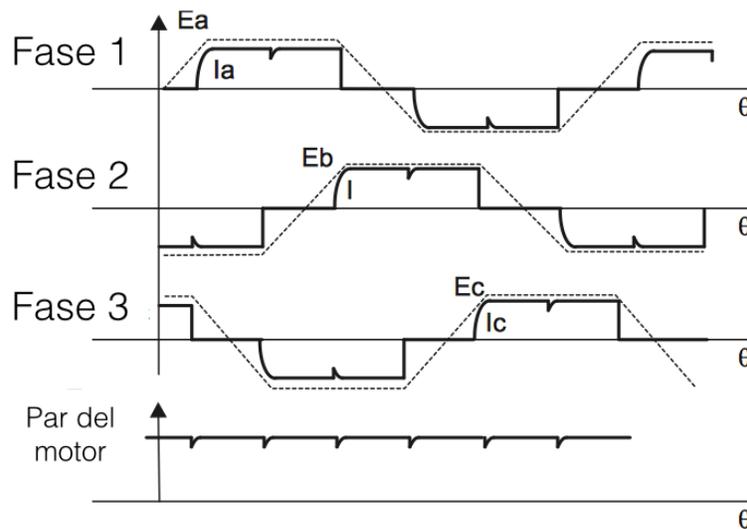


Figura 20. Gráfico de secuencia trapezoidal. [53]

Para obtener una señal próxima a una sinusoidal se emplea el uso de PWM, a través del ancho de pulso y el cambio de corriente positiva a negativa que ofrece el inversor es posible crear una relación y aproximar la señal de salida a una sinusoidal utilizando PWM como se muestra en la Figura 21.

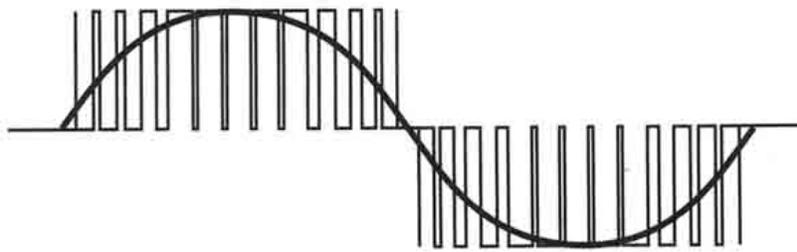


Figura 21. Inversor con entrada PWM. [60]

2.4 Industria de la Programación Móvil

Actualmente, la industria de la programación móvil se encuentra en crecimiento acelerado, transformando a las empresas de aplicaciones móviles en industrias de impacto mundial [61]. Este mercado tuvo un incipiente inicio en 2007, sin embargo en 2012 se estimó el valor de la industria en 1,200 millones de dólares a nivel global y un año después, incrementó a 25 mil millones de dólares, casi 20 veces más. Por otro lado, se estima que para el 2018 este mercado valdrá alrededor de 92 mil millones de dólares y empleará a millones de personas en un mundo en donde casi la mitad de la población a nivel mundial tendrá acceso a internet como se menciona en el artículo “Nada detiene el crecimiento de las aplicaciones móviles en México” [62].

A nivel mundial México se considera un nicho de oportunidad en el sector de la programación móvil. A pesar de que el mercado mexicano aún no está plenamente consolidado, México es uno de los mercados con más crecimiento a nivel mundial, esto es indicador de la importancia del sector para éste país en vías de desarrollo. En la Figura 22 se muestran estadísticas extraídas del “*Global Digital Statistics*” [63].



Figura 22. Estadísticas de la industria móvil en México. [63]

Como se puede ver en la imagen anterior, el impacto poblacional que tiene la telefonía móvil así como el uso de redes sociales en México es significativo, dando lugar a diversas ventajas que favorecen la relación entre el usuario y su teléfono móvil :

- **Ubicuidad:** Aunado a la reducción de costos, los teléfonos inteligentes ocupan uno de los mercados mas importantes en el consumo global. Por lo tanto un gran sector de la población utiliza aplicaciones telefónicas o tabletas electrónicas.
- **Multiplicidad de posibilidades:** Los teléfonos inteligentes se pueden considerar como pequeñas computadoras con múltiples periféricos y ahora son adecuados para tareas que previamente han sido restringidas a las computadoras portátiles y de escritorio. Las aplicaciones de teléfonos inteligentes son utilizadas por las empresas para promover su marca o producto, o para facilitar el acceso a sus productos existentes. En la actualidad se ven muchos más casos de uso, por ejemplo, nuevos productos basados en las aplicaciones, salud móvil, venta móvil o aplicaciones que ayudan a mejorar la eficiencia de trabajo dentro de una empresa.
- **Ubicuidad de las tiendas de aplicaciones:** Los teléfonos inteligentes dependen de tiendas de aplicaciones por lo que los usuarios están constantemente actualizando o buscando nuevas aplicaciones para sus teléfonos.
- **Experiencia de usuario:** Las aplicaciones ofrecen una experiencia de usuario que los sitios web móviles o *widgets* son incapaces de proporcionar. Un ejemplo son las notificaciones al usuario, una aplicación tiene acceso al hardware del teléfono móvil por lo que puede enviar notificaciones al usuario en todo momento involucrando texto, sonido, incluso vibraciones, mientras que una web únicamente tiene acceso al equipo por medio de software únicamente cuando el usuario accede a ella.

- Proximidad a los clientes:** Los dispositivos móviles, especialmente teléfonos inteligentes, son mucho más personales e íntimos que un dispositivo portátil o de escritorio. La mayoría de los usuarios de teléfonos procuran mantener el dispositivo al menos a un metro de distancia las 24 horas. Esto resulta atractivo para sectores que buscan colocar sus productos y servicios cerca de los consumidores [62].

Para poder entender el comportamiento del mercado es necesario observar su distribución con base en los diferentes sistemas operativos. Según la “*Market Share Statistics for Internet Technologies*” [64] se observa el desempeño de los múltiples sistemas operativos dada su cuota de mercado para el 2014, mostrando el desempeño de cada sistema operativo en la Figura 23.

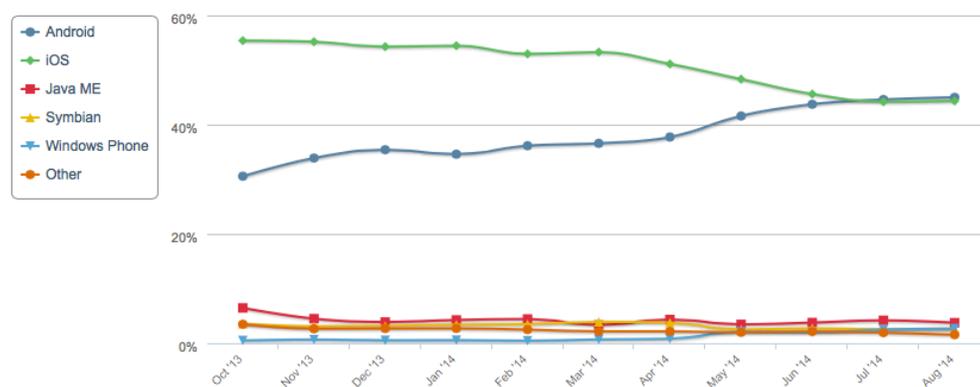


Figura 23. Cuota de mercado de sistemas operativos 2014. [64]

Sin embargo aunque en los datos globales se observe un dominio entre iOS® y Android® es necesario observar cual es la fragmentación del mercado según las múltiples versiones de los sistemas, esto con el fin de visualizar el mercado activo del los múltiples sistemas considerando que versiones antiguas de ciertos sistemas han dejado de tener soporte por los fabricantes y/o desarrolladores. En la Figura 24 se muestra una gráfica con el porcentaje de cuota de mercado según las versiones de los dispositivos.

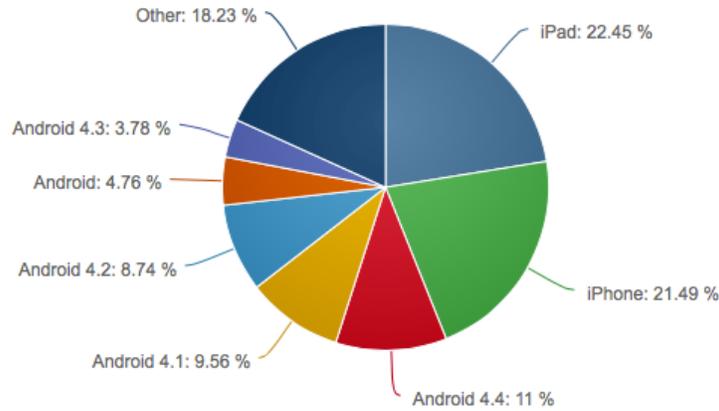


Figura 24. Fragmentación del mercado móvil. [64]

Se puede observar en el gráfico que el mercado se concentra en las múltiples versiones de iOS® predominado el iPad® seguida por el iPhone® y múltiples versiones de Android® 4. Como consecuencia de la fragmentación del mercado no es conveniente dedicarse al desarrollo de una sola plataforma, al contrario una aplicación móvil deberá ser soportada por múltiples plataformas para alcanzar un impacto amplio en mercado y por consiguiente un impacto en un mayor sector de la población.

3. Identificación de Necesidades y Especificaciones

3.1 Identificación de Necesidades

Para determinar las necesidades de un sector de usuarios, se realiza una investigación del estado del arte así como las diferentes patentes y productos disponibles en el mercado, con el fin de establecer una visión general de las problemáticas que afrontan los usuarios de productos similares, ésta investigación se presenta en la sección 2.

Con el fin de recaudar mayor información del uso de diversos dispositivos se recurre a las reseñas de productos, o *product review*, evaluaciones de productos realizadas por usuarios y para usuarios, donde se realiza una crítica, se ponen a prueba y/o comparan productos con otros similares; ésto con el fin de presentar una opinión del producto e informar a otros usuarios las ventajas y desventajas de un artículo. Tales revisiones de producto se pueden encontrar en formatos escritos o de video.

A continuación se enumeran necesidades visualizadas a lo largo de la investigación antes planteada. Pueden existir otras necesidades en el campo de la fotografía y cinematografía sin embargo se consideran las más recurrentes. Para dar un orden a la redacción del documento se utiliza la nomenclatura N# para referirse a las diferentes necesidades.

N1. Soporte para múltiples equipos: Es común observar que los productos comerciales cuentan con juntas diseñadas para dar soporte a diversas marcas de equipos dando versatilidad al usuario e incrementando el numero de usuarios a los que se dirige el producto.

- N2. **Reducción de oscilaciones:** Existen diversos productos de bajo costo que no cumplen con el objetivo de reducir las perturbaciones, en el video “\$277 Fig Rig vs \$55 Spider Steady” [65] se observa que el sistema *Fig Rig* tiene una reducción casi nula de las perturbaciones por lo que el uso del producto es comparable a no utilizar ningún dispositivo.
- N3. **Capacitación mínima:** Como se menciona en el apartado 2.2.1, existen equipos que requieren de una capacitación previa o su manejo requiere de dos personas para su operación, esto se puede observar en el video de la NFTS (*National Film and Television School*) [66].
- N4. **Versatilidad:** Como se observa en los videos comparativos “*Handheld vs Shoulder Rig vs Steadicam*” [67] y “*Steadicam VS Flycam*” [68], al utilizar estabilizadores mecánicos, resulta complicado hacer tomas con movimientos verticales o acercar la cámara al piso, lo que reduce la cantidad de tomas posibles o versatilidad en el movimiento. En ese punto se hace referencia a todo aquello que puede afectar en una toma, ya sea la manipulación del aparato o interferencias del aparato con la toma.
- N5. **Ligero:** Algunos sistemas requieren de contrapesos para su funcionamiento sumado a esto el peso de la cámara y equipo extra lo cual puede acarrear trastornos musculoesqueléticos al operador. En la NOM-006-STPS-2000 [69] (Norma mexicana para condiciones de trabajo) en la sección de “Carga manual” se menciona que los trabajadores masculinos pueden cargar 50 [Kg], mientras que los menores de edad cargan 35 [Kg] y las mujeres 20 [Kg], sin embargo la Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el documento “Manipulación manual de cargas en el lugar de trabajo” menciona:

“... no existe un límite de peso para que una carga sea segura, pero un peso de 20-25 kg resulta difícil de levantar para la mayoría de las personas.” [70]

- N6. Sistema portable:** Algunas veces las tomas se realizan en bosques, montañas, lugares remotos y resulta complicado llevar equipos de grandes dimensiones o difíciles de empacar en una mochila.
- N7. Duración de baterías:** En general los sistemas electrónicos requieren baterías, dependiendo del uso que se le dé al equipo será el tiempo en el que podrá operar sin necesidad de recarga.
- N8. Campo visual del operador:** En muchas ocasiones el campo de visión del camarógrafo resulta fundamental siendo que deberá ser capaz de ver los obstáculos en su camino, para poder evitarlos y mantener la integridad del equipo como de sí mismo. En el video “*Steadicam Wipeout Fail*” [71], el operador cae al no poder visualizar un obstáculo en su recorrido.
- N9. Interfaz intuitiva:** Habitualmente los sistemas de *time-lapse* cuentan con interfaces complicadas o poco intuitivas que dificultan su uso, en el video “*Konova slider time lapse kit with motorized pan/tilt head REVIEW*” [72] se menciona la necesidad de un sistema sencillo aludiendo a aplicaciones móviles.

Debido a que se tienen múltiples necesidades se decide realizar un análisis para seleccionar las que se trataran en este trabajo, contemplando la importancia de la necesidad con relación a otras, según los alcances y tiempos de desarrollo del proyecto. En la Tabla 7 se presenta la tabla de relaciones entre necesidades, en esta se marca con negro aquellas necesidades que tienen relación y con blanco aquellas que tienen una relación casi nula.

Tabla 7. Tabla de relación entre necesidades.

	N1	N2	N3	N4	N5	N5	N7	N8	N9	Total de relaciones
N1										3
N2										7
N3										6
N4										5
N5										5
N6										4
N7										3
N8										2
N9										3

Una vez determinada las relaciones entre necesidades se puede observar que N2 , N3, N4 y N5 son las necesidades que se relacionan más con otras, por lo que a éstas se le dará mayor prioridad.

Por otro lado por cuestiones de alcance y tiempo de desarrollo del proyecto las necesidades N7 y N8 se consideran de baja relevancia para esta iteración en comparación a otras necesidades ya que se pueden contemplar como variables no fundamentales para las operaciones básicas del dispositivo.

3.2 Generación de Especificaciones

En esta sección se presentan en la Tabla 8 las especificaciones correspondientes al sistema para cada necesidad seleccionada, se presentan de forma descendente con respecto a los puntajes obtenidos en la Tabla 7.

Para determinar las especificaciones se emplea un método jerárquico de necesidades, de lado izquierdo se inicia la necesidad primaria (idea general), a partir de esta necesidad se busca dividir o entender que posibles escenarios o características pueden afectar la necesidad primaria. Con esto se obtienen

múltiples necesidades secundarias (ideas particulares), para finalmente obtener una especificación o recomendación de diseño dadas por el autor; entendiéndose por especificación a un parámetro medible o cuantificable, mientras que una recomendación de diseño son ideas o elementos generados en el proceso que pueden ayudar a atacar la problemática o ayuden a restringir el diseño, las cuales se pueden o no tomar en cuenta para el diseño final.

Tabla 8. Determinación de especificaciones.

Necesidades Primarias	Necesidades Secundarias	Recomendación para el diseño	Especificaciones	Sistema de Medición
Reducción de oscilaciones (N2)	Agarre robusto	Uso de medidas antropométricas para el diseño del soporte		
		Uso de materiales que aporten confort		
		Uso de materiales que eviten el deslizamiento		
	Bajo peso	Uso de materiales ligeros	Peso del dispositivo	Kg
	Múltiples puntos de apoyo	Uso de múltiples puntos de apoyo		
	Reducción de las perturbaciones naturales del cuerpo		Reducir oscilaciones naturales (oscilaciones del cuerpo humano) [32].	Hz
Capacitación Mínima (N3)	Fácil de sujetar	Uso de medidas antropométricas para el diseño del soporte		
	Mínimo número de pasos para montar el equipo		Número de pasos para montar el equipo	# Pasos
	Facilidad para mover el dispositivo	Capacidad para realizar tomas a la altura del pecho		
		Capacidad para realizar tomas por debajo de la cadera		
Capacidad para realizar tomas por encima de la cabeza				
		Capacidad para cambiar la dirección de la cámara		
Versatilidad (N4)	No interfiera en el campo visual de la cámara	No interferir en el campo visual de la cámara		
	No produzca sonidos que afecten la toma Fomenta la libertad de movimiento en	Sonidos no audibles		

	las manos			
	Evitar desplazamientos amplios en el movimiento (<i>time-lapse</i>)		Resolución de rotación	grados
Ligero (N5)		Uso de materiales ligeros	Peso del dispositivo	Kg
Sistema portable (N6)	Mínimo número de piezas			
	Facilidad para armar y desarmar	Considerar elementos plegables	Número de piezas para la operación del sistema	# de piezas
Soporte para múltiples equipos (N1)	Múltiples dimensiones de cámaras		Ancho del soporte	cm
			Alto del soportes	cm
	Múltiples pesos de cámaras		Peso de cámara	kg
			Peso de lente	kg
	Múltiples lentes		Longitud del lente	cm
			Diámetro del lente	cm
	Uso de elementos estándar	Uso de soportes estándar. Uso de soporte entandar de trípode.		
Interfaz intuitiva (N9)	Fácil de programar		Número de pasos para programar	# Pasos
	Corta curva de aprendizaje	Diseño amigable de interfaz		
	Facilidad de acceder a la interfaz	Cuidar ubicación de botones en el dispositivo Multiplataforma (en el caso que sea un software)		

Una vez obtenidos estos parámetros es necesario estimar un rango de valores en los que puedan rondar las especificaciones, algunas de estas especificaciones dependen directamente de las propiedades de la cámara y/o la optometría, por lo que es fundamental acotar el tipo de cámara que soportará el sistema.

3.3 Restricciones

Ya que existe un gran número de modelos, tipos y variaciones de equipos fotográficos o de video, resulta prudente acotar el sector de cámaras que el

dispositivo puede soportar. Como se menciona en la sección 1.1 la industria de la fotografía en el mundo continua creciendo, en específico el sector de las **cámaras réflex**¹⁰ es por ello que se toma este tipo de cámara como punto de partida para el desarrollo de este proyecto.

Únicamente se considerarán equipos con un peso menor a 1 [kg] con el fin de descartar cámaras de video especializadas que pueden tener un peso mayor a los 5 [kg] y requerimiento de rieles para su operación.

Por otro lado, únicamente se consideraran lentes con un peso menor a 600[g] y longitudes menores a 20 [cm] evitando el uso de optometrías que pueden llegar a pesar hasta 5 [kg] y medir un metro de largo, por ello optometrías como los llamados telefoto diseñados para fotografía a distancia y no video no son considerados.

Para obtener un parámetro general de los pesos y las dimensiones de los equipos a atacar se recurren a reseñas de las cámaras más populares del sector [9] [10], además de listas de especificaciones como la mostrada en la Figura 25.

¹⁰ **Cámara réflex:** Cámara fotográfica con la que el usuario puede visualizar la imagen sin error de paralaje. La luz entra en la cámara a través del objetivo, es reflejada en un espejo, a través del reflejo del mismo la imagen llega hasta el visor.

						
	Canon EOS 1000D	Canon EOS 500D	Canon EOS 550D	Nikon D3000	Nikon D3100	Nikon D5000
Sensor	CMOS 10,1 Mpixels	CMOS 15,1 Mpixels	CMOS 18 Mpixels	CCD 10,2 Mpixels	CMOS 14,2 Mpixels	CMOS 12,3 Mpixels
Objetivos de kit	EF-S 18-55mm F/3.5-5.6 IS	EF-S 18-55mm F/3.5-5.6 IS	EF-S 18-55mm F/3.5-5.6 IS	DX 18-55mm F/3.5-5.6G VR	DX 18-55mm F/3.5-5.6G VR	DX 18-55mm F/3.5-5.6G VR
Factor multiplicación	1.6x	1.6x	1.6x	1.5x	1.5x	1.5x
LCD	2,5", 230 Kpx	3", 920 Kpx	3", 1040 Kpx	3", 230 Kpx	3", 230 Kpx	2,7", 230 Kpx
ISO	Hasta 1600	Hasta 12800	Hasta 12800	Hasta 3200	Hasta 12800	Hasta 6400
Video	No	MOV	MOV	No	MOV 1080p	AVI 720p
Precio (*)	€ 400,00	€ 550,00	€ 650,00	€ 450,00	€ 600,00	€ 500,00
Medidas	126 x 97 x 92 mm	129 x 97,5 x 62 mm	129 x 97,3 x 62 mm	126 x 97 x 64 mm	124 x 96 x 74,5 mm	127 x 104 x 80 mm
Peso	450g	480g	530g	485g	455g	560g

						
	Olympus E-450	Olympus E-620	Sony A450	Sony A580	Pentax K-x	Pentax K20D
Sensor	Live MOS 10 Mpixels	Live MOS 12,3 Mpixels	CMOS 14,2 Mpixels	CMOS 16,2 Mpixels	CMOS 12,4 Mpixels	CMOS 14,6 Mpixels
Objetivos de kit	14-42mm y 40-150mm (**)	14-42mm y 40-150mm (**)	DT 18-55mm F/3.5-5.6 SAM	DT 18-55mm F/3.5-5.6 SAM	18-55mm F/3.5-5.6 DA	18-55mm F/3.5-5.6 DA
Factor multiplicación	2x	2x	1,5x	1,5x	1,5x	1,5x
LCD	2,7", 230 Kpx	2,7", 230 Kpx	2,7", 230 Kpx	3", 921 Kpx	2,7", 230 Kpx	3", 921 Kpx
ISO	Hasta 1600	Hasta 3200	Hasta 12800	Hasta 12800	Hasta 12800	Hasta 6400
Video	No	No	No	AVCHD, MJPEG	AVI	No
Precio (*)	€ 400,00	€ 520,00	€ 450,00	€ 680,00	€ 450,00	€ 700,00
Medidas	130 x 91 x 53 mm	130 x 94 x 60	137 x 104 x 81 mm	137 x 104 x 84 mm	122 x 92 x 67 mm	141 x 101 x 70 mm
Peso	380g	475g	520g	599g	515g	715g

Nota: Para las pantallas, 1 Kpx = 1.000 pixels
 (*) Precios aproximados según tiendas online
 (**) 14-42mm f/3.5-5.6 y 40-150mm f/3.5-4.5

Figura 25. Lista técnica de equipos populares.

Por otro lado al observar los grados de libertad usualmente utilizados en los dispositivos comerciales para la captura de *time-lapse* y de estabilización (sección 2.1.2) se considera atacar únicamente dos movimientos rotacionales y con esto acotar las oscilaciones en dos grados de libertad, con el fin de reducir la inversión en actuadores. Es propio mencionar que al entender el funcionamiento del sistema es posible en una iteración posterior o trabajo a futuro extrapolar a tres grados de libertad realizando las consideraciones adecuadas.

Por otra parte dentro de la Tabla 8 se menciona en diferentes especificaciones el número de pasos para lograr un objetivo, esto hace referencia a la experiencia de usuario de producto. A menor número de pasos para lograr un objetivo el usuario

puede entender una tarea de forma más clara, además de reducir considerablemente la curva de aprendizaje del producto dando como resultado que el usuario tenga una percepción amigable del producto. [73] [74]

Finalmente en la Tabla 9 se presenta la tabla de especificaciones donde se muestran los valores máximos y mínimos en los que puede rondar la especificación con base en las previas investigaciones plasmadas en el presente documento.

Tabla 9. Tabla de especificaciones y restricciones.

Especificación	Unidad	Valor mínimo	Valor Máximo
Peso del dispositivo	Kg	2	4
Reducir oscilaciones	Mejora en grabación	Nulo	Sobresaliente
Número de pasos para montar el equipo	#Pasos	3	10
Resolución de rotación	°/paso	1	2
Acho de la cámara	cm	10	15
Alto de la cámara	cm	10	15
Peso de cámara	g	500	1000
Peso de lente	g	100	600
Longitud del lente	cm	15	20
Diámetro del lente	mm	40	100
Número de paso para programar	# Pasos	3	7
Número de piezas para la operación del sistema	# de piezas	10	30

4. Diseño Conceptual

4.1 Generación de Concepto

Como paso inicial en el diseño se plantea la generación de un concepto, éste se expresa como una idea general que da solución a las necesidades previamente planteadas de forma clara:

“Un dispositivo que controle la frecuencia de captura de imagen, así como la posición angular de una cámara fotográfica semiprofesional, siguiendo una trayectoria previamente establecida, además de ayudar en la captura de video en movimiento, reduciendo las perturbaciones externas con respecto a una referencia; los parámetros de frecuencia de captura, trayectoria y referencia de estabilización serán controlados por el usuario a través de una interfaz.”

4.2 Diagrama de Bloques

Para establecer una visión general del sistema en esta sección se establece un diagrama de caja negra el cual es de ayuda para determinar las entradas y salidas del sistema considerando como entrada a elementos en bruto, ya sean información o recursos para ser transformados en el elemento deseado, una salida. Después de este paso se dispone a identificar los posibles subsistemas que desarrollan funciones simples y en conjunto realizan el trabajo deseado. En la Figura 26 se puede observar el diagrama de caja negra, considerando como entradas los parámetros necesarios en la captura de *time-lapse* y estabilización de imagen.

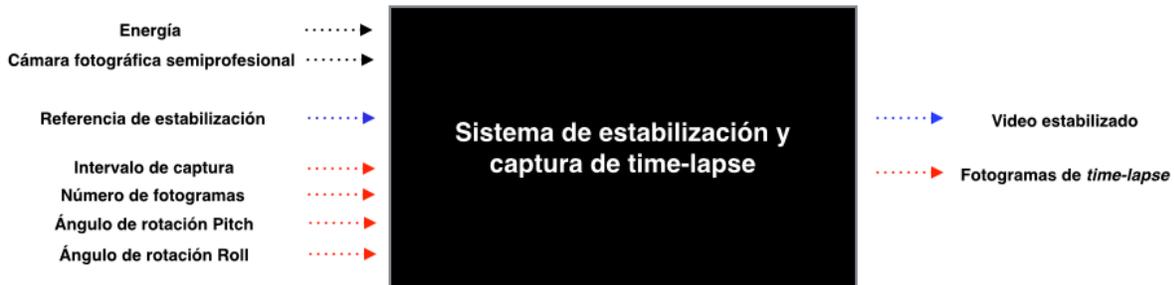


Figura 26. Diagrama de caja negra.

Se ilustra con flechas de color negro las entradas generales del sistema, con azul entradas y salida para estabilización de video, y finalmente en rojo se muestran las entradas y salida para captura de *time-lapse*. A continuación se describen cada una de las entradas y salidas:

- **Energía:** Se entiende como aquella fuente que suministrará energía al sistema.
- **Cámara fotográfica:** Hace referencia a la cámara que deberá montar el usuario sobre el dispositivo.
- **Referencia de estabilización:** El proceso de estabilización requiere de una referencia, a partir de ésta el sistema compensa el movimiento para reducir el error la posición deseada y la posición actual.
- **Intervalos de Captura:** Como se menciona en el apartado 2.1, para la realización de un *time-lapse* es necesario establecer un intervalo de tiempo entre cada fotograma.
- **Numero de fotografías:** Según la duración final de un *time-lapse* es necesario fijar el numero de fotogramas que se desean obtener.
- **Ángulo de rotación Pitch y Roll:** Para determinar el movimiento de la cámara durante la captura del *time-lapse* se debe de fijar el desplazamiento deseado desde una posición inicial.

Una vez identificadas las entradas y salidas del sistema se procede a conceptualizar subsistemas que realizan una función específica, las sub funciones en conjunto permiten transformar las entradas correspondientes en las salidas deseadas. Como resultado de este análisis se establece un diagrama general donde se observan los subsistema propuestos para dar solución al diseño considerando las entradas para obtener las salidas deseadas, éste diagrama se muestra en la Figura 27.

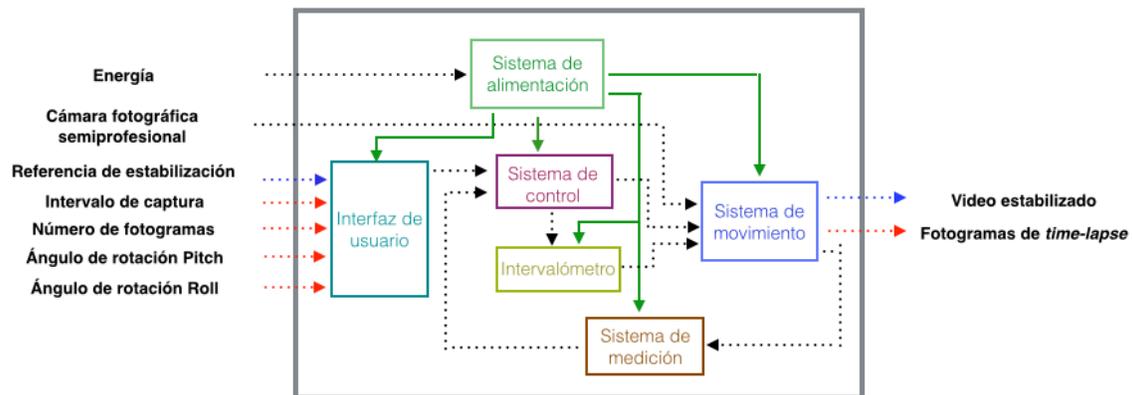


Figura 27. Diagrama de subsistemas.

Los diferentes subsistemas se describen a continuación, se utiliza la nomenclatura S# para referirse a los diferentes sistemas:

- S1. Sistema de medición:** Para poder mitigar las oscilaciones es necesario determinar el desplazamiento de la cámara, este sistema se encarga de capturar y filtrar datos relacionados al movimiento con respecto a una referencia, éstos datos serán utilizados por el sistema de control (S4).
- S2. Intervalómetro:** Este sistema es activado por el sistema de control (S4), se encarga de enviar una señal periódica a la cámara ubicada en el sistema de movimiento (S3) para activar la función de disparo. Ésta

señal corresponde a la frecuencia de captura que decida el usuario a través de la interfaz de usuario (S5).

S3. Sistema de movimiento: Este sistema se encarga de alojar a la cámara, además de recibir señales del sistema de control (S4) e intervalómetro (S2) para desplazar la cámara con el fin de mitigar las oscilaciones, además este sistema aloja el actuador, por seleccionar, así como su respectiva etapa de potencia.

S4. Sistema de control: Este sistema en el caso de la estabilización será el encargado de determinar el movimiento necesario para reducir la diferencia entre el parámetro de referencia deseado y la posición de la cámara fotográfica, por otro lado en el caso de captura de *time-lapse* el sistema se encargará de determinar el movimiento necesario a lo largo de la captura y activar el sistema de intervalómetro (S2), en todo lo anterior se considerarán los parámetros seleccionados por el usuario a través de la interfaz de usuario (S5) .

S5. Interfaz de usuario: Vínculo entre el sistema y el usuario el cual permite interactuar con el sistema de forma física (sujetar, tomar, empuñar o cargar), además de ayudar al usuario a establecer los parámetros de entrada para la captura de *time-lapse* y la referencia de estabilización que serán enviados al sistema de control (S4).

S6. Sistema de alimentación: El sistema utilizará como entrada una fuente de alimentación eléctrica y se encargará de suplir de energía a los diferentes sistemas según las necesidades energéticas de éstos.

4.3 Generación, selección y evaluación de conceptos de solución

En esta sección se presentará la generación de conceptos para cada uno de los subsistemas generados en la sección 4.2, se considera como un concepto de solución a los conocimientos de áreas de física, geométrica, mecánica y más ciencias exactas que den una solución al subsistema presentado.

Se utilizan matrices de decisión para establecer una comparación entre diferentes conceptos y posteriormente establecer posibles configuraciones entre los conceptos mejor evaluados.

Se evalúan distintos rubros, considerando una escala general de cero a dos, donde cero representa la carencia de la característica y dos el buen desempeño de un característica pasando por uno que representa un desempeño medio de la característica. Se utiliza un parámetro de peso para cada propiedad según la importancia, esta importancia será determinada según el impacto en el dispositivo, este peso se otorgara en una escala de uno a tres según la importancia y será multiplicado por la calificación que obtenga la característica en el rubro.

Cada concepto presentado y seleccionado es propio para las características, necesidades, especificaciones, alcances y tiempo de desarrollo del sistema planteado en este documento, por lo que para el diseño de otros dispositivos los conceptos aquí presentados pueden diferir.

Finalmente para mejorar el desempeño en la evaluación de los conceptos de solución, las matrices de decisión serán diseñadas por el autor del documento y evaluadas por un tercero para evitar que las ideas del diseñador interfieran en la evaluación del concepto de solución. Se considera que el evaluador posee una

formación ingenieril además de tener conocimientos referentes las áreas de electrónica, mecánica, instrumentación y control automático.

Conceptos de solución de sistema de medición (S1)

En esta sección se evalúan las variables de medición de la posición (S1) de la cámara relacionando los ejes de rotación de la misma con respecto a la línea de horizonte, a continuación se describen estos conceptos:

- **Aceleración (S1.1):** Al medir la fuerza de gravedad y la orientación de ésta, es posible determinar la proyección del vector gravedad sobre múltiples ejes para obtener la posición angular de un objeto con respecto del horizonte, sin embargo las distintas fuerzas del movimiento del objeto pueden afectar la medición. Si se esta trabajando en un sistema activo, entonces las reacciones de las fuerzas que interactúan en el movimiento del sistema serán visibles en el sensor también. Es por lo anterior que el acelerómetro es fiable sólo a largo plazo, por lo que un filtro de peso baja es comúnmente utilizado [75] [76].
- **Velocidad Angular(S1.2):** Un giroscopio permite medir la velocidad angular y a través de una integración numérica obtener la posición angular, eso sin ser susceptible a fuerzas externas como en un acelerómetro. Sin embargo la integración realizada tiende a acumular el error lo que le impide volver a una referencia inicial por lo que es útil en un corto periodo de tiempo pero errático a largo plazo [75] [77] [78].
- **Filtro Complementario(S1.3):** Es una combinación de elementos que toma términos del giroscopio, precisión y falta de susceptibilidad a fuerzas externas, así como del acelerómetro, que no tiende a acumular error. Este filtro se logra a través de sencillas ecuaciones sin recurrir a teoría de

control, sin embargo este filtro no es incapaz de medir el ángulo de rotación en el eje z [75] [79].

- **Filtro de Kalman(S1.4):** Es un algoritmo que sirve para poder identificar el estado oculto (no medible) de un sistema dinámico lineal, al igual que el observador de Luenberger, pero sirve cuando el sistema está sometido a ruido. El filtro de Kalman es capaz de escoger la constante de error de forma óptima cuando se conocen las varianzas de los ruidos que afectan al sistema [80].

En esta sección no se consideraron elementos para medir posición como lo pueden ser *encoders* o potenciómetros siendo que estos aportan una medición con respecto a la tierra mecánica a la que se encuentran sujetos y no con respecto a la gravedad por lo que el uso de estos dispositivos representaría un error considerable de la medición.

Por otro lado no se consideran elementos como visión artificial siendo que ésta requiere de dispositivos fuera del sistema, además de estar sujeta a una área restringida (campo de visión de la cámara) lo cual entra en conflicto con la necesidad N4.

Se evalúan los siguientes parámetros:

1. **Referencia:** El sistema posee una referencia de medición con respecto a un parámetro medible (horizonte, dirección de gravedad, etc.).
2. **Procesamiento:** El sistema deberá de adquirir los datos necesarios para posteriormente realizar un procesamiento de éstos, considerando que para un mayor número de operaciones se requiere de un mayor procesamiento dentro del sistema embebido en el control. Se evalúa con cero al sistema con el mayor número de operaciones y con dos el sistema con menor número.

3. **Estabilidad de señal:** El sistema reacciona a mínimas perturbaciones por lo que presenta ruido (vibraciones mecánicas) en la señal de lectura, por lo que a mayor ruido se necesitará de un pre o post procesamiento de la señal. Se evalúa con cero al sistema con menor estabilidad y con dos el sistema con mayor estabilidad.
4. **Facilidad de implementación:** Según la complejidad del sistema para ser implementado considerando la cantidad de elementos a integrar, se evalúa con cero al sistema con mayor número de elementos a integrar y con dos al sistema con menor número de elementos.

Tabla 10. Matriz de selección para sistema de medición.

Criterios	Métrica	Peso	Acelerómetro (S1.1)		Giroscopio (S1.2)		Filtro Complementario (S1.3)		Filtro Kalman (S1.4)	
			Calif.	Pts.	Calif.	Pts.	Calif.	Pts.	Calif.	Pts.
Referencia	Si/No	2	2	4	0	0	2	4	2	4
Procesamiento	Alto, Medio y Bajo	2	2	4	2	4	1	2	0	0
Estabilidad de señal	Alto, Medio y Bajo	3	0	0	1	3	2	6	2	6
Facilidad de Implementación	Alto, Medio y Bajo	3	2	6	2	6	1	3	0	0
Total			14		13		15		10	

Se puede observar en la Tabla 10 que el concepto mejor evaluado para la aplicación es el uso de un filtro complementario ya que reúne las ventajas del acelerómetro y giroscopio en un algoritmo sencillo en comparación al filtro de Kalman.

Conceptos de Solución de Sistema de Intervalómetro (S2)

Como se presenta en el la sección 2.1.1, existen diversos sistemas para el control de disparo en las cámaras semiprofesionales y profesionales, considerando esto, se presenta en la Tabla 11 la selección del método de disparo para el sistema.

Los parámetros a evaluar son los siguientes:

1. **Protocolos específicos de comunicación:** El sistema utiliza un protocolo de comunicación ya sea USB, I²C u otro, representado esto la adición de módulos específicos en el sistema de control. Se evalúa con cero la necesidad de un protocolo y con dos la carencia de éste.
2. **Facilidad de generalización:** Se evalúa según la facilidad de implementar el sistema en cámaras de múltiples fabricantes, considerando variaciones geométricas y electrónicas. Se califica con cero a la incapacidad de generalizar para múltiples familias de productos y fabricantes, y con dos la facilidad de encontrar información e implementar para múltiples productos.
3. **Dependencia del fabricante:** Se evalúa la necesidad de información proporcionada por el fabricante, ya sean esquemas eléctricos, planos dimensionales o protocolos de comunicación internos. Se evalúa con cero a los sistemas que estén mayormente restringidos por el fabricante y con dos a aquellos que estén menormente restringidos.
4. **Capacidades adicionales:** Algunos sistemas de disparo aportan la posibilidad de acceder a múltiples ajustes de la cámara. Se califica con cero la carencia de capacidades extra y con dos la aportación de parámetros diferentes al enfoque y disparo.
5. **Facilidad de implementación:** Se evalúa la facilidad de poner en práctica el sistema considerando los conocimientos necesarios, el criterio del desarrollador y tiempos de desarrollo del proyecto contemplando que el sistema soporte la mayor cantidad de equipos de diversos fabricantes como se menciona en la necesidad N1. Se considera con cero el sistema más complejos de implementar y con dos el sistema sencillo de implementar.

Tabla 11. Matriz de selección para sistema de intervalómetro

Criterios	Métrica	Peso	Botón de disparo (S2.1)		Control Remoto (S2.2)		Software (S2.3)	
			Calif.	Pts.	Calif.	Pts.	Calif.	Pts.
Protocolo específico.	Si/No	3	2	6	2	6	1	3
Facilidad de generalización.	Alto, Medio y Bajo	3	0	0	1	3	1	3
Dependencia del fabricante.	Alto, Medio y Bajo	1	1	1	1	1	0	0
Capacidades adicionales	Si/No	2	0	0	0	0	2	4
Facilidad de implementación	Alto, Medio y Bajo	2	1	2	2	4	1	2
Total			9		14		12	

Observando la matriz de decisión se determina que el método de disparo ganador es el de control remoto, esto gracias a su flexibilidad y facilidad en la implementación sin la necesidad del uso de un sistema operativo y sin las restricciones mecánicas del botón de disparo.

Conceptos de Solución de Sistema de Movimiento (S3)

En esta sección se evalúan los conceptos para aportar movimiento al sistema el cual ayudará a mitigar las oscilaciones de la cámara y dará movimiento a la captura de *time-lapse*. Este sistema se considera en dos partes, el primero “Configuración de movimiento”(S3.1) donde se proponen diversas formas de aportar movimiento a la cámara y “Selección de tipo de actuador”(S3.2) esta depende de la configuración de movimiento seleccionada donde se propondrán diversos actuadores para dar soporte al sistema.

Para la configuración de movimiento se proponen los siguientes dos sistemas:

- **Anillo (S3.1.1):** Se plantea un anillo que soporte la cámara y permita el movimiento *roll*, y éste a su vez se sujeta a un segundo anillo que permite el

movimiento *pitch*. En el caso del movimiento para captura de *time-lapse* se realiza un inversión de los ejes de referencia y se monta sobre una superficie estable para poder rotar el equipo en *pitch* y *yaw*. Este sistema tiene la ventaja de dejar libre la visión al operador para visualizar la pantalla de la cámara, sin embargo sus dimensiones podrían llegar a representar un problema. En la Figura 28 se muestra un boceto que ejemplifica la posición de la cámara así como los movimientos que desempeña el concepto.

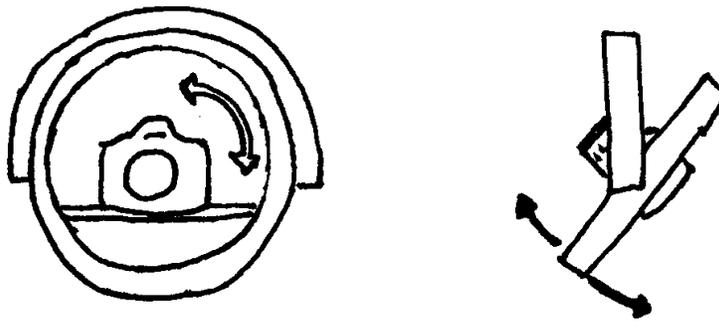


Figura 28. Boceto Concepto Anillo.

- **Soporte rotatorio (S3.1.2):** Se monta la cámara sobre un soporte que permite el movimiento en *pitch*, y éste a su vez es soportado por un sistema que permite el movimiento en *roll*. Al igual que el sistema anterior se aplica una inversión de los ejes rotacionales del sistema para permitir el movimiento en el eje *pitch* y *yaw*. Éste sistema tiene como desventaja que impide al operador visualizar la pantalla de la cámara. En la Figura 29 se muestra un boceto que ejemplifica la posición de la cámara así como los movimientos que desempeña el concepto.

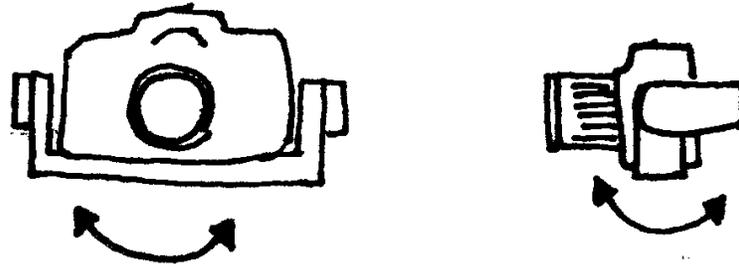


Figura 29. Boceto Concepto Soporte Rotatorio.

- **Brazo (S3.1.3):** Este sistema se puede visualizar como un brazo robótico en serie de dos grados de libertad, esta configuración presenta facilidad para la implementación sin embargo el concepto presenta un problema ya que las rotaciones no se realizan en los ejes de rotación de la cámara, generando movimientos no deseados de traslación y con esto obteniendo una pérdida en el punto de enfoque de la cámara. Para evitar tales movimientos se deberá considerar añadir grados de libertad para obtener un desplazamiento fijo desde el punto de vista de movimientos de traslación. En la Figura 30 se muestra un boceto que ejemplifica la posición de la cámara así como los movimientos que desempeña el concepto.

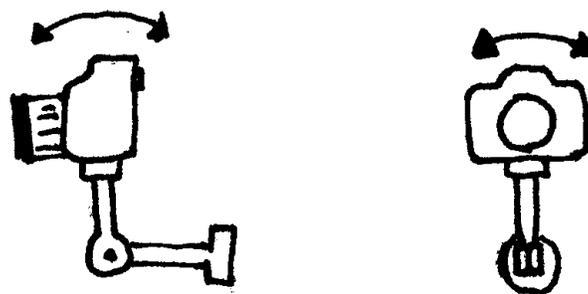


Figura 30. Boceto Concepto Brazo.

- **Imitación de ojo (S3.1.4):** Este sistema busca imitar el movimiento del ojo. Siendo el ojo un mecanismo de visión en los seres vivos, se plantea imitar

contracción y elongación de los músculos oculares para realizar la estabilización de la cámara. Sin embargo en el caso de *time-lapse* éste sistema resulta restrictivo ya que impide la inversión mecánica del sistema e impide un movimiento de 360°. En la Figura 31 se muestra la ubicación de los diferentes músculos oculares esto con el fin de ejemplificar la configuración planteada.

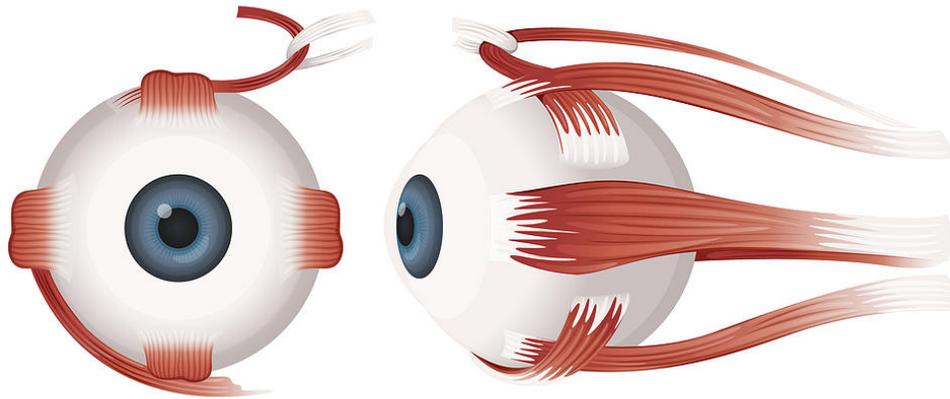


Figura 31 . Músculos Oculares [81]

Para evaluar el tipo de soporte adecuado para el sistema propuesto se evalúan los siguientes rubros.

- **Facilidad de construcción:** Se evalúa la facilidad para construir e implementar la propuesta según la complejidad en la construcción así como los conocimientos necesarios para su implementación. Se evalúa con dos al sistema más sencillo de construir y con cero a los sistemas más complicados.
- **Movimiento sobre ejes:** Se considera de suma importancia que el movimiento se genere sobre los ejes de rotación de la cámara ya que si los movimientos se realizan fuera de estos se presentarían movimientos lineales no deseados en la toma. Se evalúa con dos a los sistemas que rotan la

cámara sobre sus ejes y con cero a los que realizan movimientos fuera de los ejes.

- **Bloqueo de pantalla:** Una parte central en la captura de video es poder visualizar qué se está grabando con el fin de realizar el encuadre apropiado, es por ello que la pantalla de la cámara debe estar visible. Es posible utilizar pantallas externas, sin embargo requieren de una inversión adicional. Se evalúa con dos a aquellas configuraciones que no tapen la pantalla y con cero a las que la tapen.
- **Tamaño:** Se considera el tamaño del dispositivo siendo que a mayor tamaño su manejo en escenarios confinados resulta en complicaciones para el operador. Se evalúa con dos a los sistemas más pequeños y con cero a los más grandes.

Tabla 12. Matriz de selección sistema de movimiento.

Criterios	Métrica	Peso	Anillo (S3.1.1)		Soporte Rotatorio (S3.1.2)		Brazo (S3.1.3)		Imitación de ojos (S3.1.4)	
			Calif.	Pts.	Calif.	Pts.	Calif.	Pts.	Calif.	Pts.
Facilidad de Construcción	Alto, Medio y Bajo	3	1	3	2	6	1	3	0	0
Movimiento sobre ejes	Alto, Medio y Bajo	3	2	6	2	6	0	0	2	6
Bloqueo de pantalla	Alto, Medio y Bajo	2	2	4	0	0	0	0	0	0
Tamaño	Alto, Medio y Bajo	2	0	0	1	2	1	2	1	2
Total			13		14		5		8	

Como se puede observar en la tabla el concepto ganador es el (S3.1.2), el cual destaca dado que el movimiento generado no sale del punto de enfoque de la cámara, así como su facilidad de construcción con respecto a otros conceptos.

A continuación se presenta una descripción básica de los tipos de actuadores que pueden ser utilizados en los dos conceptos de solución para sistemas de movimiento mejor evaluados (S3.2):

- **Motor de corriente directa (S3.2.1):** El motor de corriente directa es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción del campo magnético. Este sistema es adecuado para alcanzar altas velocidades, si se desea por es necesario añadir reducción con ayuda de una caja de engranes. El principal inconveniente de este actuador es el mantenimiento, debido principalmente al desgaste que sufren las escobillas al entrar en contacto con las delgas.
- **Motor a pasos (S3.2.2) :** Este tipo de motor es apropiado para aplicaciones en las se desea tener un control del movimiento del motor (conocer cuánto se ha desplazado el motor) sin necesidad de tener que añadir algún tipo de sensor. Debido a que los motores a pasos son dispositivos electromecánicos, y como tal deben vencer cierta inercia, el tiempo de duración y la frecuencia de los pulsos aplicados son un punto muy importante a tener en cuenta. El motor debe alcanzar el paso antes de que la próxima secuencia de pulsos comience, si la frecuencia de pulsos es muy elevada, el motor puede que no realice ningún movimiento, puede comenzar a vibrar sin llegar a girar, girar erráticamente o llegar a girar en sentido opuesto.
- **Motor *brushless* (sin escobillas) (S3.2.3):** Los motores sin escobillas presentan una mayor eficiencia (menos pérdida por calor), mayor rendimiento (mayor duración de las baterías para la misma potencia), menor peso para la misma potencia, requieren menos mantenimiento al no tener escobillas, mayor potencia para el mismo tamaño. Además el rango de velocidad es elevado al no tener limitación mecánica en comparación a un motor de corriente directa, sin embargo tienen un mayor costo con

respecto a otros actuadores [54]. Por otro lado se puede observar la presencia de este tipo de motor en múltiples dispositivos comerciales, gracias a esto existe una gama de motores sin escobillas diseñados para estabilizadores comerciales.

- **Servomotor (S3.2.4):** Un servomotor es un dispositivo que conjunta un motor de corriente continua, un sistema de reducción y un sistema de control. Estos actuadores tiene la capacidad de ubicarse en una posición determinada dentro de un rango de operación y mantener dicha posición mientras no se exceda la carga marcada por el fabricante. Sin embargo al tener un sistema de reducción estos requieren de mantenimiento, además de requerir de una señal específica para determinar la posición ya sea una señal de PWM en el caso de servomotores analógico o una señal de activación utilizando un protocolo de comunicación específico en el caso de servomotores digitales.

A continuación se presentan los parámetros y características a evaluar para los cuatro actuadores antes presentados:

1. **Costo:** Se evalúa el costo de adquisición de los actuadores según las características necesarias de la aplicación (dimensiones, par, velocidad máxima, etc.), considerando cero como el más costoso y dos como el menos costoso.
2. **Mantenimiento:** Se evalúa la necesidad de mantenimiento y remplazo del actuador en largos periodos de tiempo, considerando cero el sistema que requiere mayor mantenimiento y con dos al sistema de menor mantenimiento.
3. **Eficiencia:** Se evalúa la eficiencia general del sistema según la investigación realizada en comparación al consumo energético, considerando con cero el menos eficiente y con dos el más eficiente.

4. **Complejidad del circuito básico de control:** Se evalúa la dificultad de la implementación el circuito básico de control considerando la experiencia del desarrollador. Se evalúa con cero al más complicado y con dos al menos complicado.
5. **Par/Dimensiones:** Se evalúa la relación entre el par y las dimensiones del motor, evaluando con cero aquel con mejor par y mayores dimensiones y con dos aquel con mayor par y menores dimensiones.
6. **Discretización del movimiento:** Se evalúa la facilidad de modificar la mínima variación de movimiento sin necesidad de modificar el circuito básico. Se califica con cero al sistema que requiere una mayor cantidad de modificaciones y con dos al sistema que requiere menos modificaciones.

Tabla 13. Matriz de selección actuador.

Criterios	Métrica	Peso	Motor DC (S3.2.1)		Motor a Pasos (S3.2.2)		Motor sin escobillas (S3.2.3)		Servomotor (S3.2.4)	
			Calif.	Pts.	Calif.	Pts.	Calif.	Pts.	Calif.	Pts.
Costo	Alto, Medio y Bajo	3	2	6	1	3	0	0	2	6
Mantenimiento	Alto, Medio y Bajo	2	1	2	2	4	2	4	1	2
Eficiencia	Alto, Medio y Bajo	2	0	0	1	2	2	4	1	2
Complejidad del circuito básico de control	Alto, Medio y Bajo	2	2	4	1	2	0	0	1	2
Par/Dimensiones	Alto, Medio y Bajo	3	0	0	1	3	2	6	0	0
Discretización del movimiento	Alto, Medio y Bajo	2	2	4	1	2	2	4	0	0
Total			16		16		18		12	

Se puede observar que los motores sin escobillas sobresalen en la tabla anterior, esto es comparable con lo observado en la sección de antecedentes donde se pueden encontrar diversos productos con este tipo de actuador.

Conceptos de Solución de Sistema de Control (S4)

Según los sistemas anteriores se proponen dos soluciones para alojar el control del sistema:

- **Microcontrolador (S4.1):** Un microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior tres principales unidades funcionales: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada/salida.
- **Microcomputadora (S4.2):** Estos dispositivos poseen todas las características de una computadora tradicional, incluyendo un sistema operativo de bajo rendimiento y demás características de una computadora de escritorio o laptop (salida de audio, video, conexión ethernet, etc.) en una sola tarjeta que suele ser de tamaño reducido cercano al tamaño de un teléfono móvil.

Existen muchos otros dispositivos capaces de aportar una unidad de procesamiento lógico como lo son los sistemas PLC's, FPGA's y GAL's por mencionar algunos, sin embargo por la naturaleza del dispositivo a diseñar, estos sistemas de procesamiento resultan costosos o su implementación sería inadecuada ya que no están diseñados para dar solución a una aplicación de ésta índole. Por ejemplo, un sistema PLC está diseñado para aplicaciones industriales usualmente utilizado en el área de automatización de procesos secuenciales, por consiguiente este tipo de tecnología resulta inadecuada tanto en costos como en aplicación para el diseño de un producto de consumo.

Para evaluar estos dos conceptos se presentan los siguientes parámetros:

1. **Velocidad de operación:** Se evalúa la velocidad en Hz en la que opera el sistema. Considerando cero al sistema con menos ciclos por segundo y con dos al sistema con más ciclos por segundo.
2. **Multitarea:** Se evalúa la capacidad de operar varios hilos de programación al mismo tiempo, se evalúa con dos al sistema que soporte múltiples hilos y con cero al sistema que no.
3. **Interrupciones:** Se evalúa la cantidad y diversidad de interrupciones que soporta el sistema, considerando cero al sistema con el menor número de interrupciones y con dos al sistema con mayor número de interrupciones.
4. **Flexibilidad:** Se evalúa la facilidad para pasar de una placa de desarrollo a una placa específica para el sistema, se evalúa con dos al sistema más adaptable y con cero al sistema menos adaptable.
5. **Cantidad de periféricos:** Se evalúan la cantidad de periféricos que posee el sistema, se toma especial consideración a módulos de PWM y módulos de comunicación. Se evalúa con dos al sistema con la mayor cantidad de módulos y con cero al sistema con menor cantidad.

Tabla 14. Matriz de selección para sistema de control.

Criterios	Métrica	Peso	Microcontrolador (S4.1)		Microcomputadora (S4.2)	
			Calif.	Pts.	Calif.	Pts.
Velocidad de Operación	Alto, Medio y Bajo	2	0	0	2	4
Multitarea	Alto, Medio y Bajo	2	0	0	2	4
Interrupciones	Alto, Medio y Bajo	2	2	4	1	2
Flexibilidad	Alto, Medio y Bajo	3	2	6	0	0
Cantidad de periféricos	Alto, Medio y Bajo	3	2	6	1	3
Total			16		13	

En esta sección se puede observar como elemento ganador al microcontrolador, sobre todo destaca por la cantidad de periféricos y flexibilidad que un microcontrolador puede dar, sin considerar las diferentes capacidades que puede ofrecer un fabricante con las múltiples familias y tecnologías de microcontroladores.

Conceptos de Solución de Sistema de Interfaz (S5)

En esta sección se presentan los conceptos que dan solución al sistema de interfaz de usuario (S5), éste sistema se dividirá en dos categorías, la que permita al usuario la toma del dispositivo y la de captura de datos.

El nombre de las secciones serán “Interfaz de soporte” (S5.1) e “Interfaz de captura” (S5.2) respectivamente.

Para la categoría de sistema de soporte (S5.1) se presentan diferentes conceptos para sujetar o empuñar el sistema:

- **Soporte de dos manos (S5.1.1):** Este soporte permite sujetar el sistema con ambas manos a la altura del pecho lo que permite mover el dispositivo rápidamente de un lado al otro, sin embargo tapa el campo visual de usuario y al estar apoyado en las dos manos resulta complicado modificar algún parámetro de la cámara o el dispositivo. En la Figura 32 se muestran ejemplos de soportes de dos manos.



Figura 32. Soportes de dos manos. [82] [83]

- **Soporte de pecho y mano (S5.1.2):** Este tipo de soporte permite tener dos puntos de apoyo, uno en una mano y otro en el pecho, esto permite tener una mano libre para realizar operaciones con la cámara, sin embargo siempre se debe ejercer una fuerza en el pecho para mantener el equipo en su lugar. En la Figura 33 se muestran ejemplos de este tipo de soporte.

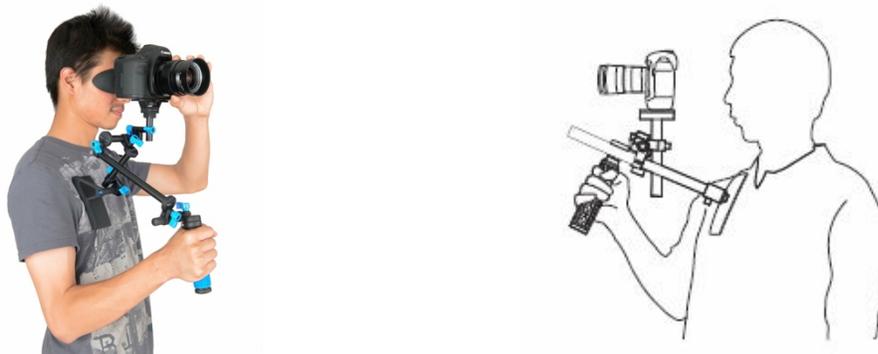


Figura 33. Soporte de pecho y mano. [84] [85]

- **Soporte de hombro y manos (S5.1.3):** Este tipo de soporte posee tres puntos de apoyo uno en cada una de las manos y otro en el hombro. Se utiliza este tipo de configuración en equipos pesados, sin embargo es complicado para un operador moverse con este tipo de sistemas (como se menciona en el apartado 2.2.1). Es común el uso de contrapesos sobre el hombro para compensar el centro de gravedad del sistema. En la Figura 34 se muestran ejemplos de este tipo de soporte.



Figura 34. Soporte de hombro y manos. [86] [87]

- **Soporte para una mano (S5.1.4):** Este tipo de soporte permite tener una mano libre y esta pensado para que el operador cargue poco peso, sin embargo existen sistemas que completan este sistema para poder cargar cámaras de mayor peso. En la Figura 35 se muestran ejemplos de este tipo de soporte.



Figura 35. Soporte para una mano. [88] [89]

- **Soporte para tomas de piso (una mano) (S5.1.5):** Este tipo de agarre permite al operador realizar tomas por debajo de la cadera, esta pensado para cargar equipos de poco peso. En la Figura 36 se presentan algunos ejemplos de este tipo de soporte.



Figura 36. Soporte para tomas de piso (una mano) [90]

Para poder evaluar y seleccionar alguno de estos conceptos se clasifican según las siguientes características:

1. **Tamaño:** Se considera el tamaño del dispositivo siendo sistemas de menor tamaño calificados con dos y de mayor tamaño con cero.
2. **Facilidad para realizar tomas:** Se evalúa la libertad que tiene el operador para desplazar el equipo en múltiples direcciones. Se evalúa con dos a los equipos que den mas libertad y con cero a los que restrinjan al operador.
3. **Número de puntos de apoyo:** Los apoyos pueden mejorar la estabilidad del equipo de forma pasiva por lo que se evalúa con dos a los equipos con múltiples apoyos y con cero a los de menor número de apoyos.
4. **Campo de Visión:** Se evalúa como afecta el tipo de soporte al campo de visión de la persona, se califica con dos a los equipos que invadan en menor medida y con cero los que afecten el campo de visión.

5. **Facilidad para cargar:** Se califica la facilidad que tiene el operador para mantener la postura por un largo periodo de tiempo. Se evalúa con dos al sistema que requiera menor esfuerzo y con cero al que requiera mayor esfuerzo.

Tabla 15. Matriz de selección para interfaz de soporte.

Criterios	Métrica	Peso	Soporte de dos manos (S5.1.1)		Soporte de pecho y mano (S5.1.2)		Soporte de hombro y manos (S5.1.3)		Soporte para una mano (S5.1.4)		Soporte para tomas de piso (S5.1.5)	
			Calif.	Pts.	Calif.	Pts.	Calif.	Pts.	Calif.	Pts.	Calif.	Pts.
Tamaño	Alto, Medio y Bajo	2	1	2	1	2	0	0	2	4	2	4
Facilidad para realizar tomas	Alto, Medio y Bajo	3	2	6	2	6	1	3	1	3	1	3
Número de puntos de apoyo	Alto, Medio y Bajo	2	1	2	2	4	2	4	0	0	0	0
Campo de Visión	Alto, Medio y Bajo	2	0	0	1	2	1	2	1	2	2	4
Facilidad para cargar	Alto, Medio y Bajo	2	2	4	0	0	2	4	1	2	2	4
Total			14		14		13		11		15	

En la Tabla 15 se observa que el concepto ganador es el de soporte para tomas de piso, sin embargo el sistema de pecho y mano obtiene un puntaje similar, por lo que estos dos serán contemplados para realizar combinaciones de concepto. Por otro lado se generan y evalúan conceptos para la interfaz de captura (S5.2). A continuación se presentan los diferentes conceptos que pueden dar solución al sistema.

- **Interfaz Incorporada (botones, palancas, pantallas, etc.) (S5.2.1):** Siendo una pantalla un elemento capaz de desplegar texto, permite realizar una interfaz sencilla de visualizar y fácil de implementar. Sin embargo este sistema requiere ser ubicado en un punto específico donde sea fácilmente

visible y manipulable, lo que representa desde el diseño, contemplar la ubicación y distribución de elementos como pantallas, botones o palancas. Se deberá tomar en cuenta la cantidad de conexiones eléctricas necesarias para operar los distintos controles. Por otro lado este elemento limita al usuario a permanecer a un lado del dispositivo para visualizar la información, esto con la desventaja de quitar libertad al usuario cuando el dispositivo se encuentre realizando un *time-lapse*.

- **Interfaz por control remoto (S5.2.1):** Se propone un elemento externo que envíe de forma remota los datos necesarios al sistema, de este modo se da libertad al usuario de operar el dispositivo a distancia dando mayor posibilidad al usuario de realizar tomas sin interferir en el campo visual de la cámara considerando que ésta rota. Sin embargo este sistema tiene como desventaja la necesidad del diseño de un nuevo sistema que opere de forma autónoma complicando la implementación de éste.
- **Interfaz por aplicación móvil (S5.2.1):** Aplicación móvil capaz de interactuar de forma remota con el sistema a través del uso de un protocolo de comunicación (Bluetooth®, Wifi® u otro). Este sistema aporta libertad al usuario para operar el sistema a distancia con la facilidad de la programación móvil, esto sin recurrir a la necesidad de diseñar un sistema autónomo como el control remoto, teniendo como desventaja la necesidad de un teléfono inteligente móvil para operar el sistema.

Los conceptos presentados en esta sección dan solución al problema, sin embargo son sistemas completamente diferentes por lo que el uso de una matriz de selección no resulta adecuado, siendo que se tienen diferencias totalmente opuestas que podrían en desventaja un concepto con respecto a otro en la evaluación.

Se considera como un candidato sobresaliente la implementación de una aplicación móvil. Por un lado facilita el encapsulamiento del sistema sin tener la necesidad de recurrir a una salida visual en el cuerpo del dispositivo, reduciendo el consumo energético del sistema, el número de piezas y salidas digitales necesarias para operar una pantalla. Por otro lado, se evita el diseño o selección de un sistema de radiocontrol tomando como ventaja la variedad de periféricos que poseen los teléfonos inteligentes, apoyando la tendencia generacional a la industria creciente de la programación móvil como se menciona en la sección 2.4. Sin embargo la interfaz incorporada aporta ventajas únicas con respecto a las otras soluciones. Es por ello que se decide tomar las dos ideas y evaluarlas en la etapa de diseño de configuración.

Conceptos de Solución de Sistema de Alimentación (S6)

Considerando la selección de los sistemas anteriores se toma como la única opción viable el uso de baterías, ya que permiten la movilidad del sistema sin necesidad de cables y en lugares remotos donde no es posible tener acceso a una toma de corriente.

Se deja de lado la posibilidad del uso de sistemas de captación de energía como paneles solares como fuente principal de alimentación ya que muchas veces las tomas realizadas en el mundo del cine y la fotografía son llevadas a cabo en condiciones de penumbra, lugares cerrados o locaciones nocturnas recurriendo a la necesidad de baterías antes ya mencionadas. Una vez presentadas las múltiples ideas que pueden dar solución a cada uno de los subsistemas, se prosigue con su integración para la generación de posibles configuraciones.

5. Diseño de Configuración

Una vez presentados los conceptos de solución en la sección anterior, se dispone a generar diversas combinaciones entre los dos conceptos mejor evaluados, para finalmente seleccionar una configuración del sistema.

Una vez identificados, se acomodan en la Tabla 16 y se realizan combinaciones para obtener diferentes propuestas de configuración. Considerando que se pueden realizar múltiples combinaciones, las propuestas de configuración presentadas en este documento son aquellas que cuentan con congruencia y viabilidad, además de cumplir con los objetivos y alcances del proyecto.

Tabla 16. Tabla de selección de propuestas de configuración.

S1	S2	S3.1	S3.2	S4	S5.1	S5.2	S6
Filtro Complementari o (S1.3)	Control Remoto (S2.2)	Soporte Rotatorio (S3.1.2)	Motor sin escobillas (S3.2.3)	Microcontrolador (S4.1)	Soporte para tomas de piso (S5.1.5)	Aplicación móvil (S5.2.3)	Baterías (S6)
Acelerómetro (S1.1)	Software (S2.3)	Anillo (S3.1.1)	Motor a pasos (S3.2.2) Motor corriente directa (S3.2.3)	Microcomputador a (S4.2)	Soporte para pecho y mano (S5.1.2) Soporte dos manos (S5.1.1)	Interfaz Incorporad a (S5.2.1)	

Con ayuda de la Tabla 16 se pueden visualizar los conceptos mejor evaluados en verde y los segundos mejor evaluados en blanco para cada subsistema. Con base en estos conceptos se establecen diferentes combinaciones que son mostradas en la Tabla 17, en algunos casos, al combinar los conceptos no generan una configuración óptima dada su incompatibilidad entre si hasta ser excluyentes uno de otro.

Tabla 17. Propuestas de configuración.

Propuesta 1							
S1	S2	S3.1	S3.2	S4	S5.1	S5.2	S6
Filtro Complementario (S1.3)	Control Remoto (S2.2)	Soporte Rotatorio (S3.1.2)	Motor sin escobillas (S3.2.3)	Microcontrolador (S4.1)	Soporte para tomas de piso (S5.1.5)	Aplicación móvil (S5.2.3)	Baterías (S6)
Propuesta 2							
Filtro Complementario (S1.3)	Control Remoto (S2.2)	Anillo (S3.1.1)	Motor corriente directa (S3.2.3)	Microcontrolador (S4.1)	Soporte dos manos (S5.1.1)	Interfaz Incorporada (S5.2.1)	Baterías (S6)
Propuesta 3							
Filtro Complementario (S1.3)	Software (S2.3)	Soporte Rotatorio (S3.1.2)	Motor a pasos (S3.2.2)	Microcomputadora (S4.2)	Soporte para pecho y mano (S5.1.2)	Aplicación móvil (S5.2.3)	Baterías (S6)

A continuación se presenta la descripción de la integración y funcionamiento entre conceptos para cada una de las propuestas generadas. Se considera como el sistema fundamental el S3.1, siendo el central del diseño. Entorno a éste, los demás serán afectados de forma directa por lo que el análisis de cada una de las propuestas se centrará en la relación entre el sistema S3.1 y el resto de los subsistemas:

- **Propuesta 1 (P1):** Esta configuración toma todos los conceptos mejor evaluados, en este caso se tiene como eje principal el soporte rotatorio (S3.1.2), en la Figura 37 se puede observar un boceto de la combinación de los sistemas.

Se puede observar que el soporte rotatorio (S3.1.2) que soporta a la cámara de la parte inferior le permite al usuario desplazar el dispositivo con ayuda de un mango (S5.1.5) para realizar tomas bajas, sin embargo se puede inferir que tomas a la altura de la cadera resultarían incómodas y complicadas.

El movimiento del sistema es proporcionado por motores sin escobillas (S3.2.3), los cuales a su vez son controlados por un microcontrolador (S4.1) que guía el movimiento en dirección opuesta a la variación de la posición angular de la cámara. La posición angular es medida con ayuda de los valores combinados de un acelerómetro y un giroscopio por medio del filtro complementario (S1.3).

Al invertir la posición del sistema y utilizar un trípode para mantenerlo fijo se puede interactuar con las funciones de *time-lapse* con ayuda de una aplicación móvil (S5.2.3) la cual a través de comunicación Bluetooth® envía una alerta al microcontrolador que activará el sistema de intervalómetro el cual a su vez envía la señal eléctrica de captura de imagen a la cámara por el puerto de control remoto (S2.2).

La aplicación móvil resulta útil al operar el dispositivo a distancia en el modo *time-lapse* ya que permite configurar y manipular la posición de la cámara sin la preocupación de interferir en el campo visual de la cámara. Sin embargo, al operar el dispositivo en la función de estabilizador resulta inconveniente la necesidad de operar el dispositivo en el teléfono móvil en la mano.

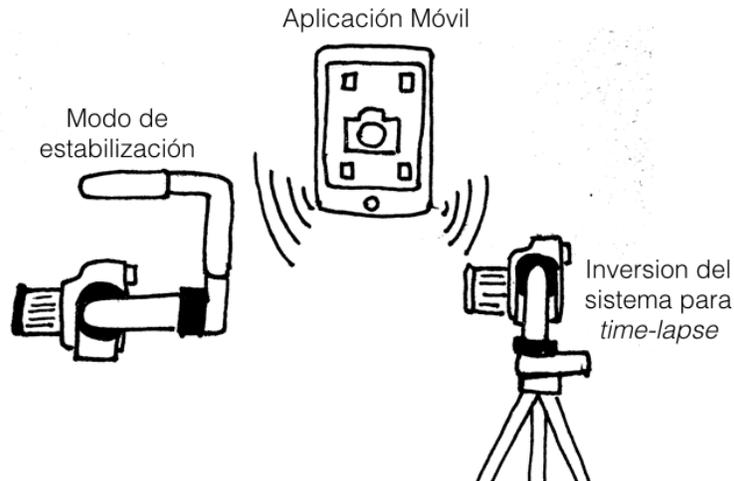


Figura 37. Boceto Propuesta 1.

- **Propuesta 2 (P2):** Esta propuesta se centra en el uso de concepto de anillo (S3.1.1) la cual sobresale al no interferir en la visión de la pantalla de la cámara por el usuario, en la Figura 38 se puede observar un boceto de esta propuesta.

En esta configuración al aplicar un sistema de anillos, por su naturaleza al rodear la cámara y posicionar el lente justo en el centro del anillo tiende a tener dimensiones excesivas por lo que se plantea que el usuario tome el sistema con ayuda de sus dos manos (S5.1.1), esto con la finalidad de que el usuario tenga el mayor control sobre el dispositivo.

Se planea la implementación de controles en la superficie (S5.2.1) del anillo y en los puntos de agarre del anillo esto con la finalidad de que el usuario tenga a su alcance las palancas y botones para el control de la referencia de estabilización, resultando útil si el usuario interactúa directamente con el dispositivo, pero deficiente si se desea interactuar a distancia.

El movimiento es generado por motores de corriente directa (S3.2.3) y su respectivo sistema de transmisión, en este caso el sistema encargado del control es un microcontrolador (S4.2) el cual procesa la información de un acelerómetro y un giroscopio con la ayuda de un filtro complementario (S1.3).

Al invertir la posición del sistema y utilizar un trípode para mantenerlo fijo se puede interactuar con las funciones de *time-lapse* con ayuda de la interfaz incorporada (S5.2.1) para activar el sistema de intervalómetro que envía la señal eléctrica de captura de imagen a la cámara por el puerto de control remoto (S2.2).

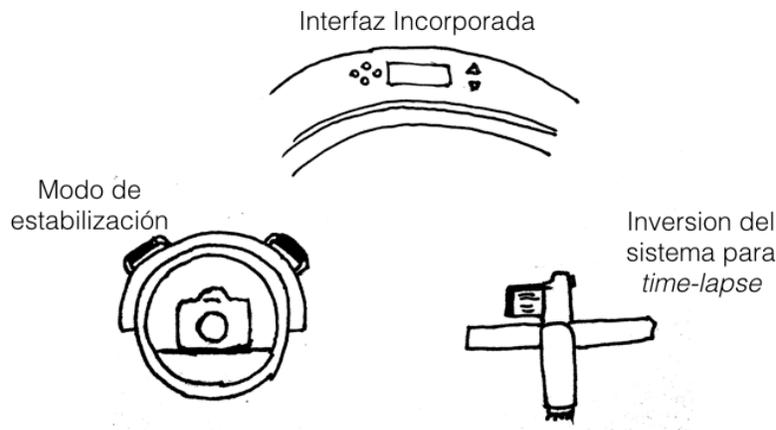


Figura 38. Boceto Propuesta 2.

- **Propuesta 3 (P3):** En esta última propuesta se basa en el uso del concepto de soporte rotatorio (S3.1.2), pero esta vez se asocia con la interacción física de pecho y mano (S5.1.2), en la Figura 39 se muestra un boceto de esta configuración.

Al apoyar el sistema en el pecho, el usuario tiene una mano libre para alterar los parámetros de la cámara manualmente, teniendo la desventaja de que la realización de tomas por debajo de la cadera resultan complicadas.

El movimiento del sistema es generado por motores a pasos (S3.2.2), los cuales son coordinados por una microcomputadora, esta a su vez procesa la información del acelerómetro y giroscopio con la ayuda de un filtro complementario (S1.3).

Gracias a la capacidad de la microcomputadora de poseer un sistema operativo, es posible utilizar el protocolo por software (S2.3) para controlar el funcionamiento de la cámara. Además, con la ayuda de una aplicación móvil (S5.2.3) y una conexión por wifi se permite el control de los parámetros de captura de *time-lapse*.

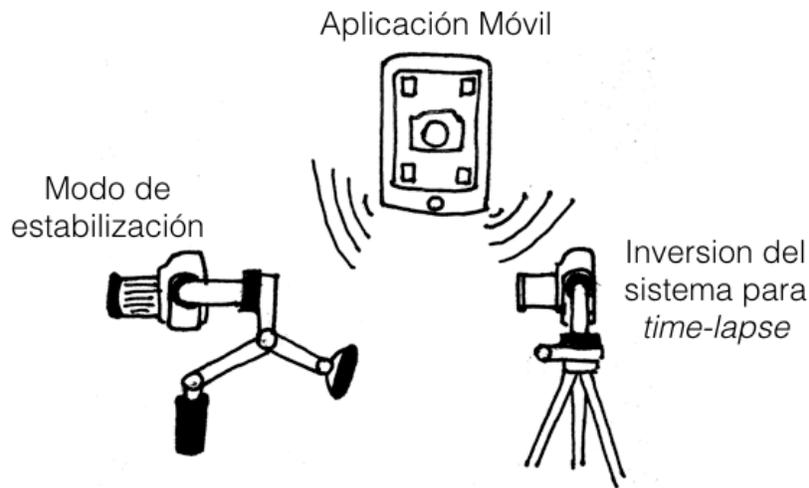


Figura 39. Boceto Propuesta 3.

Una vez presentadas las tres propuestas, se presenta la rúbrica con la que serán evaluadas las propiedades que caracterizan a cada propuesta, esto con el fin ubicar la propuesta idónea para resolver el problema o generar nuevas propuestas:

- **1. Portabilidad:** Se evalúa según las dimensiones finales estimadas del dispositivo, dando un mayor puntaje al dispositivo con menores dimensiones. Así se califica el desempeño del dispositivo para ser transportado, considerando los límites máximos y mínimos de las especificaciones del proyecto.
- **2. Facilidad para Manipulación:** Se evalúa según las limitaciones que presente el sistema de soporte para que el usuario pueda realizar cinco tipos de tomas: por debajo de la cadera, a la altura del pecho, a la altura de la cabeza, movimiento de izquierda a derecha y movimiento de arriba abajo. Con esto se califica el desempeño del sistema para realizar movimientos básicos.
- **3. Facilidad para Cargar:** Se evalúa según el peso final estimado del dispositivo, siendo mejor evaluado uno de menor peso, al permitir al usuario utilizar el dispositivo un mayor tiempo sin sufrir cansancio, considerando los límites máximos y mínimos de las especificaciones del proyecto.
- **4. Número de Piezas:** Se evalúa según el número de piezas final estimado, sobresaliendo aquellos sistemas que tengan el menor número de piezas, reduciendo con esto el tiempo de diseño, manufactura del prototipo y ensamble del sistema.
- **5. Número de Apoyos:** Se evalúan los apoyos del sistema de agarre así como la libertad de las manos para realizar otras tareas, recibiendo una mejor evaluación el dispositivo que tenga el mayor número de apoyos dejando la mayor cantidad de manos libres.

- **6. Resolución del movimiento:** Se evalúa la resolución del movimiento que puede aportar el sistema de soporte junto con el actuador propuesto, evaluando que la posición de cada cuadro durante el *time-lapse* tenga la menor diferencia con respecto al anterior evitando una mala visualización en la toma. Se considera al mejor evaluado como la propuesta con mayor resolución en el movimiento.
- **7. Distancia máxima de control:** Según la interfaz propuesta existe una distancia máxima a la que el usuario puede interactuar con la interfaz, siendo mejor evaluados aquellos dispositivos con mayor alcance.
- **8. Acceso a la interfaz:** Según la interfaz seleccionada y la ubicación de ésta, es posible evaluar la facilidad con la que el usuario puede modificar algún parámetro de control mientras utiliza el dispositivo en modo de estabilización. Para la evaluación se considera la ubicación de la interfaz y cantidad de manos libres para operar.

A partir de los parámetros establecidos previamente se evalúa el desempeño general de los sistemas con ayuda de diagramas de radar, siendo estos de utilidad al comparar las áreas obtenidas por cada uno de los dispositivos; ésto apoyado con la visualización de las ventajas y desventajas de cada uno de los dispositivos. Además, se observarán gráficamente las características sobresalientes de cada propuesta.

Una vez más, estos conceptos son evaluados por un tercero evitando las preferencias del desarrollador.

A continuación, para cada dispositivo se presenta una tabla con las características visualizadas y/o estimadas, así como su respectivo diagrama de radar. Las

características son estimadas considerando el sector de cámaras al que va dirigido el proyecto.

Tabla 18. Diagrama de Radar Propuesta 1.

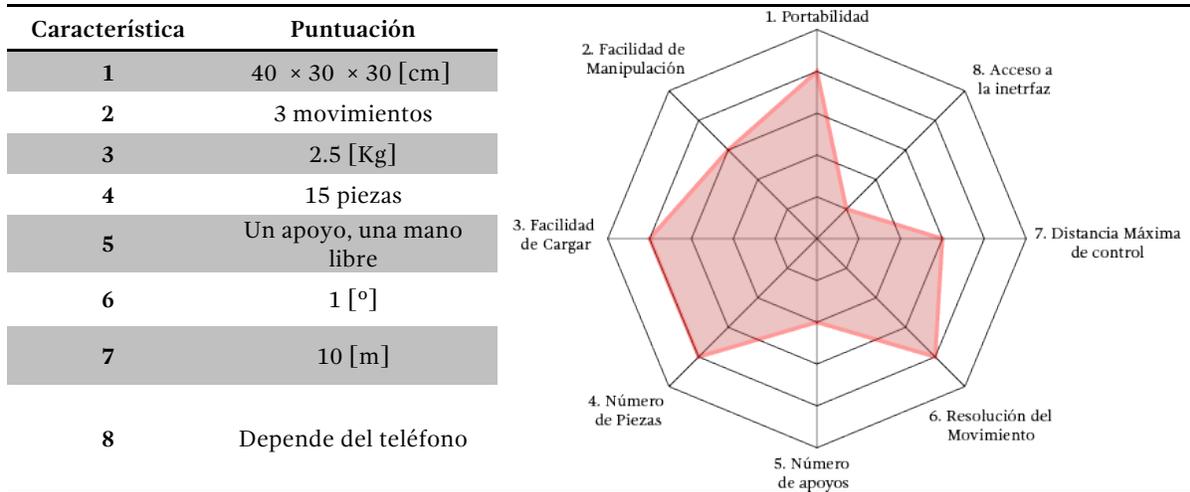


Tabla 19. Diagrama de Radar Propuesta 2.

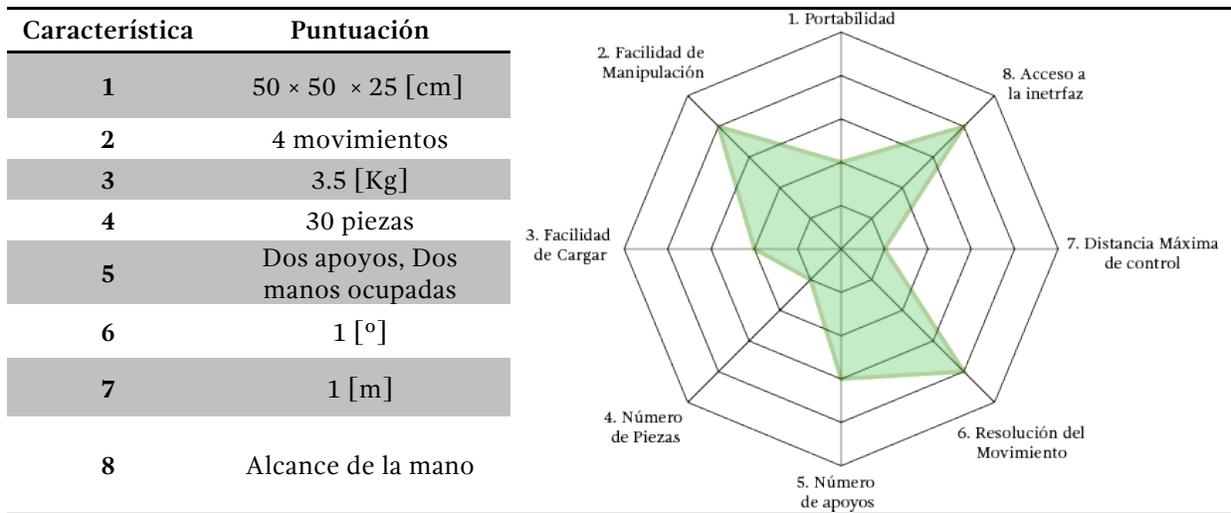
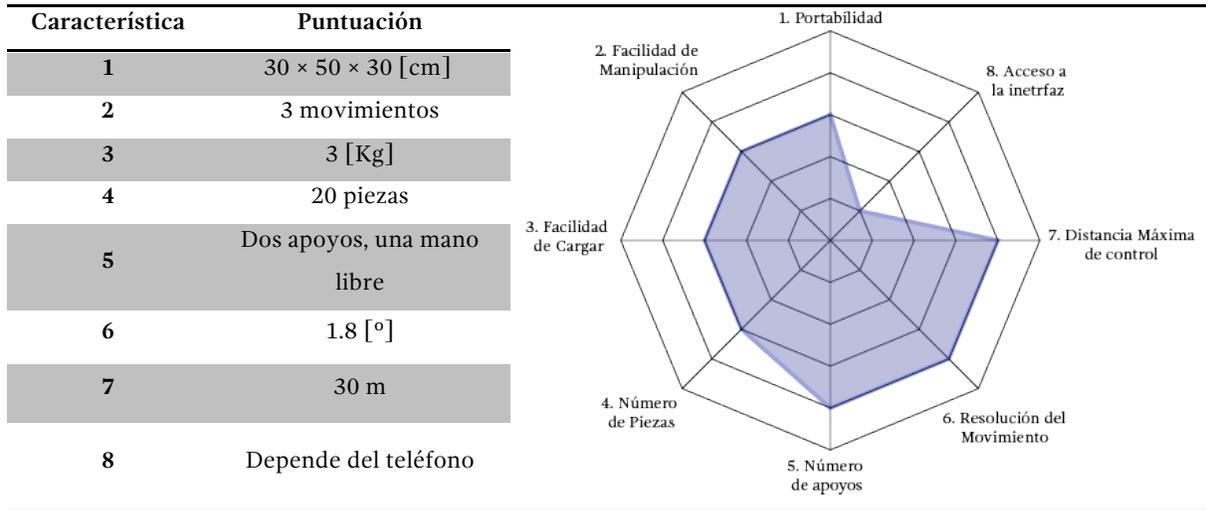


Tabla 20. Diagrama de Radar Propuesta 3.



Se puede observar en las Tabla 18,

Tabla 19 y Tabla 20 el desempeño de las diferentes propuestas, sin embargo una de las ventajas de los diagramas de radar es poder visualizar el desempeño del sistema al superponer los tres y comparar las áreas de cada propuesta. Además, se pueden observar los rubros en los que destaca una propuesta de las otras. En la Figura 40 se puede observar la superposición de los diagramas anteriores.

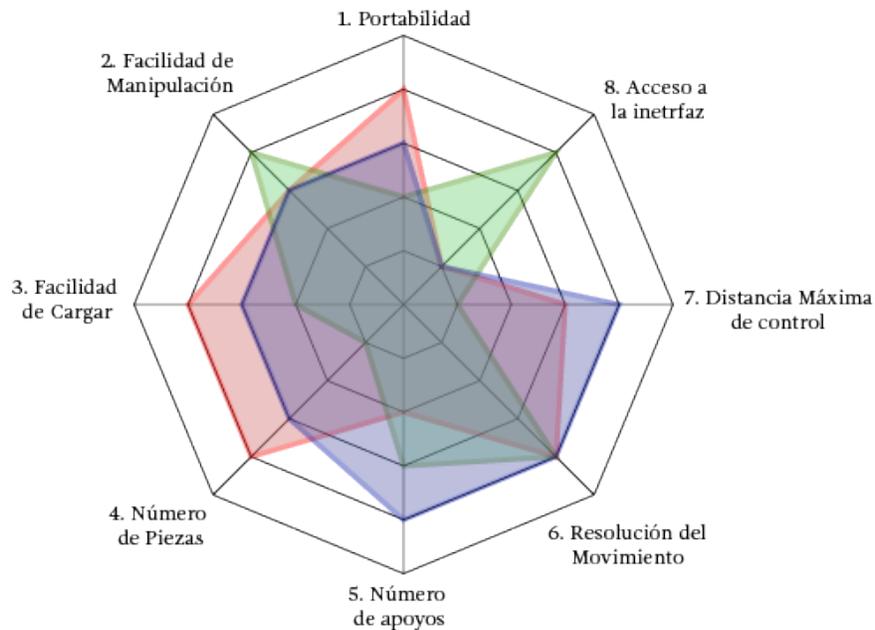


Figura 40. Diagramas de radar superpuestos.

Una vez presentados los diagramas de radar de cada una de las propuestas y su superposición, se pueden concluir ideas relevantes para obtener una propuesta final en la cual se incorporen la mayores ventajas de cada una:

- El uso de una aplicación móvil (S5.2.3) mejora la distancia máxima a la que se puede operar el dispositivo, sin embargo esto dificulta la interacción cuando el usuario se encuentra cargando el dispositivo, por otro lado la interfaz incorporada (S5.2.1) mejora el desempeño del sistema a corta distancia, por lo que se propone una integración de ambas interfaces.
- Cada una de la interfaces de soporte presentan ventajas y desventajas, en particular el sistema de soporte con dos manos (S5.1.1) resulta contraproducente para la movilidad del usuario al requerir de dos manos para su operación. Por otro lado, el sistema de soporte de tomas bajas (S5.1.5) y el sistema de soporte de mano y pecho (S5.1.2) presentan

ventajas individuales que contrarrestan las desventajas del otro, con ésto se plantea la propuesta de unir ambos conceptos.

- En el caso de los sistemas de movimiento, el soporte rotatorio (S3.1.2) tiene ventaja con respecto al de anillo (S3.1.1) al requerir un menor número de piezas, con esto reduciendo el número de piezas a diseñar, manufacturar y montar, además de requerir un menor espacio.
- Para el actuador a utilizar se observa que el uso de un motor sin escobillas (S3.2.3) resulta conveniente al no requerir de una etapa de reducción para el movimiento de la cámara, considerando que este tipo de motores son utilizados en productos comerciales.
- El uso de microcontroladores (S4.1) aporta una mayor cantidad de periféricos que facilitan la implementación del los actuadores, sensores y comunicaciones.

Tomando en cuenta las observaciones antes presentada se realiza una cuarta propuesta que conjunta elementos de las tres propuestas iniciales. En la Tabla 21 se puede observar la combinación de propuestas de solución que conforman la propuesta 4.

Tabla 21. Propuesta de Configuración 4.

Propuesta 4							
S1	S2	S3.1	S3.2	S4	S5.1	S5.2	S6
Filtro Complementario (S1.3)	Control Remoto (S2.2)	Soporte Rotatorio (S3.1.2)	Motor sin escobillas (S3.2.3)	Microcontrolador (S4.1)	Soporte para tomas de piso (S5.1.5)	Aplicación móvil (S5.2.3)	Baterías (S6)
					Soporte para pecho y mano (S5.1.2)	Interfaz Incorporada (S5.2.1)	

- **Propuesta 4 (P4):** Esta configuración toma como base el soporte rotatorio (S3.1.2), en la Figura 41 se puede observar un boceto de la combinación de los sistemas.

Se puede observar que el soporte rotatorio (S3.1.2) sujeta a la cámara por la parte inferior. El usuario puede desplazar el dispositivo con ayuda de un mango (S5.1.5) para realizar tomas bajas y con ayuda del soporte para pecho y mano (S5.1.2) permite realizar tomas superiores aportando una alta gama de movimientos con respecto a otros conceptos de configuración.

El movimiento del sistema es proporcionado por motores sin escobillas (S3.2.3), éstos a su vez son comandados por un microcontrolador (S4.1) que guía el movimiento en dirección opuesta a la variación de la posición angular de la cámara. La posición angular es medida con ayuda de los valores combinados de un acelerómetro y un giroscopio por medio del filtro complementario (S1.3).

Se puede interactuar con el sistema de forma manual con las palancas de mando (S5.2.1) ubicadas en los distintos mangos al alcance de los dedos pulgares. Al invertir la posición del sistema y utilizar un trípode para mantenerlo fijo se puede interactuar con las funciones de *time-lapse*; con ayuda de una aplicación móvil, (S5.2.3) la cual a través de una comunicación Bluetooth® envía una alerta al microcontrolador para activar el sistema de intervalómetro el cual a su vez envía la señal eléctrica de captura de imagen a la cámara por el puerto de control remoto (S2.2). La aplicación móvil aporta movilidad al usuario cuando se opera el dispositivo en modo *time-lapse* ya que permite configurar y manipular la posición de la cámara sin la preocupación de interferir en el campo visual de la cámara. Al

combinar los dos tipos de interfaz se logra sinergia para la operación manual y a distancia mejorando las capacidades del dispositivo.

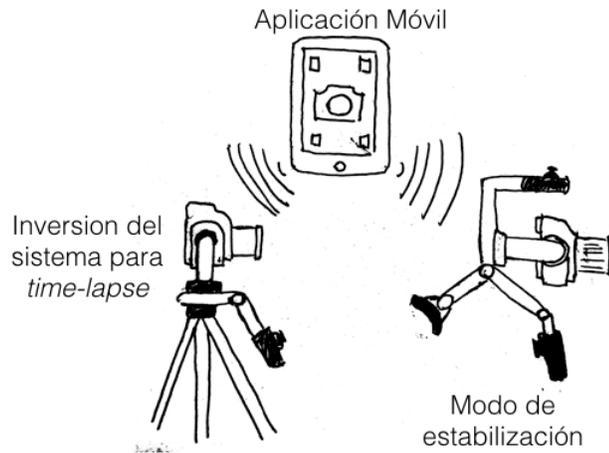
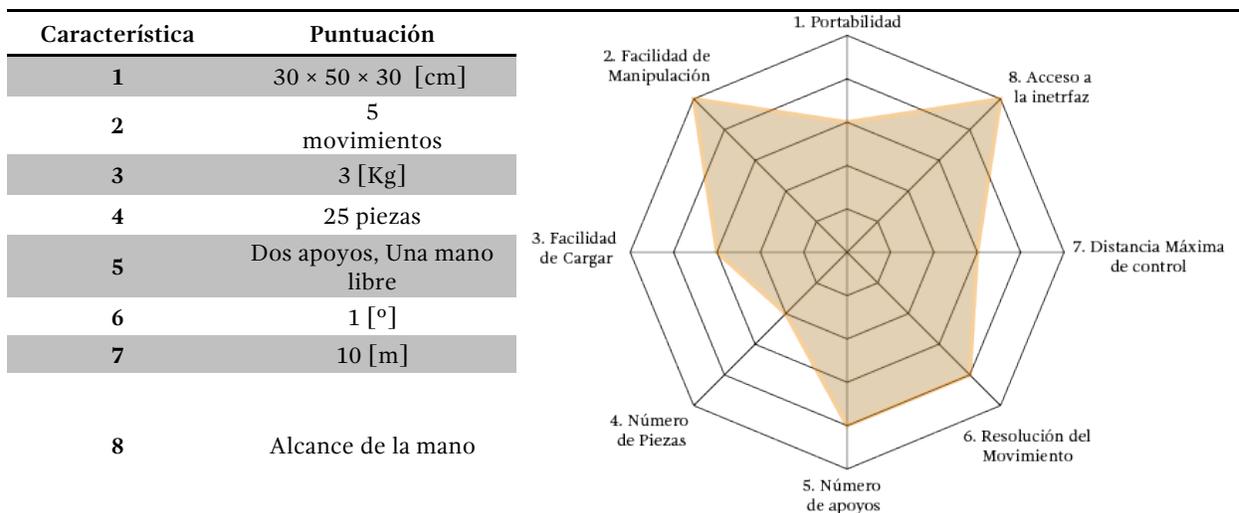


Figura 41. Boceto propuesta final.

Una vez presentada la propuesta cuatro (P4) se procede a evaluar con respecto a la rúbricas antes presentadas, en la Tabla 22 se presenta la evaluación.

Tabla 22. Diagrama de Radar Propuesta 4.



En la Figura 42 se muestran los diagramas de radar de las múltiples propuestas. De este modo se puede observar que la propuesta cuatro (P4), creada a partir de las demás, domina en dos categorías y presenta buenas calificaciones en la mayoría de los rubros.

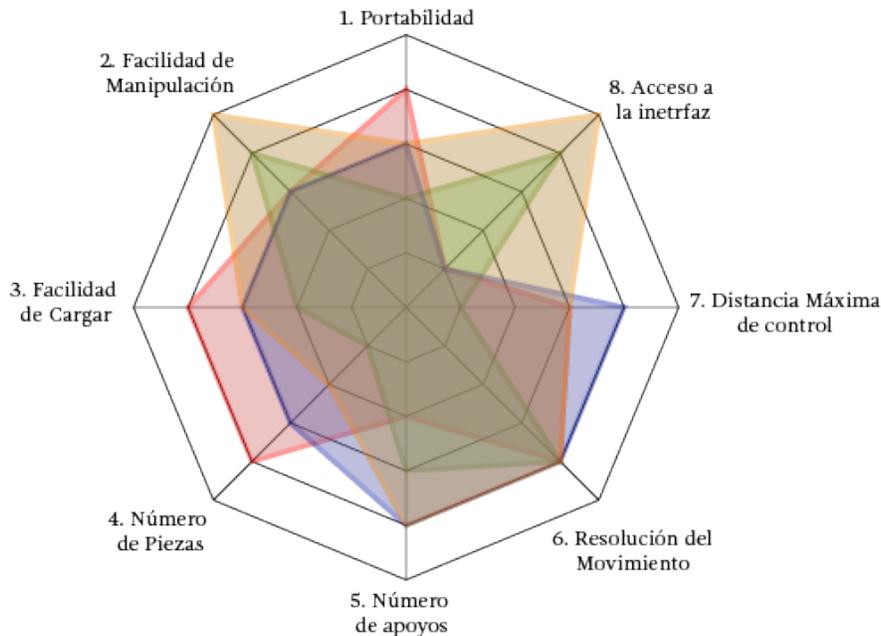


Figura 42. Diagrama de superposición.

Finalmente, se decide tomar como configuración a desarrollar la propuesta cuatro (P4). Hasta este punto se tiene desarrollado el concepto y una propuesta que pueden dar solución al problema planteado, sin embargo no se tiene definida la forma y/o la disposición específica de las piezas que componen el sistema, por lo que se prosigue con la selección y diseño de elementos.

6. Diseño a Detalle.

En esta sección se procede a llevar a la realidad la propuesta cuatro (P4) con la selección de materiales y piezas comerciales, el diseño de software y hardware necesario según cada una de las áreas de la mecatrónica (electrónica, mecánica y computación). A lo largo de esta sección se hace referencia a diversas metodologías que fungen como herramientas para el diseño ya sea software o hardware.

6.1 Selección de elementos electrónicos

En esta sección se presenta la selección de materiales electrónicos, tales como sensores, actuadores, etc. En el mercado existen múltiples piezas, sin embargo para la selección del dispositivo se contemplan los objetivos y restricciones del proyecto, la disponibilidad dentro y fuera del país, así como las referencias de usuarios dentro de las páginas de vendedores. En esta sección solo se presentan los elementos seleccionados.

Selección de Actuadores

Tras una búsqueda de motores sin escobillas, se llegó a los modelos especializados en equipo de estabilización, estos motores cuentan con un mayor número de polos aumentando el par y reduciendo la velocidad, esto se debe a que es necesario un mayor número de ciclos eléctricos para completar un ciclo mecánico. Se selecciona el motor GBM8108-90T, con las siguientes especificaciones [91] [92]:

- **Motor:** *Brushless Gimbal Motor.*
- **Dimensiones:** 81 [mm] × 8[mm].
- **Peso:** 219 [g].
- **Configuración:** 36N42P (36 bobinas con 42 polos).
- **Voltaje de Operación:** 9 a 12 [V].
- **Resistencia interna:** 9.3 [Ω].
- **Bobina:** 90 [vueltas].
- **Rango de cámaras:** 1200 a 3000 [g].
- **Par:** 6 [Kg/cm].

El motor seleccionado es actualmente utilizado para estabilizadores que soportan equipos de 1200 a 3000 [g], lo cual corresponde a las especificaciones presentadas en la Tabla 9. En ella se destaca que los valores máximos de peso para la cámara y el lente son de 1300 [g] y 600 [g] respectivamente, dando un total de 1900[g] que corresponde al rango de cámaras soportadas por el motor seleccionado. En la Figura 43 se muestra una imagen del motor a utilizar.



Figura 43. Motor GBM8108-90T.

Selección de Etapa de Potencia

El mercado ofrece un gran lista de drivers y etapas de potencia dedicadas para motores sin escobillas [93], sin embargo en este caso para descartar elementos se decide buscar aquellos controladores disponibles dentro del país con el fin de obtener un repuesto en caso de falla de forma rápida. En consecuencia, la lista de componentes se reduce a uno solo, dado que en México el único disponible que da solución a las necesidades del proyecto es el “L6234 Three Phase Motor Driver” importado por AG Electronica S.A. de C.V.

El L6234 es un puente triple DMOS con voltaje de alimentación de entrada de hasta 52 [V] y corriente de salida de 5[A]. Está disponible en empaquetado DIP20 y SO20. Todas las entradas son compatibles con TTL / CMOS, cada medio puente es controlado por bit de entrada y un bit de activación [94] [95]. En la Figura 44 se muestra el circuito básico obtenido de la hoja de datos [95] para la implementación de un motor sin escobillas sin retroalimentación de posición.

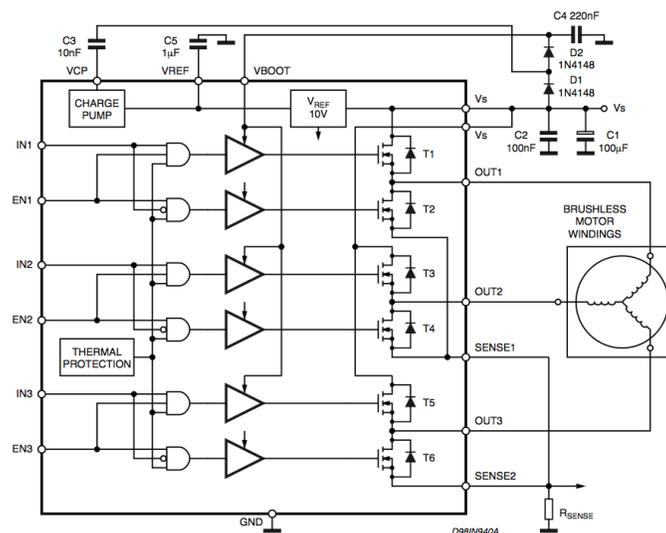


Figura 44. Circuito Base L6234. [94]

Selección de Sensores

Para el sistema de medición (S1) se determina el uso de un filtro comparativo, el cual toma la base datos de un acelerómetro y un giroscopio para realizar un filtro digital y obtener los ángulos de posición del sistema, dada la necesidad mínima de un acelerómetro y un giroscopio por grado de libertad, se necesitará contar con dos de cada uno.

Después de una investigación se llega a una larga lista de componentes disponibles en el mercado, una vez más acotando el mercado a los dispositivos disponibles dentro del país y dispositivos aplicados en el área de estabilizadores. En ésta área destaca el IMU¹¹ MPU-6050 adoptado por los fabricantes de teléfonos inteligentes y tabletas, es el primer dispositivo de MotionTracking® que integra 6 ejes que combina un giroscopio de 3 ejes, acelerómetro de 3 ejes, y un procesador digital de movimiento (DMP®), de dimensiones 4×4×0.9 [mm], bajo consumo de energía (2.3 a 3.4 [V]).

El MPU-6050 cuenta con tres convertidores analógicos digitales de 16 bits para la digitalización de las salidas del giroscopio y tres ADCs de 16 bits para la digitalización de las salidas del acelerómetro. Cuenta con diversas resoluciones tanto para el giroscopio como para el acelerómetro. Utiliza el protocolo de comunicación I²C a 400kHz y es resistente a los golpes, todo esto según el fabricante a través de la hoja de datos [96].

Ya que este dispositivo es bastante popular existen suficiente documentación así como librerías para múltiples gamas de microcontroladores como: PIC 18,

¹¹ IMU: Del inglés *Inertial Measurement Unit*, es un dispositivo electrónico que ayuda a medir e informar acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un sistema, usualmente incorpora acelerómetros y giróscopos. En algunos caso incorpora magnetómetros, GPS, sensores de temperatura y más.

ATmega, y MSP por mencionar algunos [97]. Por otro lado, múltiples fabricantes han optado por generar módulos [98] que incluyen al dispositivo y su circuito básico. En la Figura 45 se presenta el módulo ITG/MPU, a la izquierda el circuito interno y a la derecha la visualización del dispositivo.

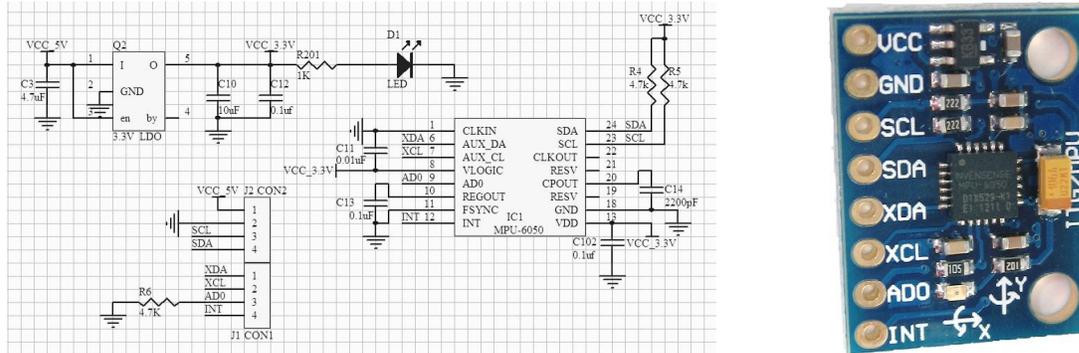


Figura 45. Módulo ITG/MPU [99], a la izquierda el circuito interno y a la derecha la visualización del dispositivo.

Selección de Sistema de Comunicación

Se procede con la selección de un tipo de comunicación que funja como interfaz entre el dispositivo y el teléfono móvil, a continuación se presenta una lista de posibles comunicaciones viables:

- Bluetooth 1.2®:** Primer comunicación estable Bluetooth® liberada al consumidor en 2003, que permite una transmisión de datos de hasta 721 [Kbits/s] [100], existen módulos como el HC-05 y 06 los cuales permiten entablar una comunicación con el perfil SPP (*Serial Port Profile*). Desafortunadamente los dispositivos iOS® sólo son compatibles con los perfiles Bluetooth: HFP, PBAP, A2DP, AVRCP, PAN, HID y MAP. Para los perfiles como SPP es necesario un chip de autenticación que sólo se puede comprar con una membresía MFi [101] que se otorga a empresas registradas.

- **Bluetooth 4.0®**: Es una mejora a la tecnología Bluetooth® llamada “*Bluetooth Smart*” o “*Bluetooth Low Energy*”, esta permite una transferencia de datos de hasta 4 [Mbits/s] [102]. Es compatible con la mayoría de los teléfonos móviles, en iOS® es compatible desde iOS 7® [103] y en Android® es compatible y estable a partir de la versión 4.4 (*Jelly Beans*) [104]. Finalmente, la página oficial de Bluetooth® proporciona una lista de todos los dispositivos comerciales que portan esta tecnología [105]. Existen diversos dispositivos que permiten aportar esta comunicación, entre ellos destaca el dispositivo con el número de pieza nRF8001 de la compañía Nordic Semiconductor® [106] disponible en múltiples *shields* y módulos.

No se toman en cuenta comunicaciones de área local como la SSH ya que requiere de una red local la cual normalmente es generada por un modem, por lo que resulta complicado generar este tipo de conexión en una locación remota. No se toma en cuenta la conexión USB ya que requiere que el dispositivo este conectado al teléfono por medio de un cable limitando la movilidad del usuario y yendo en contra de la idea de aportar libertad de uso.

Como se menciona en la sección 2.4 la mejor práctica en el desarrollo móvil es la compatibilidad para múltiples plataformas, es por ello que se decide utilizar el sistema Bluetooth 4.0® que da soporte a diferentes sistemas operativos para dar comunicación entre el dispositivo y el teléfono móvil.

Finalmente se elige el modulo “*Bluefruit LE*” del fabricante Adafruit® [107] que incorpora la pieza nRF8001 con su circuito básico, en la Figura 46 se muestra una imagen del modulo seleccionado.



Figura 46. Bluefruit LE [107].

Este dispositivo se comunica utilizando el protocolo ACI (*Application Controller Interface*) basado en la comunicación SPI (*Serial Peripheral Interface*), la cual complementa con tres bits, dos de estatus de transmisión y recepción de información, y un bit para el control del reinicio del dispositivo [108].

Diseño de Temporizador

El sistema de temporizador comprende dos rubros, el primero hace referencia a la medición del tiempo durante la captura de un *time-lapse*, como se menciona en la sección 2.1 en la Tabla 1 los intervalos de tiempo rondan desde los cinco segundos hasta los treinta, por lo que se debe de determinar una tecnología que permita realizar la medición de forma apropiada. Es por ello que se contemplan diferentes métodos de medición de tiempo, sin embargo destaca el uso de un cristal oscilador de 32.768 [KHz] asociado a un *Timer* dentro del microcontrolador a utilizar. En la Figura 47 se muestra el encapsulado DS10 a utilizar para el cristal.



Figura 47. Cristal oscilador encapsulado DS10. [109]

El uso de un cristal de frecuencia baja aumenta la exactitud entre cada oscilación, pasando de un error entre ± 5 y ± 10 [Hz] para osciladores internos hasta ± 1 y ± 2 [Hz] para osciladores externos como el propuesto, todo esto según la especificaciones del fabricante para el microcontrolador por definir [110] [111] [112], buscando con esto que la medición de cada segundo se aproxime a la realidad.

Para este caso no se considera el uso de un RTC (*Real Time Clock*) como lo es el dispositivo DS1302, se considera que este tipo de elementos están sobre calificados para la aplicación planteada. A pesar de que se basa en el uso de un cristal oscilador de baja frecuencia, aporta funciones de lectura de tiempo en múltiples escalas desde segundos hasta años utilizando como interfaz un sistema de comunicación I²C, siendo que para la aplicación del dispositivo planteado únicamente se necesita el conteo de intervalos en segundos.

Por otro lado, en esta sección se contempla la implementación del método de captura, recordando que en la sección 2.1.1 se menciona el proceso de funcionamiento del sistema de captura utilizando la “terminal de accesorios”.

Con el fin de aislar la electrónica del sistema y la electrónica interna de la cámara se propone el uso de optoacopladores que serán activados por salidas digitales del

microcontrolador por definir, aportando así seguridad en caso de falla en alguno de los sistemas quedando desacoplados uno del otro. Además, aporta modularidad al no inferir la diferencia entre los distintos modelos de cámaras, para ésta tarea se considera el uso de la pieza 4N25.

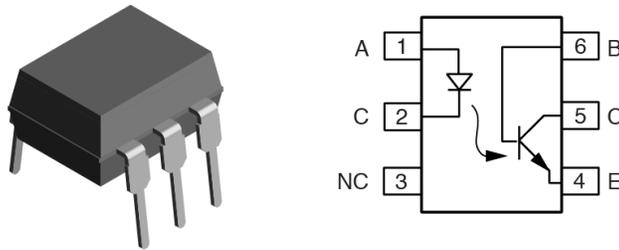


Figura 48. Optoacoplador 4N25. [113]

Selección de Microcontrolador

En las secciones anteriores se presentan las soluciones a diversos puntos, cada una de estas soluciones requieren de diversos hardware para su funcionamiento, lo que impacta de forma directa en la selección de un microcontrolador que tenga la capacidad de dar soporte a estos dispositivos. Se presenta en la Tabla 23 la recopilación de dispositivos así como sus requerimientos de uso desde el punto de vista del microcontrolador.

Tabla 23. Requerimientos de periféricos.

Dispositivo	Periféricos	Alimentación [V]
Motor 1: L6234	3 salidas digitales y 3 canales PWM	12
Motor 2: L6234	3 salidas digitales y 3 canales PWM	12
ITG/MPU	Modulo I ² C e interrupción extraña (en caso de usar el Procesador Digital de Movimiento)	5 – 3.3
Bluefruit LE	Modulo SPI, una salida digital y una interrupción externa	5 – 3.3
Circuito de disparo	2 salidas digitales	5
Temporizador	Timer/Contador con entrada para oscilador externo	

Con base en la tabla antes presentada se puede dar lugar a la selección de un microcontrolador que cumpla por lo menos con las siguientes características:

- 9 Salidas digitales.
- Modulo de comunicación I²C (SDA, SCL).
- Modulo de comunicación SPI (MISO, MOSI, SLK).
- 2 Interrupciones externas.
- Timer/Contador con soporte de oscilador externo independiente.
- 6 canales PWM (Timers/Contadores independientes a oscilador externo).

Ya que existen múltiples fabricantes de microcontroladores que ofrecen una gran cantidad de productos que cumplen con las especificaciones, se propone reducir la

búsqueda a aquellos sistemas que tengan distribución en México, esto con el fin de eliminar el tiempo de espera en caso de un envío internacional.

Por otro lado en caso de que el microcontrolador únicamente este disponible en un encapsulado de montaje superficial se da preferencia a aquellos microcontroladores que estén disponibles en una tableta de desarrollo, reduciendo considerablemente el tiempo de desarrollo, diseño y manufactura de un circuito impreso.

Sumado a esto, se le da preferencia a aquellas familias de microcontroladores que tengan soporte de librerías para los diferentes dispositivos a usar, en este caso las tabletas ITG/MPU y *Bluefruit LE*.

Con base en lo anterior se propone el uso del microcontrolador ATmega 2560 del fabricante Atmel®, disponible en la tableta de desarrollo Arduino® Mega. Este microcontrolador ofrece las siguientes características útiles para el proyecto, todo esto según la hoja de especificaciones [115]:

- Máxima velocidad de operación: 16 [MHz].
- 2 Timer/Contadores de 8-Bits.
- 4 Timer/Contadores de 16-Bits.
- 4 Canales PWM de 8-Bits.
- 6 Canales PWM de resolución programable: 2 a 16 Bits.
- Contador de tiempo real con oscilador externo (Timer 2).
- Modulo de comunicación I²C (SDA, SCL).
- Modulo de comunicación SPI (MISO, MOSI, SLK).

Sin embargo la plataforma Arduino® limita el uso de muchos de los periféricos a utilizar, por lo que se opta por no utilizar el lenguaje Arduino® y se recurre a la

distribución de C para AVR, un lenguaje que permite acceder y modificar los registros de los diversos periféricos con mínimas restricciones.

Selección de Batería

Según la sección 4, se indica el uso de baterías para el sistema ya que no existe actualmente una opción viable para almacenar la energía necesaria para alimentar un dispositivo de esta índole. Del mismo modo, se especifica que la necesidad N7 no es de relevancia para un modelo funcional, sin embargo es de suma importancia para una futura iteración.

Es por ello que se utiliza una batería genérica recargable de Níquel y Cadmio, que aporte las características mínimas necesarias para el funcionamiento del sistema. Se presenta la batería seleccionada en la Figura 49.



Figura 49. Batería seleccionada.

Esta batería cuenta con las siguientes especificaciones:

- Voltaje : 9.6 [V]
- Amper/Hora: 1600 [mA/h]
- Dimensiones: 10 × 5.5 × 1.5 [cm]
- Peso: 300 [g]

6.2 Diseño de Estructura y Diseño de Ensamble

Con base en la propuesta cuatro (P4) en la sección 5 y los elementos seccionados en el apartado anterior (Sección 6.1) se presentan ideas concretas que contemplan la disposición de los elementos, geometrías, así como lineamientos y recomendaciones de diseño [116].

Para poder determinar las medidas de la estructura según las especificaciones de la sección 3.3, se toma como parámetro de diseño una de las cámaras réflex más grandes y representativas del mercado, la EOS-1D® Mark IV [117] una cámara de la familia réflex digitales y compactas del fabricante Canon®, esta cámara cuenta con las siguientes dimensiones: $15.6 \times 15.6 \times 7.9$ [cm] y un peso de 1.2 [Kg] sin optometría, este equipo se muestra en la Figura 50.



Figura 50. EOS-1D® Mark IV.

Se elige esta cámara como punto límite por ser de uso profesional y un modelo representativo del tipo réflex. Del mismo modo esta cámara rebasa las dimensiones del grupo propuesto en la sección 3.3, por lo que el diseño de soporte se hará con respecto a ella teniendo como finalidad, cubrir todos los equipos por debajo de esta.

Para poder visualizar cada una de las configuraciones planteadas así como la forma y número de piezas se realizan modelos digitales en 3D y explosivos que son presentados a continuación. Cabe señalar que los modelos 3D presentados en esta sección tienen el fin de visualizar y dimensionar de forma general las piezas por lo que las medidas y formas son aproximaciones de la estructura final.

A continuación se presenta el análisis de ensamble con base en la metodología de diseño para ensamble de Boothroyd [118] [6]. Para este método se consideraron como piezas esenciales actuadores y sensores ya que estos al ser seleccionados como elementos comerciales deberán acoplarse al diseño propuesto.

Estructura 1 (E1)

Esta propuesta se basa en el uso de un perfil cilíndrico el cual deberá ser doblado para generar las dos estructuras que rotarán con ayuda de cada uno de los motores. Ya que se diseña el dispositivo para múltiples cámaras las cuales tienen diferentes formas y dimensiones, se agregan elementos de ajuste para modificar la posición de la cámara y alinear el centro de visión del lente con el centro de rotación del sistema.

A su vez, para alojar la cámara se incorpora una montura para tripiés estándar, este elemento se ensambla a la cámara con ayuda de un tornillo y a su vez se acopla a una cavidad que permite sujetar de forma segura la cámara y liberarla de forma

sencilla, esto con la finalidad de reducir los pasos y tiempos para montar la cámara considerado como especificación en la sección 3.2, se reduce el tiempo y se facilita el uso de múltiples equipos. En la Figura 51 se muestra una zapata estándar y la forma en como se acopla a una cámara.



Figura 51. Zapata estándar.

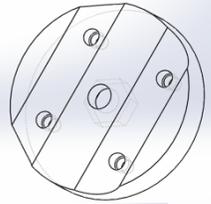
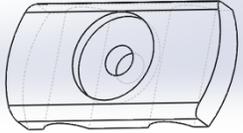
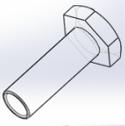
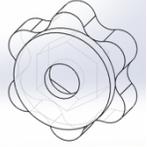
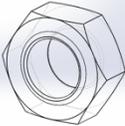
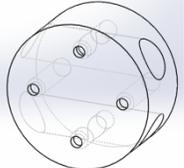
Se considera una cavidad para alojar el IMU previamente seleccionado y un rodamiento para facilitar el movimiento relativo entre la estructura interna y externa, a su vez se considera el uso de un contrapeso en la segunda estructura con el fin de equilibrar el sistema, se profundizará en el cálculo y geometría del contrapeso posteriormente.

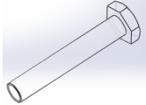
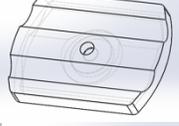
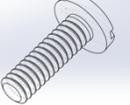
A continuación se presenta en la Tabla 24 una lista de las piezas que comprenden la estructura, incluyendo el nombre, dimensiones aproximadas, así como una descripción del funcionamiento.

Para esta estructura se tiene un total de 19 piezas diferentes, sin embargo el ensamble requiere de 39 piezas, de las cuales 9 tipos piezas son elementos comerciales y 10 deben de ser manufacturadas a medida. En la Figura 52 y Figura 53 se muestran imágenes del sistema ensamblado y un explosivo respectivamente, únicamente con el fin de visualizar el acomodo de las piezas.

Finalmente se considera un elemento que equipare el momento del motor ubicado en el “Perfil 2” con respecto al eje de rotación Roll, este elemento se ubica dentro de la pieza “Cople Rodamiento- Estructura Exterior”.

Tabla 24. Lista de piezas estructura 1.

No. Pieza	Nombre	#	Dimensiones (cm)			Descripción	Imagen
			A(L)	B(D)	C		
1	Motor	2	2.6	8.7	-	Actuador empleado para dar movimiento a la estructura.	
2	Cople Motor – Estructura Externa	2	0.7	5.5	-	Permite unir la estructura al motor.	
3	Tornillo Motor	12	1	0.5	-	Actúa de unión entre el cople y el motor	
4	Sujetador	2	5.5	2.5	0.6	Ayuda a presionar ajustar y presionar los elementos estructurales.	
5	Perfil 1	2	28	15	1.5	Actúa como elemento de soporte para albergar a la cámara.	
6	Tornillo Base	3	2	1.6	-	Actúa como elemento de ajuste para modificar la posición de la cámara.	
7	Mariposa	2	0.8	2.5	-	Actúa como interfaz entre el usuario y la tuerca para facilitar el ajuste.	
8	Tuerca Base	2	0.5	1.6	-	Actúa como elemento de ajuste para modificar la posición de la cámara.	
9	Cople Motor - Estructura Interna	1	2.5	5	-	Se utiliza para unir la estructura exterior con el motor interno.	

10	Cople Rodamiento-Estructura Exterior	1	2.5	5	-	Se utiliza para unir la estructura exterior con el rodamiento, además de almacenar el contrapeso.	
11	Rodamiento	1	1.6	2	-	Ayuda a suavizar el movimiento relativo entre estructuras.	
12	Cople Rodamiento-Estructura Exterior	1	2	5	-	Se utiliza para unir la estructura interior con el rodamiento.	
13	Tornillo Rodamiento	1	4	1.6	-	Actúa como elemento de ajuste para modificar la posición de la cámara además de actuar como eje.	
14	Perfil 2	2	20	10	1.5	Actúa como elemento de soporte para albergar a la cámara.	
15	Soporte Cámara Base	1	5	2.5	0.8	Actúa como elemento de ajuste para modificar la posición además de soportar a la cámara.	
16	Soporte Cámara Superior	1	5	2.5	1.5	Actúa como elemento de ajuste para modificar la posición además de soportar a la cámara.	
17	Sello Zapata	1	1.5	1.2	0.8	Actúa como elemento de ajuste entre la el soporte para la cámara y la zapata.	
18	Tornillo Sello	1	1.7	0.4	-	Actúa como eje para permitir la rotación entre el sello y la base.	
19	Tuerca cello	1	0.2	0.3	-	Actúa como elemento de ajuste para mantener en su posición el tornillo del sello.	

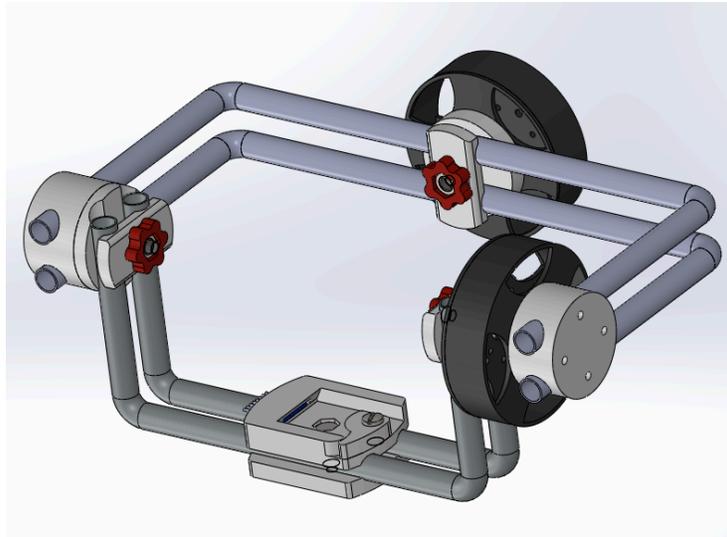


Figura 52. Estructura 1: Ensamblada.

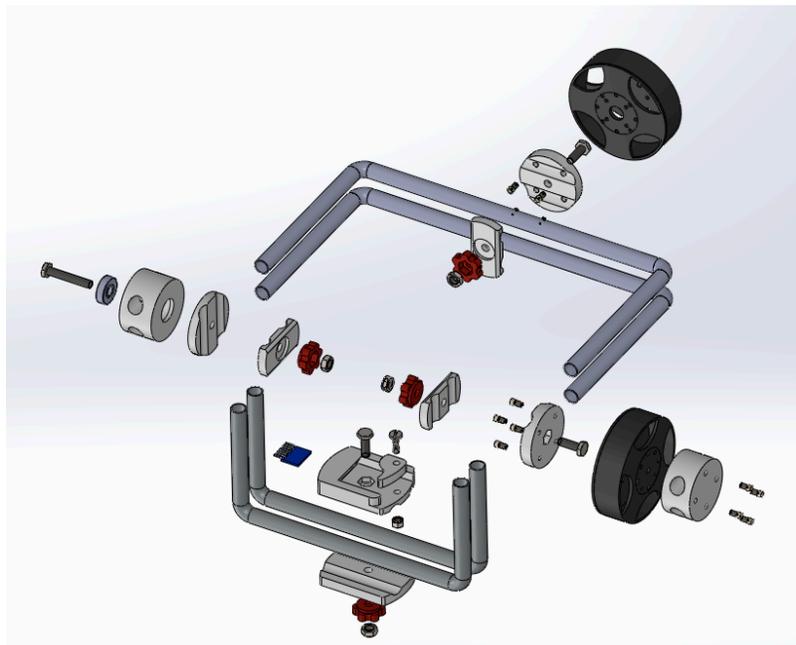


Figura 53. Estructura 1: Explosivo.

Una vez presentada esta propuestas se prosigue con la evaluación de diseño para el ensamble, con la finalidad de obtener una eficiencia de ensamble la cual determina la relación entre el número de piezas y el tiempo en que se ensambla el sistema, esta eficiencia se obtiene para cada propuesta y se utiliza como parámetro para elegir una estructura final así como para proponer un diseño final.

Para los propósitos de este trabajo se emplea el análisis de ensamble manual y automático de Boothroyd, con el fin de evaluar la cantidad de piezas utilizadas en el ensamble y comparar las eficiencias de ambos métodos para obtener una mejor retroalimentación. Las tablas de evaluación del método se pueden encontrar en el apartado 10. Con ayuda del análisis se obtiene una eficiencia de ensamble del 12% y del 15% para el análisis manual y automático respectivamente.

Estructura 2 (E2)

El método de diseño para ensamble de Boothroyd recomienda un rediseño para eficiencias menores al 50%, por lo que se presenta un rediseño considerando recomendaciones y lineamientos de manufactura y ensamble [119] [120] [121]. A continuación se presenta la Tabla 25 de piezas de la estructura rediseñada.

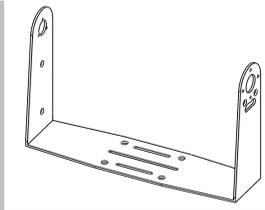
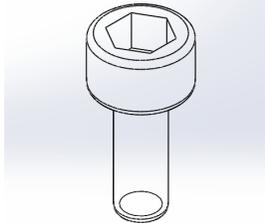
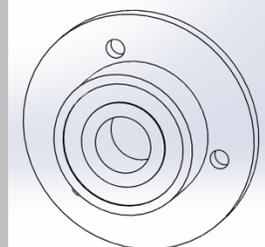
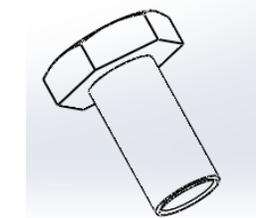
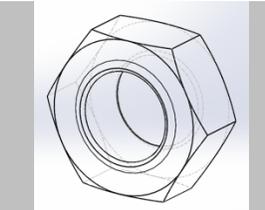
Para esta estructura se tiene un total de 10 piezas diferentes, sin embargo el ensamble requiere de 21 piezas de las cuales ocho tipos de pieza son elementos comerciales y solo se deben fabricar dos elementos a medida. En la Figura 54 y Figura 55 se muestran imágenes del sistema ensamblado y un explosivo respectivamente.

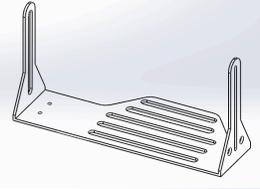
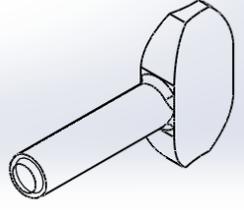
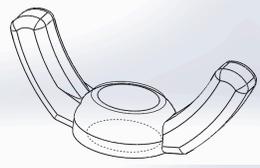
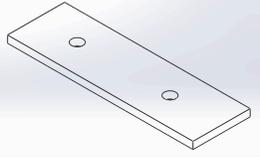
Las distintas dimensiones del sistema se obtienen según el sector de cámaras fotográficas seleccionado según la sección 3.3. Como parámetros de diseño para los perfiles *Pitch* y *Roll* se consideran las dimensiones (peso, grosor, alto y ancho)

de la cámara más grande de la correspondiente gama, por otro lado se considera un tornillo para el ajuste variable de la posición de la cámara sobre el perfil *Pitch*.

Con el fin de fomentar el movimiento relativo entre la estructura interna y externa se considera el uso de un rodamiento, para este caso se selecciona un rodamiento con chumacera, la cual es de utilidad para fijar el rodamiento a la estructura con ayuda de tornillería. Finalmente, a diferencia de la estructura E1, se considera como un elemento individual al contrapeso.

Tabla 25 Lista de piezas estructura 2.

No. Pieza	Nombre	#	Dimensiones (cm)			Descripción	Imagen
			A(L)	B(D)	C		
1	Motor	2	2.6	8.7	-	Actuador empleado para dar movimiento a la estructura.	
2	Perfil Roll	1	22	15	5	Actúa como elemento de soporte para albergar a la cámara.	
3	Tornillo Motor	8	1	0.5	-	Actúa de unión entre los perfiles y el motor	
4	Rodamiento	1	2.5	2	-	Ayuda a suavizar el movimiento relativo entre estructuras.	
5	Tornillo 1/4	3	2	1.6	-	Actúa como elemento de ajuste para modificar la posición de la cámara y fijar el contrapeso.	
6	Tuerca 1/4	2	0.5	1.6	-	Actúa como elemento de ajuste para modificar la posición de la cámara y fijar el contrapeso.	

7	Perfil Pitch	1	18	10	1.5	Actúa como elemento de soporte para albergar a la cámara.	
8	Tornillo 1/4 con oreja	1	4	2	1.5	Actúa como elemento de ajuste para modificar la posición además de soportar a la cámara.	
9	Mariposa 1/4	1	2.5	0.8	1	Actúa como elemento de ajuste para modificar la posición además de soportar a la cámara.	
10	Contrapeso	1	10	5	0.5	Ayuda a balancear el dispositivo contrarrestando el peso del motor en el perfil Roll.	

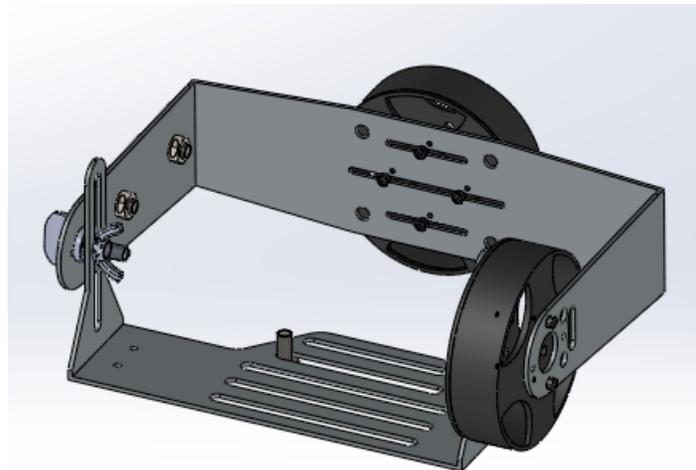


Figura 54 Estructura 2: Ensamblada.

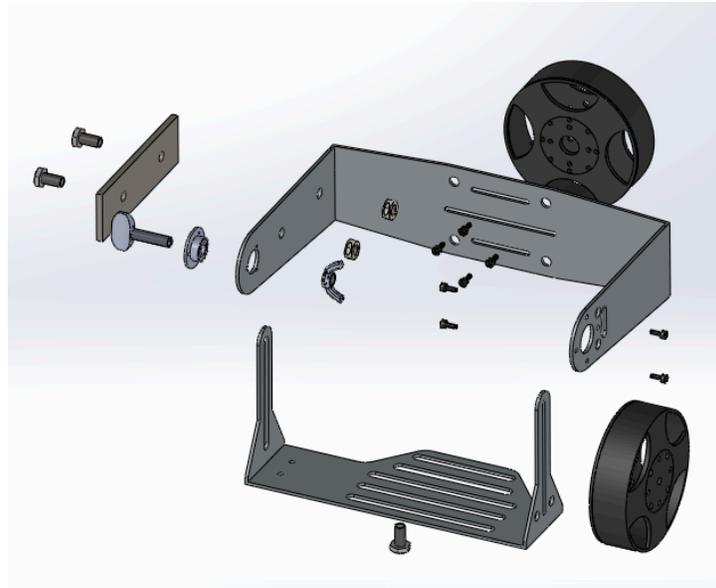


Figura 55 Estructura 2: Explosivo.

Análisis de Ensamble Método Boothroyd Estructura 2

Las tablas de evaluación del método se pueden encontrar en el apartado 10. Gracias al análisis de ensamble se reducen drásticamente las piezas de la primera iteración, considerando que al inicio del proceso se tenía un ensamble de 19 piezas diferentes con 39 piezas en total y una eficiencia del 15%. Al finalizar el análisis de ensamble se llegaron a 10 piezas diferentes con 21 piezas en total y una eficiencia del 22% y 26% para el análisis manual y automático respectivamente.

Es propio mencionar que no se logra un aumento mayor en la eficiencia de ensamble debido a que los motores seleccionados requieren de tornillería para su sujeción por lo que estas piezas son imprescindibles, esto mismo sucede con el rodamiento y tornillería necesaria para promover el movimiento relativo entre estructuras, una solución para aumentar la eficiencia de ensamble es diseñar un actuador optimizado para la aplicación sin embargo esto rebasa los alcances del proyecto.

Con esto se logra el objetivo de reducir piezas, al finalizar el proceso de las 21 piezas que comprenden el ensamble, de las cuales únicamente se deben manufacturar dos piezas, minimizando drásticamente la inversión de tiempo en la manufactura del modelo.

6.3 Análisis de Contrapeso

Para ayudar a la estabilización del sistema, se considera el uso de un contrapeso en la sección de *Roll* de la estructura. Éste contrapeso se añade para igualar el momento generado por el peso del motor ubicado en el extremo de la estructura *Pitch*, con el fin de equilibrar el sistema desde el punto de vista estático eliminando momentos no deseados en la compensación dinámica que se realiza por medio del movimiento del actuador. A continuación se presentan el diagrama de cuerpo libre de la estructura *Roll* en la Figura 56, se muestran las posiciones de los elementos así como las componentes que genera cada elemento. Se ilustra con rojo, verde y negro al motor, contrapeso y estructura respectivamente.

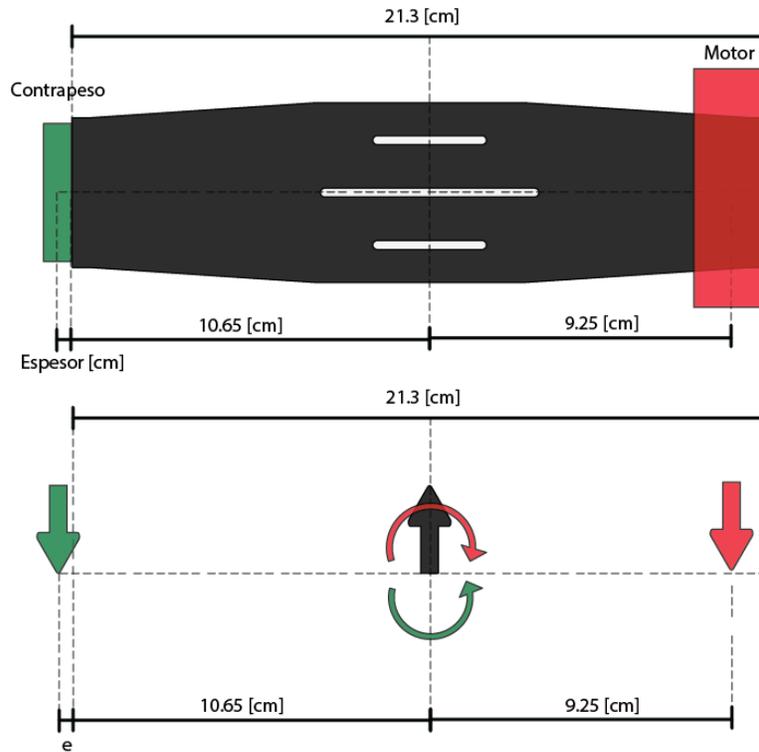


Figura 56. Diagrama de cuerpo libre.

Una vez conocidas las reacciones y su ubicación en el cuerpo es posible calcular los momentos generados por cada fuerza.

$$D_{motor} = 9.25 \text{ [cm]}, P_{motor} = 9.25 \text{ [Kg]}$$

$$D_{contrapeso} = e_{contrapeso} + 10.65 \text{ [cm]}$$

$$F_{contrapeso} = (m_{contrapeso})(g) = \frac{\rho_{contrapeso}}{V_{contrapeso}}(g)$$

$$V_{contrapeso} = (l_{contrapeso})(a_{contrapeso})(e_{contrapeso})$$

$$\sum M = M_{motor} + M_{contrapeso} = 0$$

$$-(F_{motor})(D_{motor}) + (F_{contrapeso})(D_{contrapeso}) = 0$$

$$\left(\frac{\rho_{contrapeso}}{(l_{contrapeso})(a_{contrapeso})(e_{contrapeso})} \right) (g) (e_{contrapeso} + 0.1065) = (0.219)(9.81)(0.0925)$$

$$\left(\frac{\rho_{contrapeso}}{(l_{contrapeso})(a_{contrapeso})(e_{contrapeso})} \right) (g) (e_{contrapeso} + 0.1065) = 0.198 \text{ [Nm]}$$

Una vez obtenido el valor de momento generado por el motor se dispone a seleccionar un material y geometría útil para esta función. Con el fin de seleccionar un elemento comercial se recurre a un fragmento de soleras de acero de 1" y espesor de 1/8", según el fabricante el perfil tiene un peso por metro de 1.70 [Kg/m] [122].

$$\begin{aligned}
 m_{\text{contrapeso}} &= 1.70 \text{ [Kg/m]} * l_{\text{contrapeso}} \\
 e_{\text{contrapeso}} &= 0.317 \text{ [cm]} \\
 (1.70 * l_{\text{contrapeso}} * 9.81) (0.00317 + 0.1065) &= 0.198 \text{ [Nm]} \\
 l_{\text{contrapeso}} &= \frac{0.198}{0.11 * 9.81 * 1.70} = 0.1081 \text{ [m]}
 \end{aligned}$$

Basado en la información del fabricante se determina un fragmento de 11 [cm] de largo de solera de acero A-36 de 1" de ancho y 1/8" de espesor ubicado en el extremo opuesto al motor.

6.4 Programación Control de Movimiento Motores BLCD

Con base en la sección 2.3, se prosigue con la discretización y control de movimiento de los motores BLCD, se toma como base el principio de control trapezoidal el cual polariza las bobinas internas del motor en el punto de mayor par, sin embargo después de realizar múltiples pruebas se determina que el movimiento mínimo posible por este método es de 15[°] mecánicos.

Por lo mencionado con anterioridad, se recurre al control sinusoidal el cual tiene la desventaja de que cada par es variable para cada punto de la secuencia con la ventaja de aportar un movimiento suave según la discretización de la secuencia trifásica en 360[°] electrónicos.

Después de múltiples pruebas se determina una discretización entre paso de 1.4 [°] eléctricos ($360[°] / 256$), se elige esta discretización ya que el mínimo desplazamiento medido es de 1[°] mecánicos con variaciones no significativas en el par. En la Figura 57 se observa un gráfico donde se ilustra la discretización de la señal trifásica en 256 fragmentos.

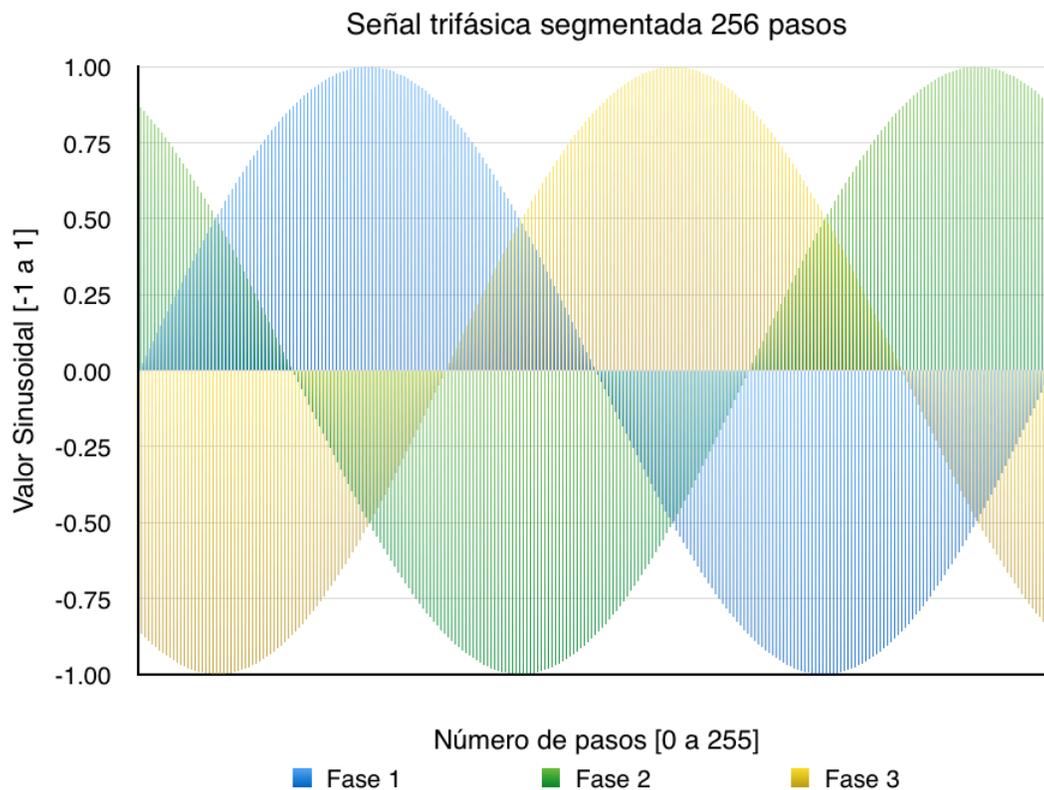


Figura 57. Gráfico de señal trifásica segmentada

Ya que el microcontrolador seleccionado no es capaz de generar una señal trifásica por sí mismo, se recurre a la etapa de potencia seleccionada en la sección 6.1. El dispositivo L6234 requiere de dos señales, una señal digital y un pulso PWM por cada fase dando un total de seis señales. La señal digital compatible con TTL y CMOS, nombrada “Enable” por el fabricante permite activar cada mitad del puente trifásico para modificar la dirección de la corriente de la fase, mientras que la señal

PWM compatible con TTL y CMOS nombrada “Input” permite conectar los DMOS a voltaje de alimentación o nivel lógico bajo para cada mitad del puente. Según lo anterior se presenta el esquema electrónico para la implementación del controlador L6234. Para este circuito se considera configuración recomendada por el fabricante.

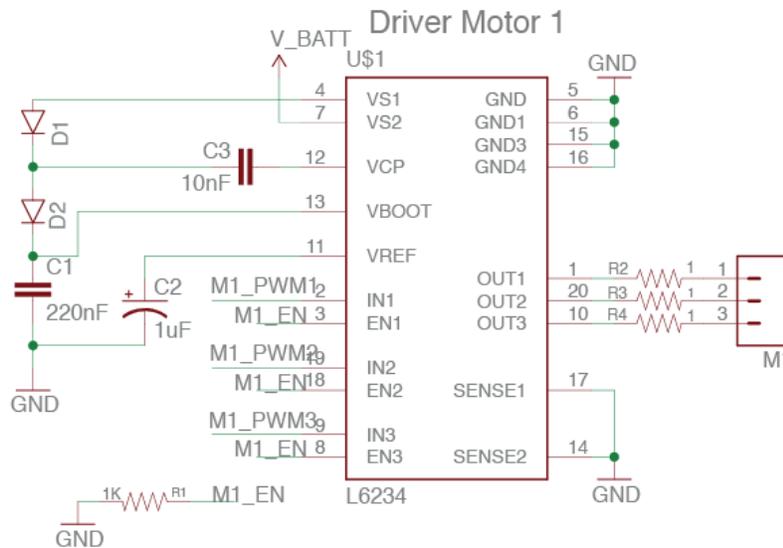


Figura 58. Circuito controlador de motores BLCD

Para obtener los valores del ancho de pulso para simular la señal trifásica basta con multiplicar el valor sinusoidal de cada paso por el tamaño de registro de PWM para obtener la proporción de PWM deseada. En esta aplicación se selecciona seis registros de comparación PWM de 8 bits disponibles en el ATmega 2560. A continuación se presentan en la Figura 59 la gráfica correspondiente a los valores para la salida PWM. [94] [95]

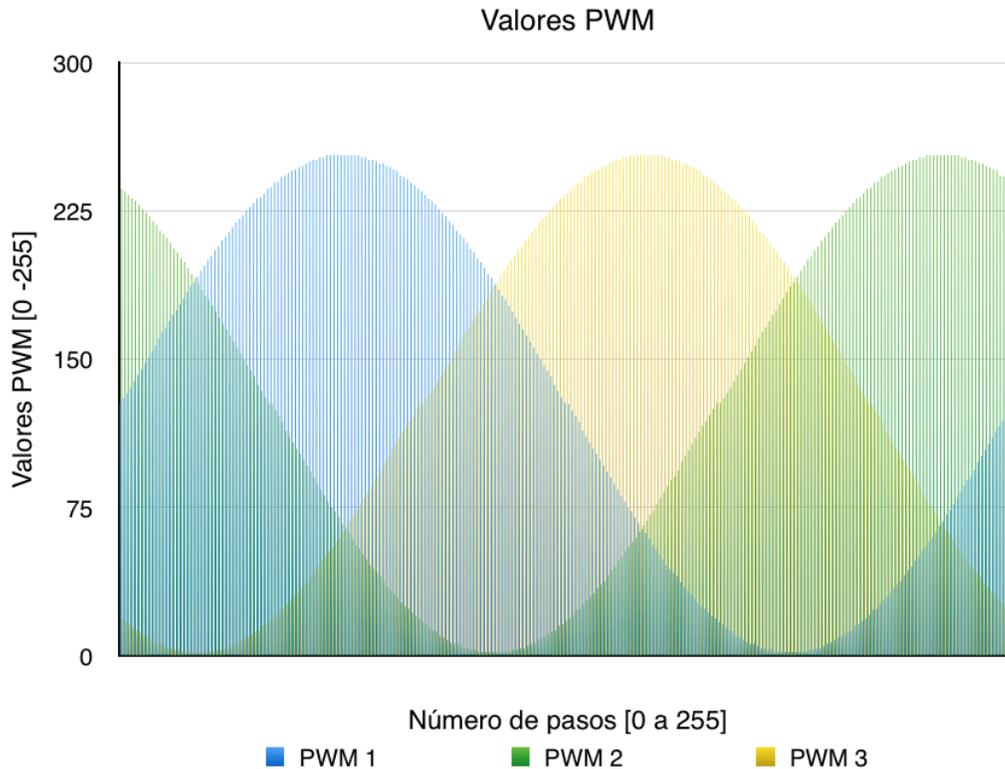


Figura 59. Valores de salida PWM para L6234.

Sumado a esto el fabricante fija una frecuencia de conmutación máxima de 50 kHz, ya que una alta frecuencia permite la reducción de la ondulación de la corriente de salida, pero aumenta la disipación de energía del dispositivo, sin embargo una baja frecuencia causa alta ondulación de la corriente de salida. La frecuencia de conmutación debe ser superior a 16 kHz para evitar ruido acústico. [95]

Una vez caracterizado el actuador se dispone a realizar un algoritmo que aumente en un paso el movimiento del motor considerando el sentido de giro, según la frecuencia con la que se llama la función se incrementa o disminuye la velocidad de rotación. A continuación se presenta el diagrama de flujo para esta función.

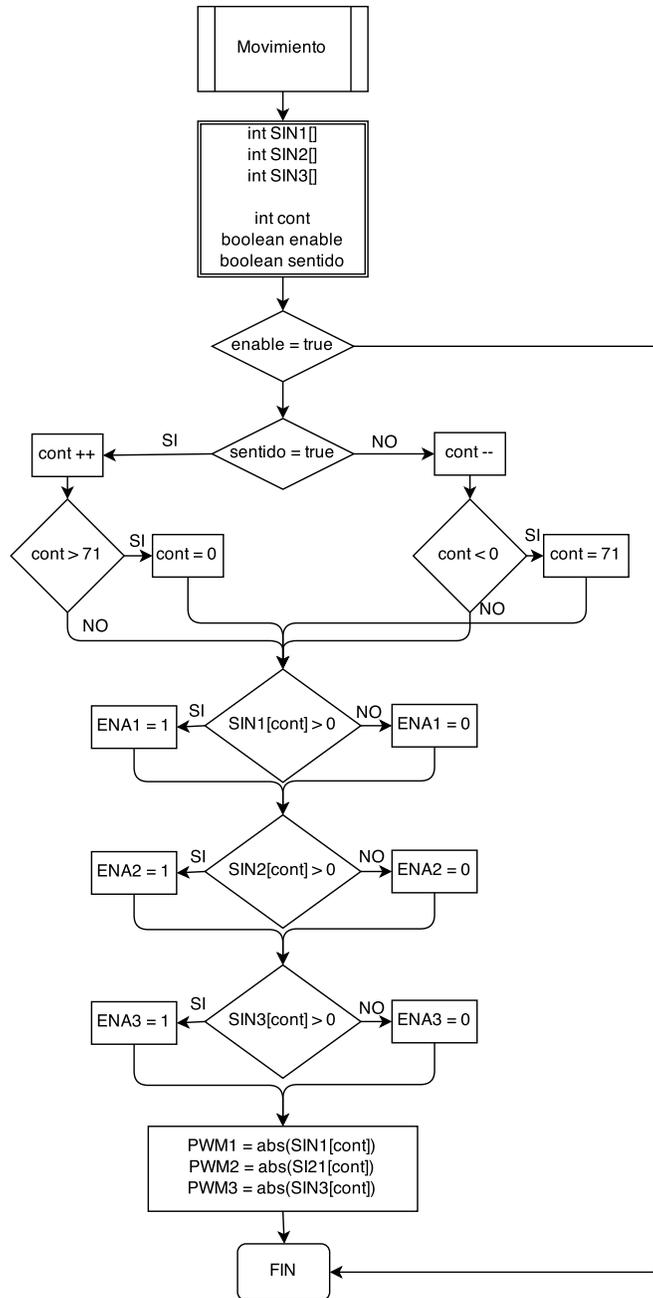


Figura 60. Diagrama de flujo para el movimiento de un motor BLCD.

6.5 Programación captura de ángulos de rotación

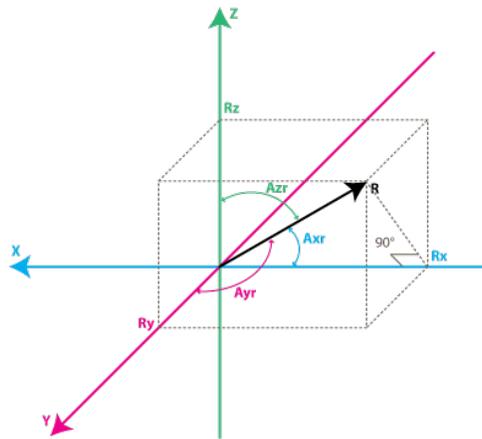
Una función indispensable para la aplicación, es el determinar la posición angular de la cámara con respecto a una referencia, es por ello que en la sección 5 se determina el uso de un filtro complementario, el cual tiene la tarea la fusionar la información obtenida de los seis grados de libertad, tres por el acelerómetro y tres por giroscopio. Para esta aplicación se considera la configuración básica del IMU como:

- Escala Giroscopio en ± 250 [°/s]: factor de escalamiento 131 [LBS¹²/o/seg].
- Escala Acelerómetro en ± 2 [g]: factor de escalamiento 16384 [LBS/g].
- AD0 a pull-down: dirección I²C en 0x68.

Esta configuración se determina ya que se pretende medir la posición angular del dispositivo y no las variaciones de aceleración o velocidad angular. Dado que el dispositivo MPU-6050 posee un selector de escalas de resolución para cada instrumento interno, el fabricante fija una serie de factores de conversión entre el valor del registro y la magnitud física. Una vez descrita la configuración del IMU se presentan los pasos del filtro a implementar, el cual consiste de tres pasos:

1. **Acelerómetro:** Con base en las componentes de la fuerza de gravedad que actúan sobre el IMU, es posible calcular los ángulos *Pitch* y *Roll* con la ayuda de un acelerómetro, para ello es necesario obtener las proyecciones de la aceleración las cuales contienen las proyecciones de la gravedad, en los tres grados de libertad, utilizando las ecuaciones a continuación mostradas:

¹² LBS: Length Sensitivity Scale Factor.



$FE = \text{Factor de Escala}$

$AcX = \text{Acelerometro "Raw Data" en X}$

$AcY = \text{Acelerometro "Raw Data" en Y}$

$AcZ = \text{Acelerometro "Raw Data" en Z}$

$$R_x = \frac{AcX}{FE}$$

$$R_y = \frac{AcY}{FE}$$

$$R_z = \frac{AcZ}{FE}$$

Figura 61. Cálculo de las proyecciones de la gravedad. [123]

Mientras que para obtener los ángulos se emplean las siguientes ecuaciones [75] [79]:

$$A_{xr} = \arctan\left(\frac{AcX}{\sqrt{AcY^2 + AcZ^2}}\right)$$

$$A_{yr} = \arctan\left(\frac{AcY}{\sqrt{AcX^2 + AcZ^2}}\right)$$

$$A_{zr} = \arctan\left(\frac{\sqrt{AcX^2 + AcY^2}}{AcZ}\right)$$

Se debe considerar que los valores A_{xr} y A_{yr} corresponden a los ángulos Roll y Pitch respectivamente, mientras A_{zr} no puede ser relacionado con el ángulo Yaw, ya que no existe una variación de la gravedad en esa dirección.

2. **Giroscopio:** Dado que el giroscopio permite medir velocidad angular, es necesario realizar una integración para obtener un ángulo, sin embargo como el giroscopio no posee una referencia como lo es la gravedad para el acelerómetro, se recurre a realizar una medición de calibración sobre una superficie de ángulos conocidos (una superficie plana), y posteriormente

realizar una integración numérica. A continuación se describen las ecuaciones para realizar dicha integración.

$$\begin{aligned}
 FB &= \text{Factor de Escala} \\
 G_{ref} &= \text{Valor de referencia para cada eje} \\
 \Delta t &= \text{Diferencial de tiempo} \\
 G_x &= \frac{\text{Valor } X}{FB} \\
 G_y &= \frac{\text{Valor } Y}{FB} \\
 G_z &= \frac{\text{Valor } Z}{FB} \\
 \text{Angulo } G_x(n) &= (G_x - G_{x,ref})\Delta t + \text{Angulo } G_x(n-1) \\
 \text{Angulo } G_y(n) &= (G_y - G_{y,ref})\Delta t + \text{Angulo } G_y(n-1) \\
 \text{Angulo } G_z(n) &= (G_z - G_{z,ref})\Delta t + \text{Angulo } G_z(n-1)
 \end{aligned}$$

Por consecuencia de la integración, a largos periodos de tiempo el giroscopio tiende a acumular error, a esto se le llama deriva. Para reducir el error en la integración se recomienda que la diferencial de tiempo (Δt) sea constante. [75] [77] [78]

- Filtro:** Con la información obtenida de ambos sensores se realiza la fusión de información, este filtro se basa en el concepto de un filtro pasa bajas digital. A continuación se presentan las ecuaciones para realizar dicha fusión.

$$\begin{aligned}
 \text{Angulo Filtrado}(n) &= \alpha \times (\text{Angulo Giroscopio}) + (1 - \alpha) \times (\text{Angulo acelerómetro}) \\
 \alpha &= \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \\
 \text{Angulo Giroscopio} &= \text{Angulo Filtrado}(n-1) + (G - G_{ref}) \times \Delta t
 \end{aligned}$$

Para el cálculo de este filtro se considera como recomendación que la constante de tiempo (τ) sea mayor al tiempo de estabilización del acelerómetro, es por ello que se aproxima α a 0.96 [75] [79].

Finalmente para su integración a la aplicación se genera un diagrama de flujo de la programación dentro del microcontrolador. En la Figura 62 se muestra el diagrama en el cual se destaca la presencia de subfunciones para la lectura del IMU por medio del protocolo I²C y la conversión de los datos por medio del factor de escala, además de una subfunción para realizar las lecturas iniciales del giroscopio con al finalidad de obtener una calibración.

Por otro lado se observa una condición que involucra un tiempo establecido, esto con el objetivo de mantener una diferencia de tiempo constante, monitoreando que la función se ejecute en un tiempo determinado reduciendo el error durante la integración.

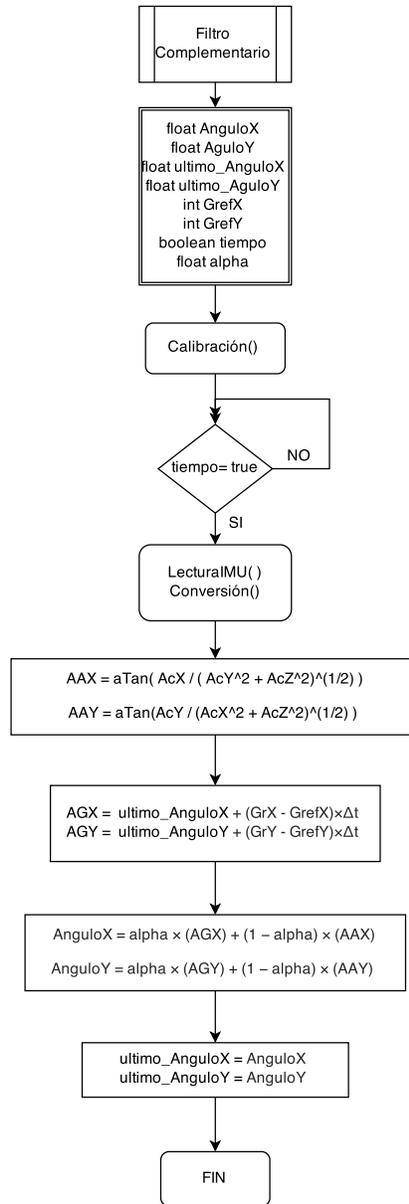


Figura 62. Diagrama de flujo para cálculo de filtro complementario.

6.6 Programación Control de disparo y *time-lapse*

En este apartado se detalla el funcionamiento del sistema de disparo y control de tiempo, funciones básicas para realizar un *time-lapse*. Este proceso es controlable por el usuario según intervalos de captura y número de fotografías descritos como entradas del sistema en el apartado 3.

Circuito de control de disparo

Como se menciona en la sección 6.1, se elige el dispositivo 4N25 como elemento de desacoplo entre la electrónica del sistema y del equipo fotográfico. En la Figura 63 se presenta el diagrama eléctrico para el control de disparo.

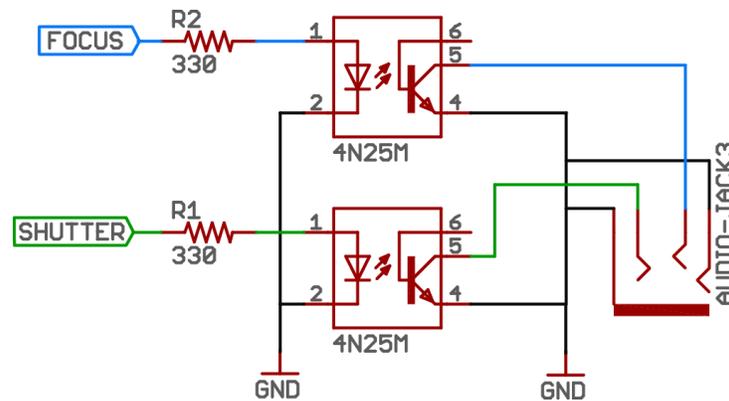


Figura 63. Circuito para control de disparo.

Como se observa en el diagrama por medio de dos señales digitales es posible controlar el enfoque y el disparo según la investigación presentada en la sección 2.1.1. Con base en lo mencionado anteriormente, se utiliza un conector de audio macho y hembra de 3.5 [mm] como interfaz de conexión para múltiples tipos de conectores.

Con el fin de demostrar el funcionamiento se construye un cable con el conector MC-DC2 de la marca Nikon® y un conector de audio macho de 3.5 [mm] en el otro extremo, como se muestra en la Figura 64.



Figura 64. MC-DC2 a Audio Jack

Circuito para la medición de tiempo

Por otro lado, un *time-lapse* requiere una medición de un intervalo de tiempo entre la captura de fotogramas, es por ello que se recurre a funciones internas del microcontrolador seleccionado para realizar esta función.

El microcontrolador ATmega 2560, el Timer 2 específicamente soporta el uso de un cristal secundario como fuente de reloj asíncrona al reloj principal en las estradas nombradas TOSC1 y 2, estas estradas están ubicadas en los pines 28 y 29 del microcontrolador [115]. Sin embargo la placa de desarrollo Arduino® Mega no posee una conexión específica para estos pines según el mapa de conexiones de la placa [124], es por ello que para acceder a ellos se realiza una modificación a la placa. En la Figura 65 se muestra la adición de conexiones a los pines necesarios.

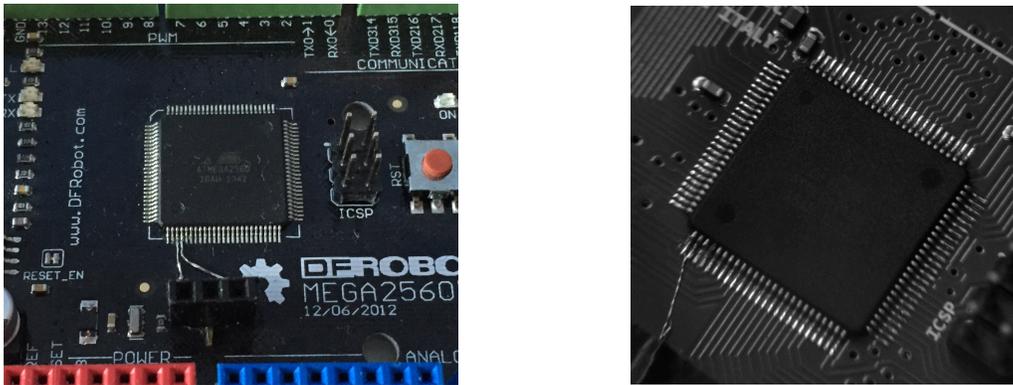


Figura 65. Modificación de la placa Arduino® Mega.

Una vez realizadas estas conexiones es posible configurar el oscilador externo como fuente de reloj para el Timer 2, a través de la interrupción por desbordamiento del Timer 2 con el escalador y precarga adecuados, es posible realizar mediciones de aproximadamente un segundo.

Finalmente se presenta un diagrama de flujo que toma como parámetro el intervalo de tiempo y el número de fotografías para la captura del *time-lapse*.

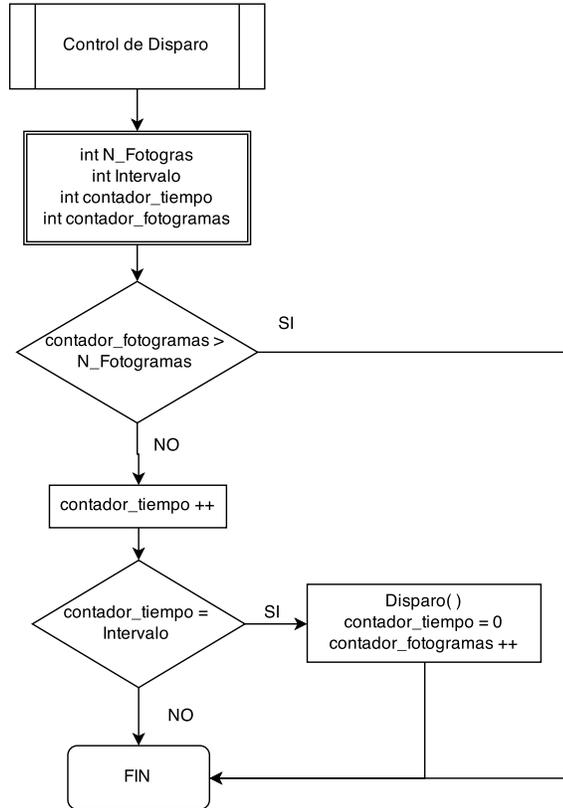


Figura 66. Diagrama de flujo para control de disparo

6.7 Programación Control de Estabilización

Como se menciona en la sección 1.2 se tiene como objetivo presentar un funcionamiento básico del dispositivo propuesto, por lo que se deja como trabajo a futuro un análisis completo de la planta del sistema así como el diseño de un controlador optimizado para la aplicación como se realiza en diferentes tesis de maestría y/o doctorado [125] [126]. Por lo tanto, para dar el funcionamiento básico de estabilización se recurre a una metodología iterativa para la sintonización de un controlador PID con base en distintos artículos [127] [128] [129]. A continuación se presenta el algoritmo básico para la implementación del control PID, se considera como entrada la posición angular de la cámara en dos

ejes (*Pitch* y *Roll*) y como salida la frecuencia de paso y dirección de los actuadores según el apartado 6.4 . En la Figura 67 se presenta el diagrama de flujo para el cálculo del control PID para un actuador.

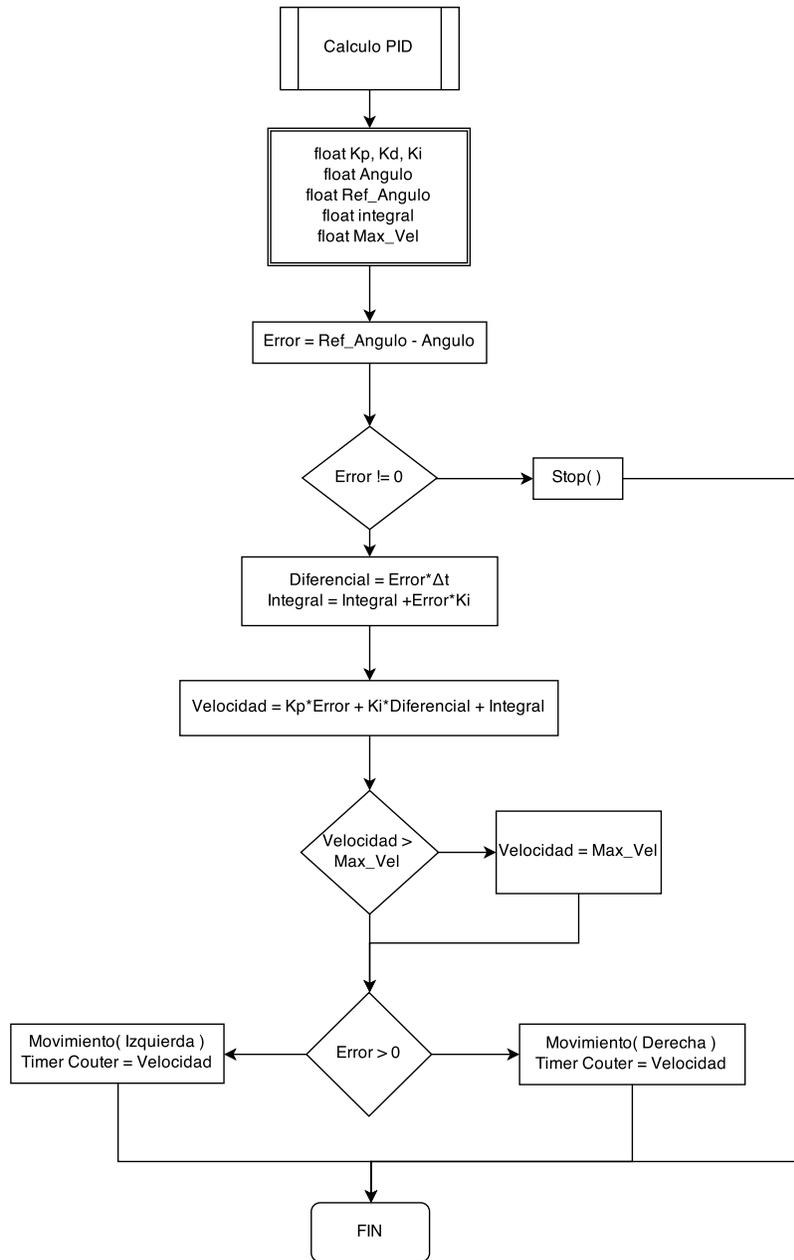


Figura 67. Diagrama de flujo para cálculo de PID.

Ya que el dispositivo L6234 posee un frecuencia máxima de conmutación de 50 [KHz] se fija una condicional para no exceder ese límite y evitar movimientos erráticos, por otro lado la función de movimiento presentada en la sección 6.4 esta diseñada para desplazar cada actuador un paso en una dirección establecida, por lo que la velocidad de cada motor esta relacionada directamente con la frecuencia en que se active dicha función. Por lo mismo, se utilizan el hardware del microcontrolador seleccionado para activar la función, en este caso se utilizan dos Timers de 16bits, uno para cada actuador. Por medio de las interrupciones por desbordamiento del contador se activa cada una de las funciones de movimiento de los actuadores dentro del rango de frecuencias toleradas por el controlador, por lo tanto la velocidad de los acatadores es variada modificando la precarga del contador de cada Timer, mientras mayor sea la precarga mayor es la velocidad de rotación el actuador.

6.8 Diseño de interfaz Móvil

Selección de plataforma

Como se menciona en la sección 2.4 el sector de la programación móvil en México tiene un gran impacto no solo en la población si no en el alcance e interacción de los productos con los usuarios, sumado a esto en la sección 2.4 también se menciona que una aplicación móvil deberá ser soportada por múltiples plataformas para alcanzar un impacto amplio en el mercado y por consiguiente un impacto en un mayor sector de la población.

Sin embargo, para este proyecto se considera el desarrollo para una sola plataforma recordando los alcances del proyecto y tiempos de desarrollo, otras plataformas pueden ser desarrolladas en futuras iteraciones. Por consiguiente es propio determinar cual será la plataforma a desarrollar.

Esta decisión se toma con base en múltiples parámetros, uno de los cuales es el valor que tiene un desarrollo para cada una de las plataformas, esto se puede estimar según el salario anual para cada uno de los lenguajes de programación. En la Figura 68 se muestran una tabla de salarios anuales en USDs según el portal de noticias económicas Quartz® [130].

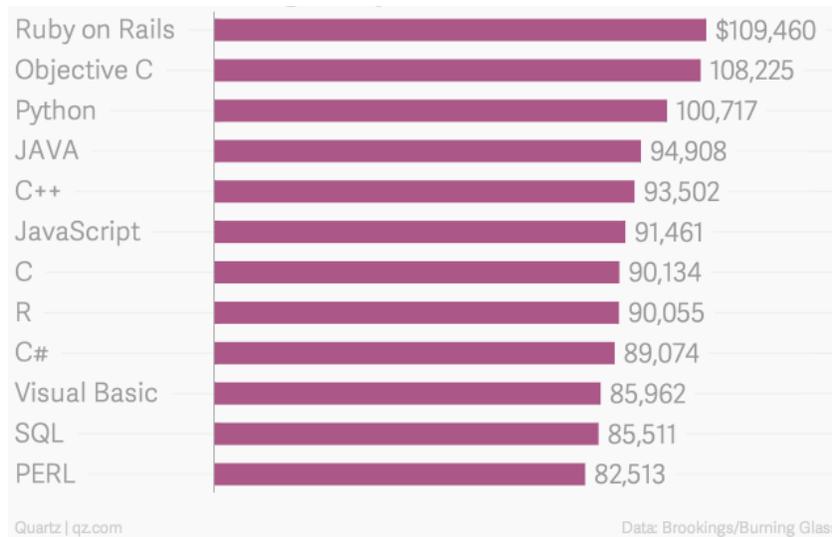


Figura 68. Tabla de salarios anuales en USDs por lenguaje.

En la lista anterior se puede observar que la ganancia anual de un desarrollador de Objective-C es mayor en comparación a un desarrollador de JAVA. Con esto se puede estimar que un desarrollo para móviles con sistema operativo iOS® tiene mayor valor económico que un desarrollo para Android®.

A lo anterior se suma las habilidades y experiencia del desarrollador en cada uno de los lenguajes y las plataformas, así como las desventajas o limitaciones que aporta cada plataforma, es por ello que en la Tabla 26 se muestra la comparación de cada una de ellas:

- **Valor económico:** Hace referencia a la relación entre el salario anual de un desarrollador según el lenguaje de desarrollo.

- **Cuota de mercado:** Se puede entender como la presencia que tiene el sistema operativo en el mercado.
- **Fragmentación entre versiones:** Alude a cuantas versiones diferentes puede tener un sistema operativo en el mismo tiempo en el mercado, ya sea por falta de soporte a los dispositivos, dispositivos obsoletos u desconocimiento de los usuarios para realizar un actualización.
- **Licencia para realizar pruebas en dispositivos:** Algunas plataformas requieren de la compra de una licencia para poder realizar pruebas y no solo en simulador.
- **Experiencia del desarrollador en la plataforma:** Se contempla la calidad de conocimientos que posee el desarrollador en la plataforma considerando cursos, trabajos y/o desarrollos previos, esto con el fin de evitar curvas de aprendizaje prolongadas.
- **Se cuenta con un dispositivo con el sistema operativo:** Si el desarrollador no tiene un dispositivo donde cargar, probar y observar el desempeño, el tiempo de desarrollo puede aumentar hasta comprar y/o pedir prestado un dispositivo con las especificaciones necesarias.

Tabla 26. Comparación de plataformas.

Característica	iOS®	Android®
Valor económico	Alta	Media
Cuota de mercado	43%	50%
Fragmentación entre versiones	Baja	Alta
Licencia para realizar pruebas en dispositivo	99 USD\$ anuales	Nula
Experiencia del desarrollador en la plataforma	Alta	Baja
Se cuenta con un dispositivo con el sistema operativo	Si	No

En la tabla anterior se pueden observar desventajas y ventajas de las plataformas así como consideraciones personales del desarrollador, las casillas marcadas en verde simbolizan un ventaja. Con base en las ventajas encontradas se llega a la conclusión de que la mejor plataforma para iniciar el desarrollo de esta iteración es iOS®, considerando la experiencia previa del desarrollador en el área, con la desventaja económica de la inversión para una licencia.

Funcionalidad Básica

Para el diseño de la aplicación móvil se toma como base la metodología del producto mínimo viable por sus siglas en inglés MVP [7] [131]. Esta metodología tiene como objetivo generar un versión del producto que permita recolectar con el menor esfuerzo posible la máxima cantidad de conocimiento validado sobre sus potenciales clientes. Se utiliza para obtener un conocimiento rápido y cuantitativo del mercado de un producto. Un producto mínimo viable tiene solamente aquellas funcionalidades características del producto.

Ya que un punto importante en la interfaz móvil es facilitar al usuario la interacción con el dispositivo, se recurre en seguir recomendaciones y lineamientos de experiencia de usuario con base en dos publicaciones especializadas en el área, “*Don’t Make Me Think*” de Steve Krug [73] y “*Killer UX Design*” de Jodie Moule [74].

Con base en ello se generan *wireframes*¹³, con la finalidad de delimitar las funcionalidades básicas de la aplicación móvil. Para la navegación de esta aplicación se propone el uso de un *TabBar*. Se selecciona este modelo de navegación ya que es ideal para englobar vistas con un mismo contexto pero con funcionalidades distintas, como ejemplo se muestra la aplicación de reloj navita de

¹³**Wireframes** : Representación grafica simple que muestra el tipo de elementos gráficos y su ubicación en una interfaz, tiene como objetivo planificar la funcionalidad y navegación en una interfaz gráfica.

iOS, en esta se observa la presencia en la parte inferior de un *TabBar*, el cual permite seleccionar entre diferentes herramientas pulsando sobre la casilla deseada. [132] [133]

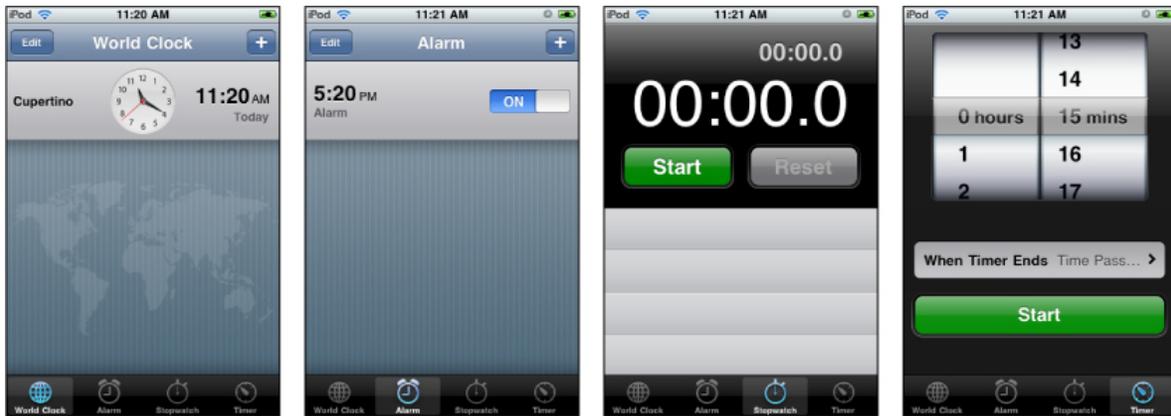
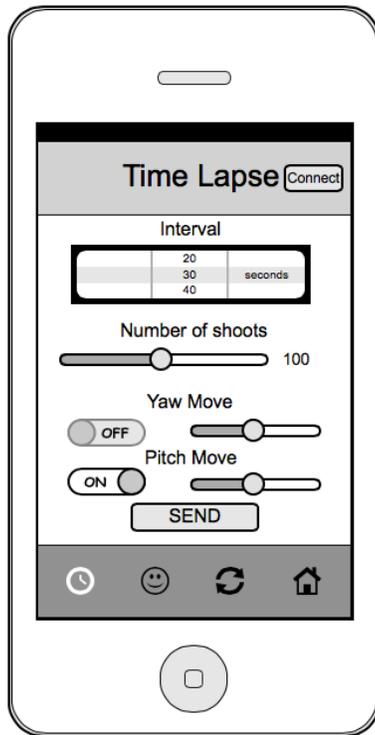


Figura 69. La interfaz Tab Bar en la aplicación nativa de Reloj

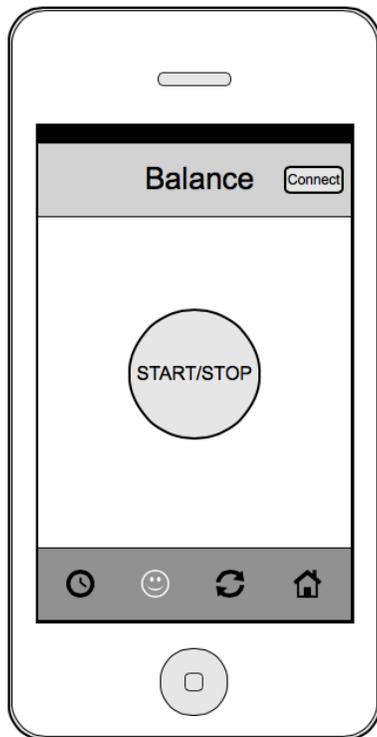
Con base en lo anterior se presentan los *wireframes* de las diferentes pantallas de la aplicación para cada una de las funcionalidades básicas. Cabe mencionar que para la interfaz de la aplicación se selecciona el idioma inglés ya que es el lenguaje más utilizado en el sector de la programación móvil además de ser un estándar para la documentación de software, quedando como trabajo a futuro la implementación de multilinguaje en la aplicación. Los bocetos se realizaron con ayuda del la versión gratuita del software Moqups® [134]:

Tabla 27. Storyboard

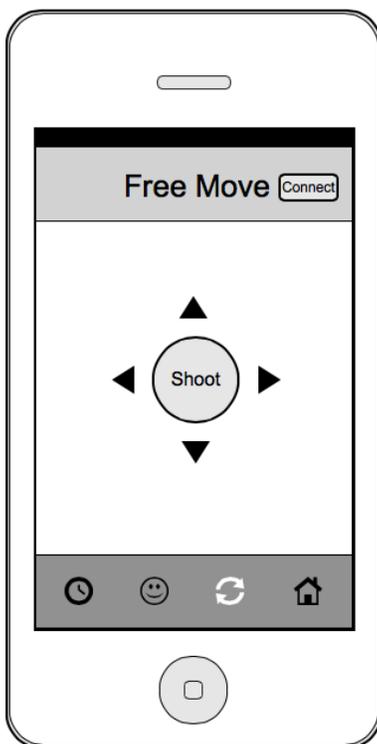


Time-lapse: La primera vista tiene como objetivo presentar al usuario una interfaz con la cual sea capaz de manipular los parámetros para la captura de un *time-lapse* y enviarlos al dispositivo.

Se propone el uso de un carrite para la selección del intervalo de disparo con la finalidad de presentar una lista de elementos precargados, mientras que para el número de disparos, y los ángulos de movimiento en los ajes *Yaw* y *Pitch*, se propone el uso de sliders para dar libertad al usuario en la selección de éstos parámetros.



Balance: La segunda vista tiene el objetivo de iniciar el modo de estabilización, por lo que únicamente se presenta un botón para iniciar o detener dicho funcionamiento.



Free Move: La tercer vista otorga al usuario cinco controles, cuatro de ellos permiten modificar la posición angular de la cámara, mientras que el restante permite tomar una fotografía. Aunque estas funcionalidades no son planteadas como objetivo del dispositivo, se consideran útiles para la fase de desarrollo.



About: Finalmente se añade una vista para informar al usuario sobre la versión de la aplicación, así como los datos del diseñador.

Dentro de cada vista con excepción de la vista de información, se añade un botón en la esquina superior derecha, este elemento tiene la finalidad de ayudar al usuario a conectar o desconectar el teléfono del hardware por medio del protocolo Bluetooth®.

Modelo y programación de la aplicación

Una vez identificadas las funcionalidades básicas del sistema se prosigue con la programación de aplicación, para esto se recurre al patrón de diseño de software modelo-vista-controlador (*Model-View-Controller*), este patrón de diseño es recomendado por Apple® para el desarrollo de software en su plataforma. [135]

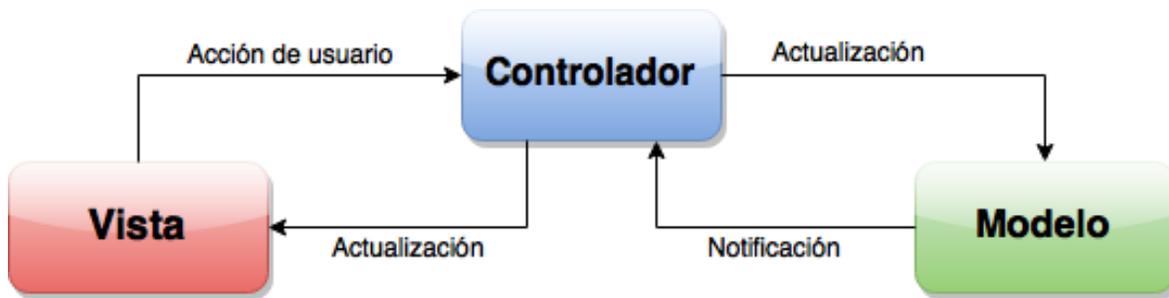


Figura 70. Diagrama general del modelo MVC.

Como se puede observar el diagrama general del modelo MVC (Figura 70) se compone de tres partes, las cuales en conjunto administran las funcionalidades del software [136] [137]:

- **Modelo:** Los objetos modelo encapsulan la información (datos) de una aplicación, definiendo la lógica y procesamiento de esta. Un modelo no debe tener ninguna conexión explícita con la vista. Las acciones del usuario en la capa de vista pueden crear o modificar información, la cual se comunica a través de un objeto controlador y dan lugar a la creación o actualización de un modelo.
- **Vista:** Los objetos de vista son aquellos elementos que interactúan directamente con el usuario, la interfaz. El objetivo de la vista es mostrar la información de los modelos de la aplicación y permitir la edición de esos datos. Debido a que se reutilizan y reconfiguran, los objetos de vista proporcionan consistencia entre las aplicaciones. Los objetos de vista reaccionan a los cambios en los datos del modelo a través de un controlador.
- **Controlador:** Un objeto controlador actúa como intermediario entre uno o más de los objetos de vista y uno o más objetos del modelo. El controlador es un conducto a través del cual los objetos de vista aprenden acerca de los

cambios en los objetos del modelo y viceversa. El controlador también pueden realizar tareas de configuración y de coordinación para una aplicación, así como gestionar los ciclos de vida de otros objetos. Un objeto controlador interpreta acciones de los usuarios realizadas en objetos de vista y comunica los datos nuevos o modificados a la capa del modelo. Cuando el modelo presentan un cambio, el controlador comunica los nuevos datos a la vista para que pueda mostrarlo.

Por ejemplo, si se desea implementar una acción que restaure la configuración por defecto cada vez que el usuario pulse el botón de “Restaurar” siguiendo el modelo MVC. En primer lugar, se implementa un algoritmo *“restoredefaults”*, el cual realizar la lógica necesaria para restaurar la configuración predeterminada. A continuación, se configura un evento táctil en el interior del botón, cuando este evento ubicado en la capa de vista es activado por el usuario, envía un mensaje de acción al controlador el cual a su vez genera una notificación al modelo para activar la función *“restoredefaults”*, este ejemplo se ilustra en la Figura 71.

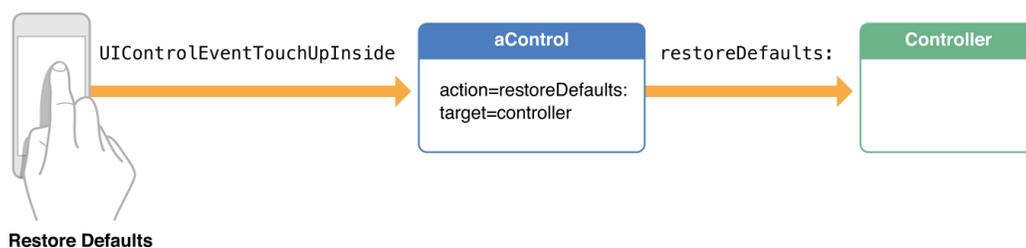


Figura 71. MVC en acción. [135]

Siguiendo el modelo MVC se prosigue con la implementación en código de la aplicación móvil, como resultado de esto se presentan una visualización comparativa de las vistas propuestas en los *wireframes* y las capturas de pantalla de las diferentes vistas de la aplicación.

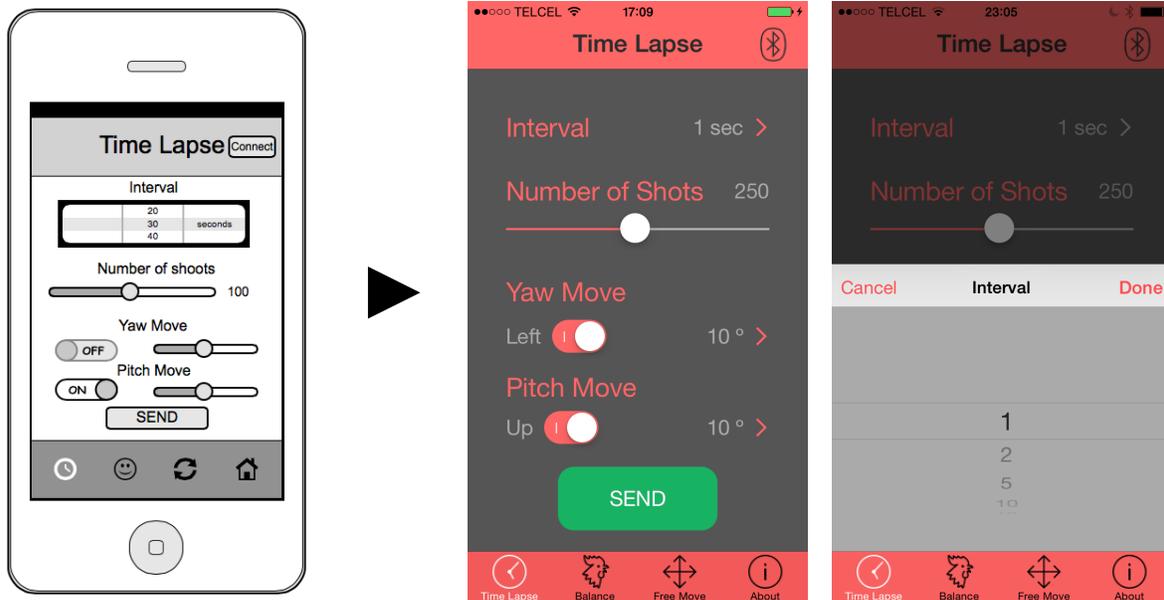


Figura 72. Vista1: Time-Lapse

Para la primer vista se puede observar el acomodo y uso de elementos similares a la propuesta en la

Figura 72, sin embargo con el fin de dar consistencia al contenido, se utiliza un código de colores y tamaños de tipografía para dar jerarquía a los contenidos. Por un lado se pueden identificar los títulos de los diferentes ajustes en color rojo y una tipografía de mayor tamaño, mientras que los textos dinámicos, aquellos con alguna interacción se presentan en color gris.

Con el objetivo de incorporar los elementos deseados sin cargar la pantalla de contenido se opta por el uso de carretes en vistas de segundo plano que se activan al pulsar el texto marcado con una flecha, dando al usuario la oportunidad de elegir el parámetro deseado en un espacio mayor.

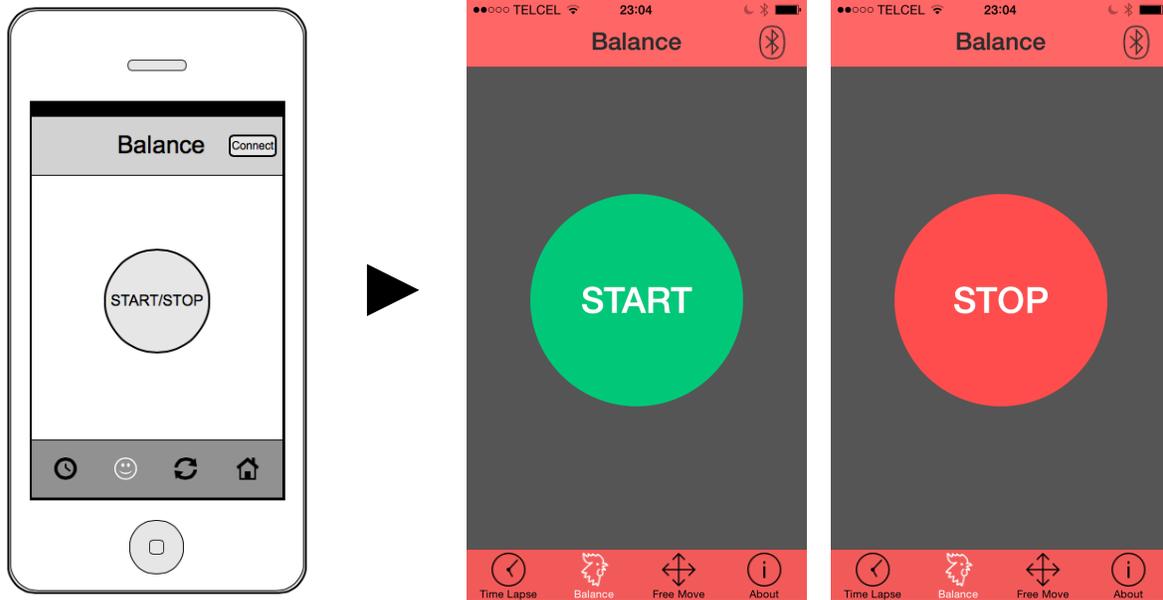


Figura 73. Vista 2: Balance

Como se observa en la Figura 73, la vista para la función de estabilización es idéntica a la propuesta, con la diferencia que el botón de activación cambia de color y texto según la acción que se este ejecutando al momento, dando una mayor retroalimentación al usuario.

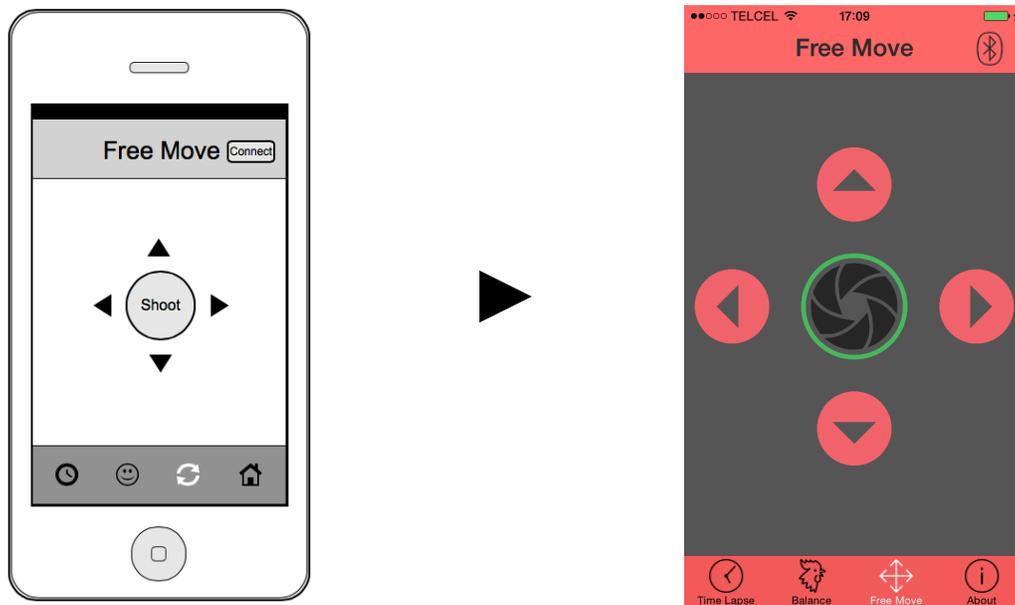


Figura 74. Vista 3: Free Move

A su vez para la vista de movimiento libre, Figura 74, se observan consistencia entre la propuesta y la vista final, se puede notar el uso de iconografía popular para representar el botón de disparo de la cámara.



Figura 75. Vista 4: About

Finalmente en la vista de información, Figura 75, se observan algunos datos del proyecto, así como el logotipo de la aplicación conservando la distribución propuesta. Por otro lado en la Figura 76 se muestran los distintos mensajes de conectividad, a la izquierda el mensaje de ajustes de conexión visible al presionar el símbolo de Bluetooth®, mientras que al centro y derecha se encuentran los mensajes de conexión activada y desactivada respectivamente. Éstos dos últimos mensajes se muestran cada vez se logra entablar una correcta comunicación o por algún motivo el dispositivo se ha desconectado.

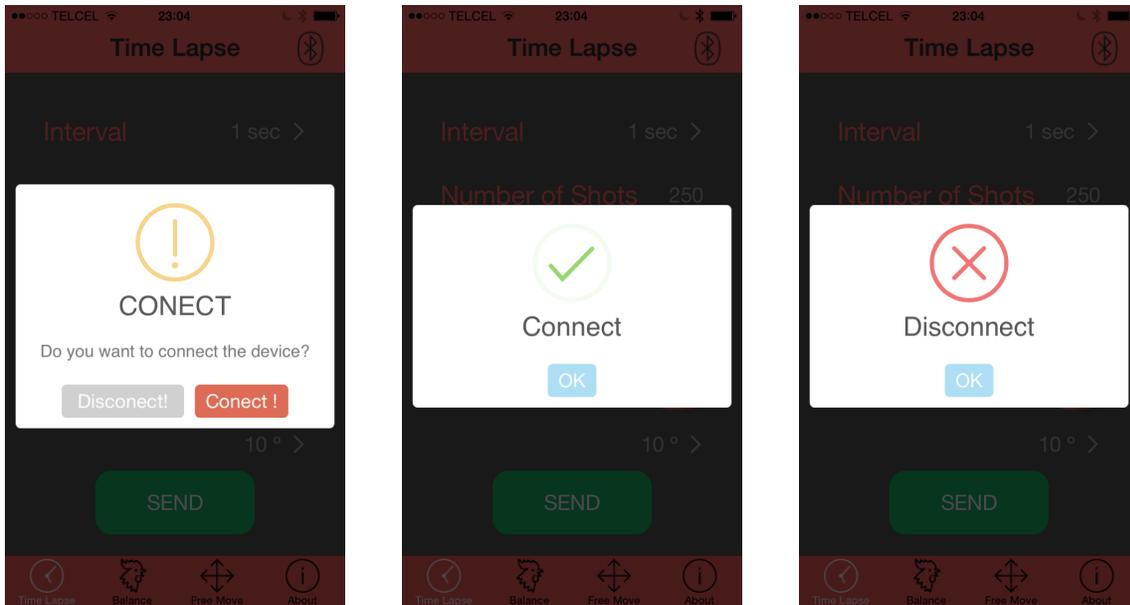


Figura 76. Mensajes de conectividad.

Cabe mencionar que aunque las vistas presentadas en esta sección son obtenidas de un iPhone®, la aplicación al ser programada en la plataforma y lenguaje nativos tiene la capacidad de soportar todos los dispositivos con soporte para iOS 8®. Como se puede ver en la Figura 77 se muestra un ejemplo comparativo de las vistas para múltiples equipo.

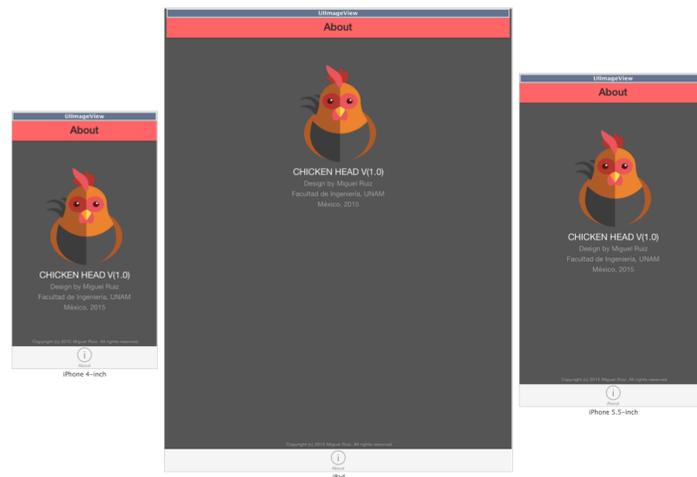


Figura 77. Visualización para múltiples dispositivos.

Por ultimo se presentan el icono de la aplicación, en este se puede observar en la esquina inferior derecha una símbolo haciendo referencia al estatus de la aplicación, siendo esta una fase alpha¹⁴. Además de vistas representativas del app en el entorno iOS® (Home Screen y AppStore).



Figura 78. Ícono de la aplicación.

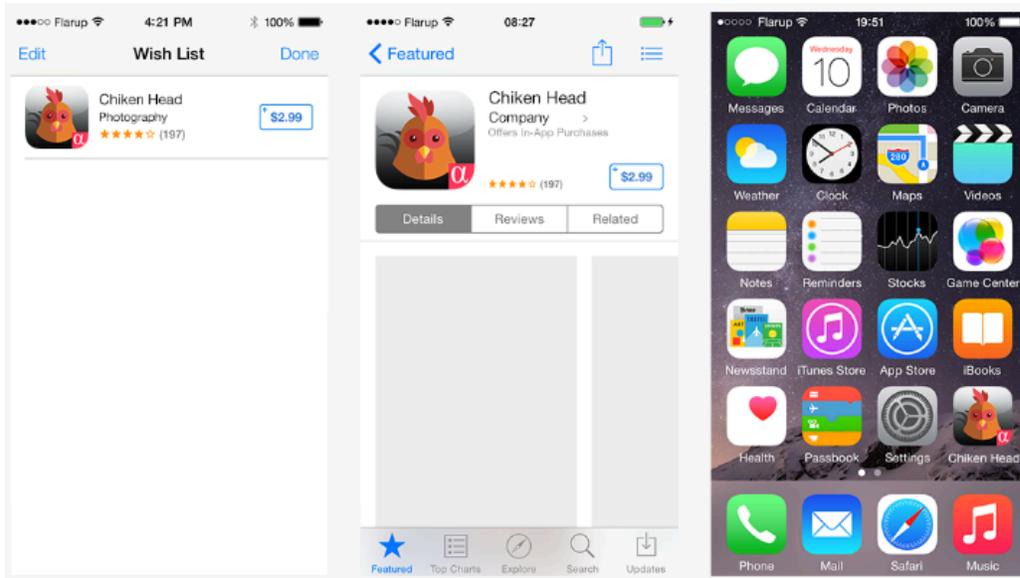


Figura 79. Vista del ícono en entorno iOS®.

¹⁴ **Versión Alpha:** Fase de desarrollo donde un producto todavía es inestable, aguarda a que se eliminen los errores o a la puesta en práctica completa de toda su funcionalidad, pero satisface la mayoría de los requisitos.

7. Fabricación de Modelo Funcional

7.1 Manufactura y Ensamble de Estructura Móvil

Con base en la sección 6.2 se prosigue con la elaboración de planos y moldes para manufactura de las dos piezas que conforman la estructura. En el apartado 11 se pueden encontrar los planos de las piezas a manufacturar, así como la guía de ensamble y lista de materiales de la estructura móvil, para esta tarea se utilizó el software de código abierto FreeCAD®.

Se eligen como materiales para manufactura fibra de carbono y fibra de vidrio, basando esta decisión en la investigación del estado del arte en la sección 2. En ella se observa el uso de materiales como fibra de vidrio y de carbono en equipos comerciales, siendo que la fibra de carbono aporta propiedades mecánicas comparables a las del acero con una densidad menor, sin embargo este material puede resultar costoso para la manufactura de un modelo funcional, por lo que se pretende complementar con fibra de vidrio la cual es utilizada para aportar volumen, reduciendo la cantidad de fibra de carbono en el modelo. La compatibilidad de estos materiales es posible ya que el manejo y tratamiento de los mismos requieren de una resina plástica y un catalizador para su moldeo y endurecimiento.

Como método de manufactura se emplea un proceso de conformado por capas, este método es recomendado para la producción de pocas unidades según la gráfica de relación procesos de manufactura y rango económico por unidad presentada en la Figura 80.

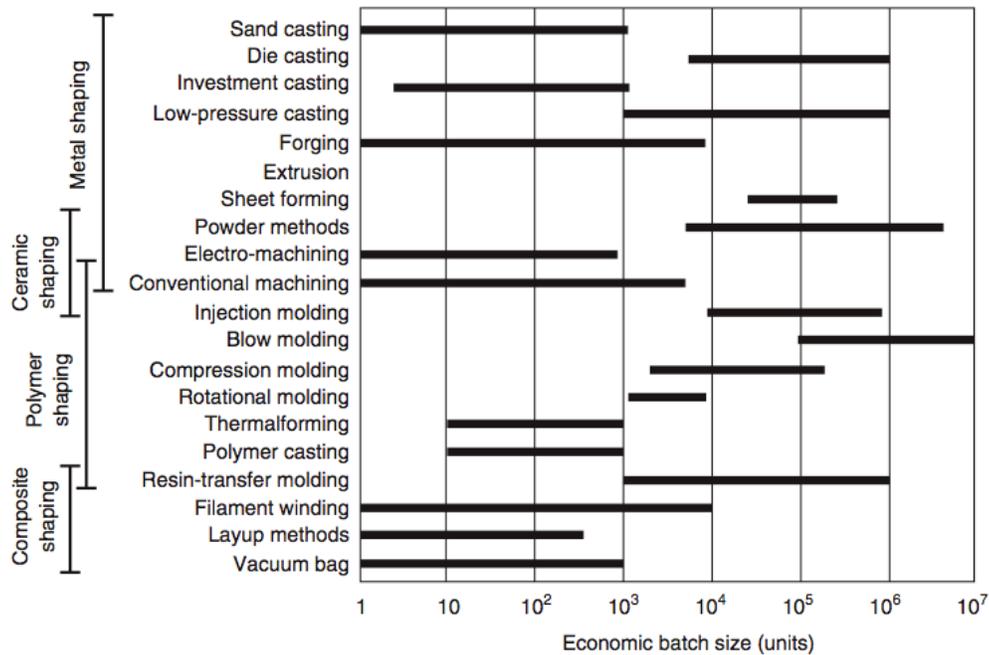


Figura 80. Procesos de manufactura por rango de tamaño de lote recomendado. [138]

Como se puede observar en el gráfico, en el apartado de materiales compuestos, los métodos de manufactura por capas se recomienda para producciones desde una pieza hasta un lote de mil unidades. Por lo tanto, este proceso de manufactura es adecuado para el modelo funcional de la estructura móvil.

Construcción de la estructura móvil

Se construyen moldes de MDF (*Medium Density Fibreboard*) de 6 y 3 [mm] de espesor para la sección externa e interna respectivamente, los cuales figuran como guías para dar forma a las fibras de carbono y vidrio. En la Figura 81 y Figura 82 se muestran los moldes para el perfil *Roll* y *Pitch* respectivamente.

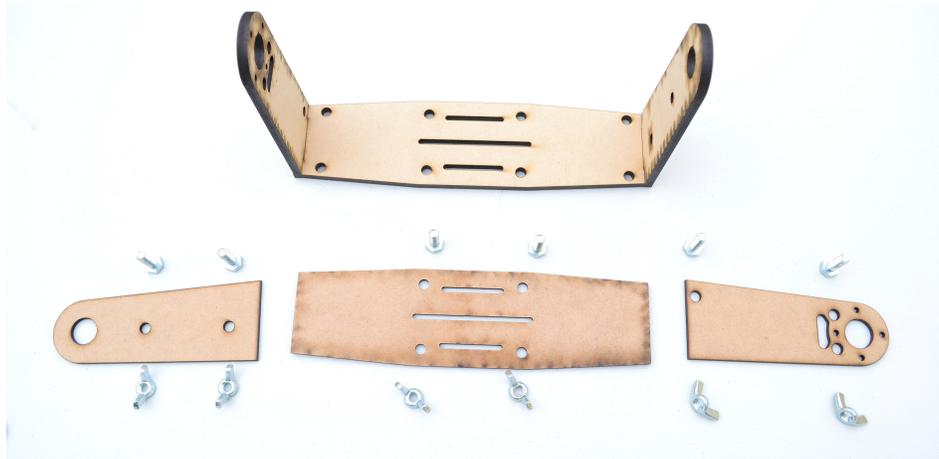


Figura 81. Molde perfil Roll.

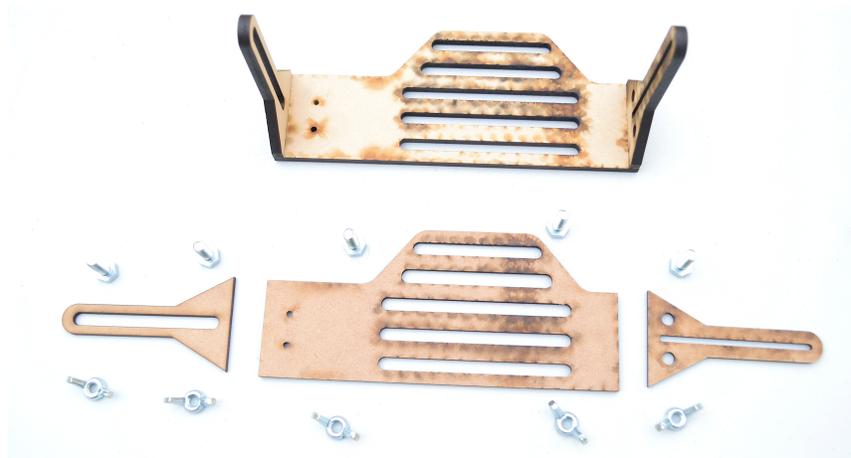


Figura 82. Molde perfil Pitch.

En las imágenes anteriores se puede observar la presencia de tornillería, esta se utiliza para generar presión entre la parte interna y externa de los moldes aprisionando la fibra en el interior expulsando burbujas de aire entre las capas de material fibroso y retirando excedente de resina. Sumado a la tornillería, en algunas secciones se añaden prensas tipo “C” para comprimir el material hasta el punto deseado.

Para determinar la proporción de cada uno de los materiales se realizan múltiples pruebas, modificando el número y posición de capas de fibra de carbono y fibra de

vidrio, logrando diferentes espesores y por consiguiente diferentes propiedades del material. En la Figura 83 se observan algunas de las muestras moldeadas para determinar la proporción de materia.



Figura 83. Pruebas de proporción de materiales.

Después de múltiples pruebas se llega a una combinación de materiales que aporta una rigidez apropiada, esta consta de tres capas de fibra de carbono y cuatro de fibra de vidrio dando un espesor final aproximado de 2.5 [mm]. La distribución de capas se muestra en la Figura 84, donde se ilustra con negro a las capas de fibra de carbono y con gris a las capas de fibra de vidrio.



Figura 84. Distribución de capas.

Una vez definida la distribución de capas se prosigue con la manufactura de las piezas, se sigue el siguiente proceso para el moldeo de cada una de las piezas:

1. Se corta el lienzo de fibra de carbono y vidrio conforme al patrón del molde según cuantas capas sean necesarias. Se emplea cinta adhesiva en el

- contorno de cada recorte para evitar que los hilos de las fibra de carbono se desprendan y mantengan la forma durante el proceso.
2. Se aplica cera desmoldante a la paredes de cada uno de los moldes, para evitar que las fibras y el molde se peguen completamente, arruinando la pieza.
 3. En un recipiente se mezclan 100 [ml] de resina plástica con 1 [ml] de catalizador, una proporción 1 a 100.
 4. Posteriormente se aplica una capa de resina con una brocha y se añade una capa de fibra, buscando humedecer por completo cada capa de fibra. Si no se humedece completamente, ésta no endurecerá de forma uniforme.
 5. Se repite el paso anterior hasta añadir todas las capas deseadas. Este proceso no debe de tomar más de 10 minutos ya que la resina comienza a endurecer haciendo imposible seguir añadiendo capas.
 6. Se sella el molde, haciendo presión con la tornillería y prensas, para dejar reposar la pieza alrededor de dos horas.
 7. Se prosigue con el desmolde de la pieza, siguiendo la forma del molde se cortan los excedentes de material y se realizan los barrenos de cada pieza.
 8. Finalmente se aplica un última capa de resina en la superficie para dar un acabado brillante.

Este proceso debe realizarse con las medidas de seguridad apropiadas, como el uso de una máscara, guantes y bata ya que se manejan sustancias que emanan vapores tóxicos, mientras que la fibra de vidrio puede ser irritante para la piel. En la Figura 85 se muestra el molde sellado con la tornillería y en los extremos prensas tipo “C”, mientras que en la Figura 86 se muestran las piezas obtenidas.



Figura 85. Molde sellado del perfil Roll.



Figura 86. Piezas de estructura móvil.

Se prosigue con el ensamble y cableado de actuadores de la estructura móvil. Dado que el dispositivo en su fase final será sostenido por un operador, esto puede resultar inconveniente durante la etapa de desarrollo, por lo que se realizan pruebas sobre una estructura provisional de MDF como se muestra en la Figura 87 sin necesidad de cargar el dispositivo.



Figura 87. Estructura móvil ensamblada.

7.2 Diseño y Manufactura de Circuito Impreso

Con el fin de realizar pruebas con los elementos electrónicos propuestos, se emplea el uso de *protoboards* sobre la base de la estructura provisional. Se presenta en la Figura 88 una visualización del esquema general, este se puede encontrar para su visualización a detalle en el apartado 11.

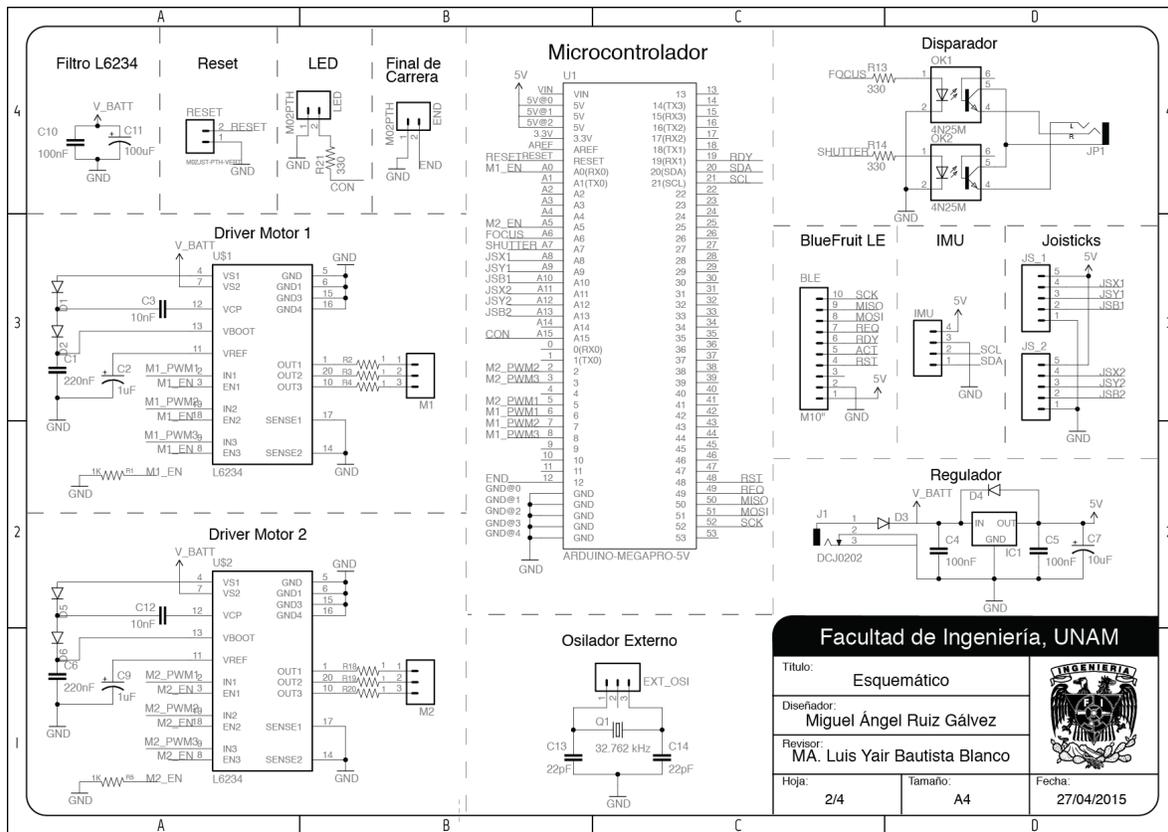


Figura 88. Esquema electrónico.

Sin embargo el dispositivo L6234 sólo se encuentra disponible en México en un encapsulado tipo SO20, por lo que se crea una placa provisional como interfaz del encapsulado de montaje superficial a un tipo DIP para el uso sobre una *protoboard* se puede observar la placa en la Figura 89.

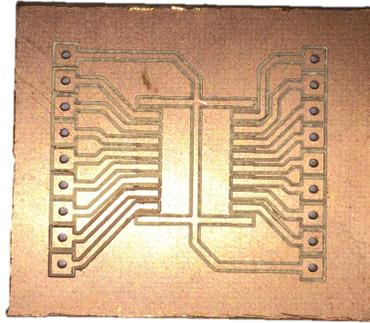


Figura 89. Placa interfaz para L6234.

Posteriormente se prosigue con el alambrado del sistema electrónico y su implementación por segmentos, se genera el código para cada funcionalidad por separado y de forma progresiva se integran es un solo programa. En la Figura 90 se muestra la estructura de pruebas donde se puede observar la ubicación del la circuitería en fase de pruebas e integración, mientras que en la Figura 91 se muestra un acercamiento del circuito propuesto.

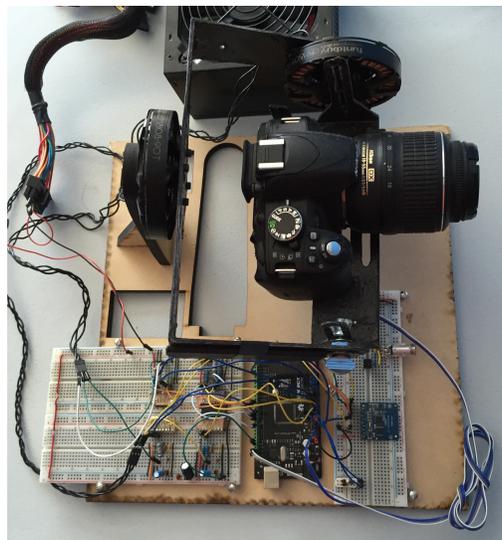


Figura 90. Estructura de pruebas.

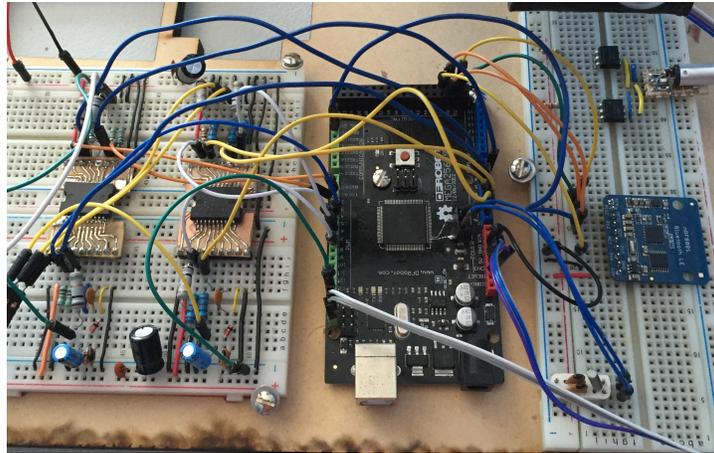


Figura 91. Circuito implementado en *protoboard*.

Una vez comprobado el funcionamiento e implementadas las funcionalidades básicas del dispositivo se prosigue con el diseño y fabricación de una placa tipo *shield*¹⁵ que almacene los distintos elementos electrónicos. Para este proceso se emplea la versión gratuita del software EAGLE®.

Como parámetros de diseño para la placa se consideran el uso de dos capas (Top y Bottom) con el fin de reducir el tamaño de la placa. Durante el desarrollo de este proyecto no se cuenta con las herramientas de control numérico para la manufactura de la placa, por lo que se recurre a un proceso de grabado por material fotosensible. Por lo mismo, se acota como parámetro pistas de 0.024" (0.6 [mm]) de grosor, ya que una pista de una dimensión menor no genera la sombra necesaria para el proceso de grabado por material fotosensible.

Debido a que las perforaciones se realizan de forma manual con un taladro de banco, se acota el mínimo diámetro de perforación en 0.16" (0.4 [mm]) y un grosor de pista de 0.024" (0.6 [mm]). Se seleccionan estos valores con base en la experiencia previa realizando placas de forma casera. Finalmente se acota una distancia mínima entre pistas de 0.050" (1.270 [mm]). Debido a que la placa se

¹⁵ **Shield:** Tarjetas electrónicas diseñadas para ser conectadas en la parte superior de diversas placas de desarrollo con el fin de añadir periféricos y/o funcionalidades.

solda de forma manual se busca el mayor espacio entre pistas, esta longitud es dictada por la distancia entre conexiones en el encapsulado SO20, el encapsulado de la etapa de potencia seleccionada.

Con base en las acotaciones previamente presentadas se procede a diseñar la placa de doble cara, en la Figura 92 se puede observar el diseño con dimensiones de 9.7 x 8.5 [cm]. Se ilustra con rojo y azul las capas Top y Bottom respectivamente, se marca con verde las perforaciones y puentes de los elementos electrónicos y con negro los detalles y barrenos para tornillería. Se puede ver a detalle el diseño de la placa por capas en el apartado 11 .

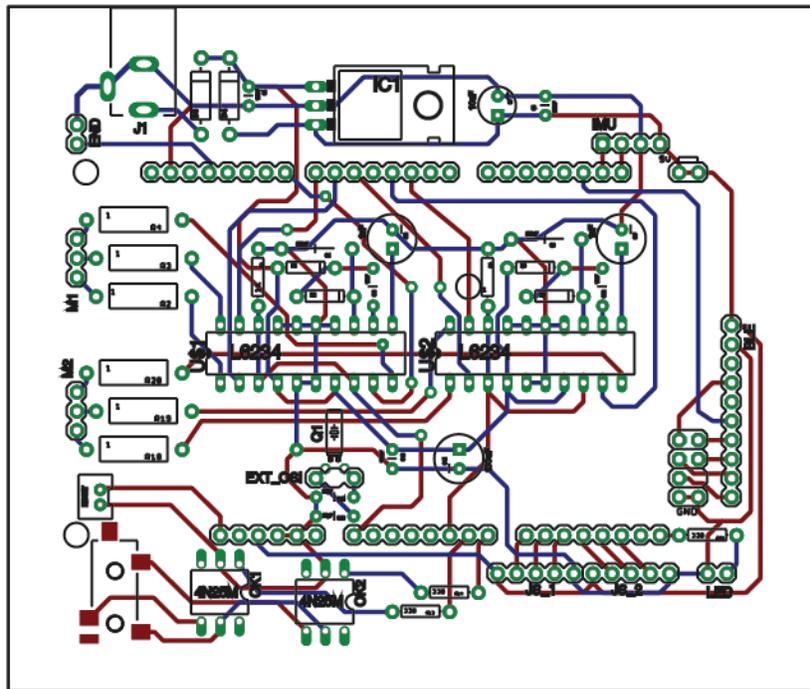


Figura 92. Diseño de placa.

Para el diseño final de circuito se utiliza la etapa de potencia en encapsulado tipo DIP, esto se debe a que este es un circuito de prueba por lo que es probable el daño de algunos componentes.

Una vez determinado el diseño de la placa se prosigue con su manufactura. Para ello, se emplea un método de transferencia por medio de una capa de emulsión fotosensibles adherida a la superficie de la placa de cobre. A continuación se enlistan los pasos empleados para la manufactura de la tableta:

1. Se inicia realizando una impresión del circuito sobre un material transparente, en este caso se utiliza un acetato. Se utiliza una emulsión fotosensible positiva por lo que no es necesario realizar una impresión en negativo.
2. Se recortan las imágenes de las distintas capas y se alinean, haciendo coincidir las pistas y barrenos, se utiliza cinta adhesiva para evitar que estas se separen.
3. Se retira la protección contra luz que posee la placa con emulsión fotosensible.
4. Se fijan los acetatos sobre la placa, se utilizan dos vidrios para presionar el acetato contra la placa de cobre y producir sombra únicamente sobre el área deseada.
5. Se exponen ambos lados de la placa ante luz fluorescente, la emulsión reacciona por lo que únicamente las zonas sombreadas por la impresión en acetato se mantiene fija. La placa se deja ante la luz alrededor de 10 minutos.
6. Se retira la placa de la luz UV y se prosigue con el revelado, para este proceso se emplea una solución de hidróxido de sodio (sosa cáustica) y agua, se sumerge la placa y con ayuda de una broca de cerda suave se retira de forma progresiva la emulsión fotosensible de las zonas no deseadas.
7. Una vez revelada la placa esta se sumerge en cloruro férrico, este químico ataca al cobre que no se encuentra cubierto por la emulsión fotosensible retirándolo de la placa y dejando únicamente las pistas deseadas.

8. Se sumerge una vez más la placa en hidróxido de sodio para retirar el excedente de emulsión fotosensible para proseguir con el soldado de los componentes.
9. Finalmente se limpia la superficie de las pistas y se soldan cada uno de los componentes.

En la Figura 93 y Figura 94 se muestra la vista superior e inferior de la placa ensamblada.

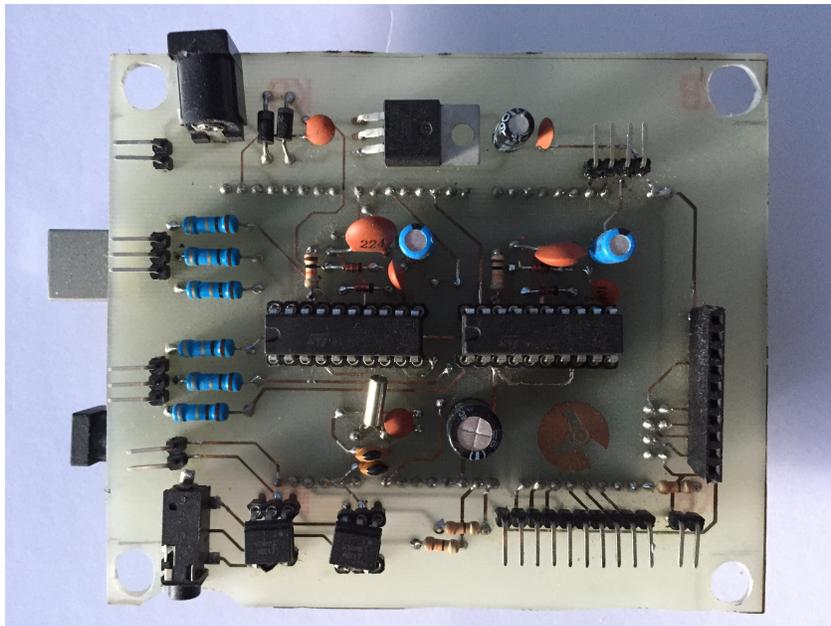


Figura 93. Placa ensamblada vista superior

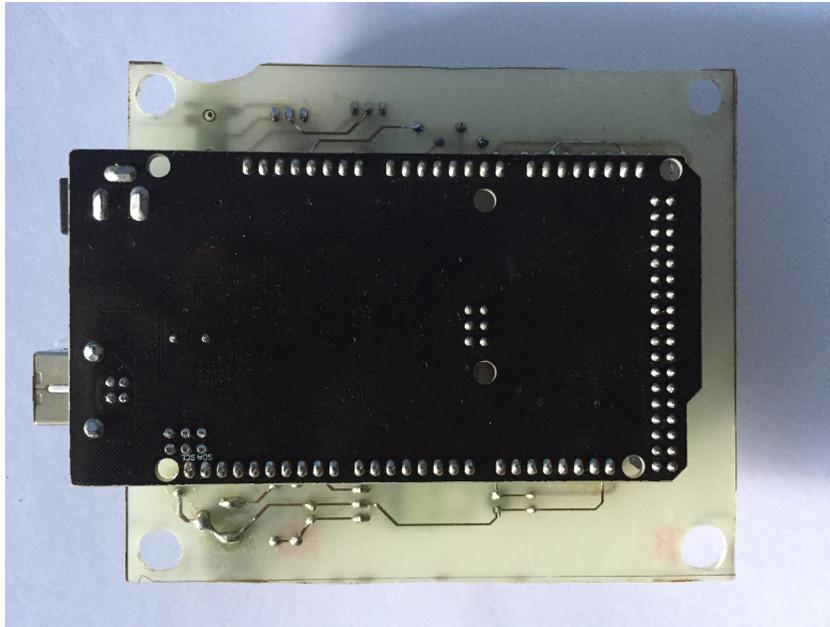


Figura 94. Placa ensamblada vista posterior.

7.3 Estructura de soporte de usuario

Con base en la sección 5 se prosigue con la parte del modelo que actúa como soporte para el usuario, del mismo modo esta estructura actúa como elemento de recubrimiento, alojando y aislando el sistema electrónico del usuario. En el apartado 11 se pueden encontrar los planos de las piezas a manufacturar, así como la guía de ensamble y lista de materiales de la estructura móvil, para esta tarea se utiliza el software de código abierto FreeCAD®.

Por ello, el diseño de esta sección se basa en las dimensiones del circuito eléctrico y la batería, contemplando estas dimensiones se realiza un encapsulado por dos planos y se fija con ayuda de tornillería. Es propio mencionar que esta estructura se diseña para ser manufacturada por corte laser, con la finalidad de realizar la mínima inversión de tiempo y recursos en el modelo.

Para esta estructura se utiliza una estructura de dos planos, la cual tiene el objetivo de dejar el contorno de la placa electrónica al descubierto para poder realizar conexiones de forma sencilla durante las pruebas del sistema. Del mismo modo los planos actúan como elementos de soporte para los mangos que sujeta el usuario y punto de unión para la estructura móvil. Se muestra un explosivo de esta sección en la Figura 95.

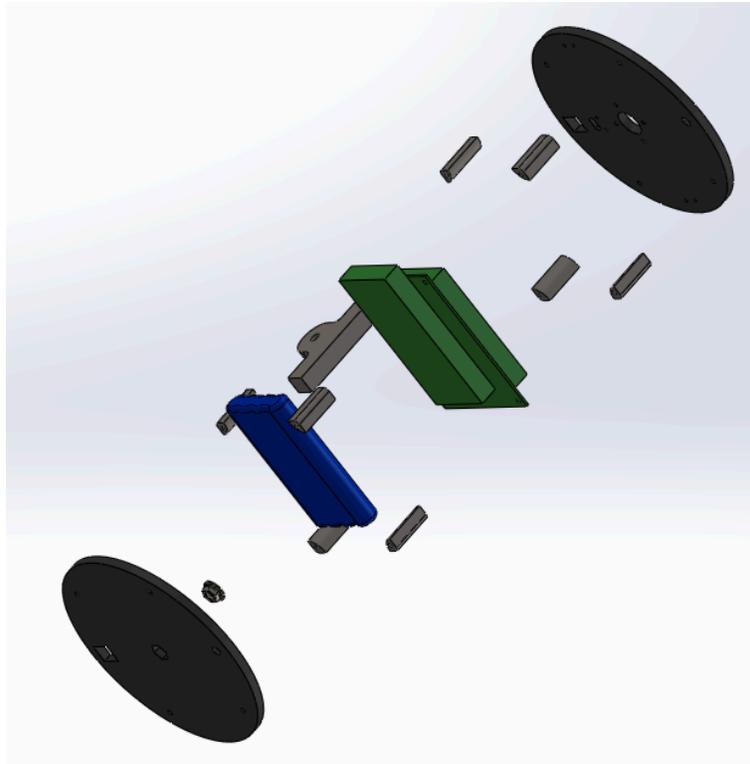


Figura 95. Encapsulamiento de sistema electrónico.

Se puede observar en la figura anterior los planos de forma circular color negro que aíslan y encapsulan la batería (azul) y el circuito (verde), utilizando elementos que actúan como separadores para fijar y mantener la distancia entre elementos.

Ya que el sistema tiene dos funciones generales la estructura antes presentada es la utilizada para la función de time-lapse, esta puede ser montada directamente en un tripié con ayuda de una zapata genérica como la mostrada en la sección 6.2, en la

Figura 96 se muestra el modelo montado directamente sobre un trípode convencional.

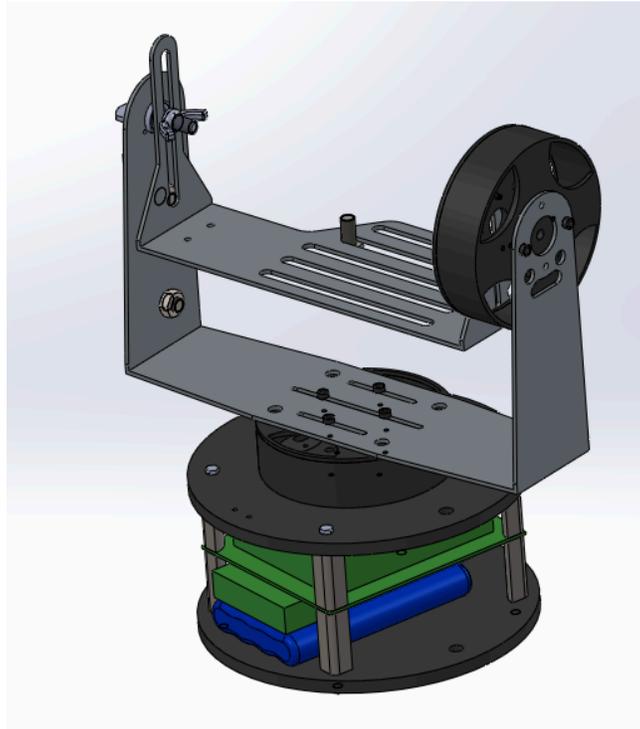


Figura 96. Ensamble en modo *time-lapse*

Posteriormente, para el modo de estabilización se diseñan elementos que pueden ser añadidos a la primera estructura, haciendo de ésta un estructura modular, de modo que el usuario para cambiar entre modalidades del sistema únicamente deber añadir o retirar elementos. En la Figura 97 se muestra el ensamble para el sistema de estabilización.

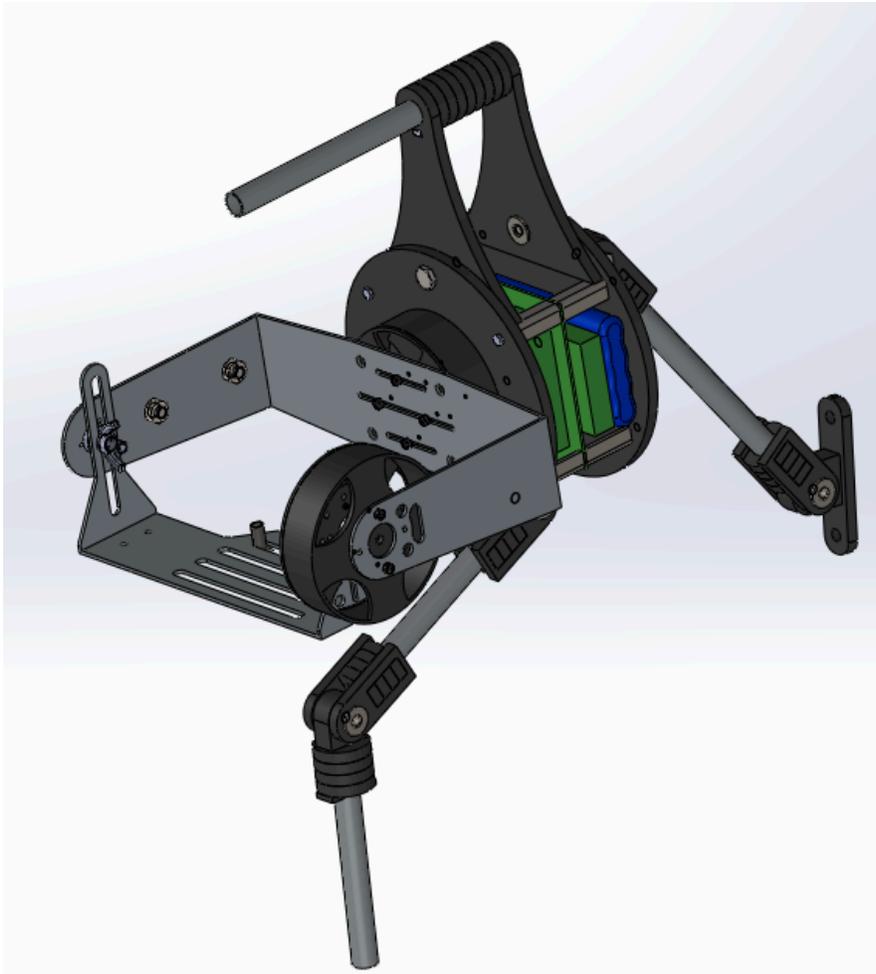


Figura 97. Ensamble modo estabilización.

A diferencia de la sección de estructura móvil donde se utiliza la metodología de diseño de ensamble para reducir la cantidad de piezas, siendo que es una estructura fundamental ya que las dimensiones y forma son imprescindibles para el funcionamiento óptimo del sistema y en futuras iteraciones recibirá pocas modificaciones, sin embargo para el caso de la estructura de interfaz está diseñada para ilustrar el funcionamiento por lo que no amerita un análisis de ensamble siendo que ésta no contempla un diseño visual ni ergonómico por lo que para propósitos del modelo cumple su función sin embargo para propósitos de un prototipo final requerirá rediseño en una futura iteración.

Una vez diseñado y construido el sistema se presenta en la Figura 98 y Figura 99 una vista del modelo construido, por lo que se procede a realizar pruebas con las cuales se pueda comprobar que el diseño presentado cumple y da solución a las necesidades visualizadas.



Figura 98. Modelo funcional en modo *time-lapse*.

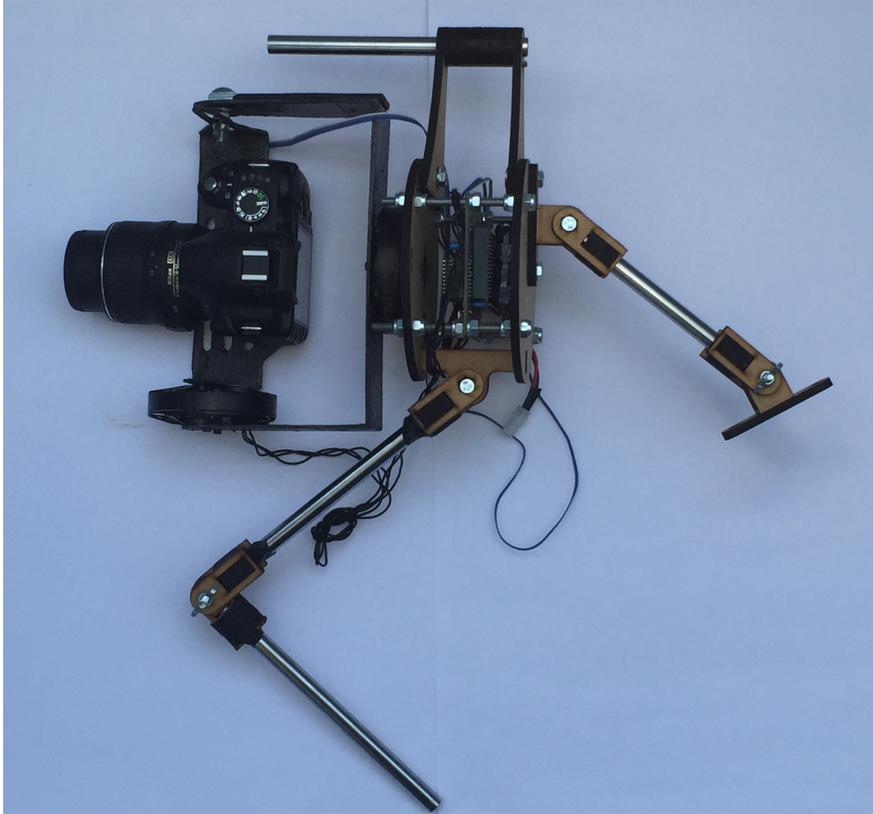


Figura 99. Modelo funcional en modo estabilización.

8. Pruebas y Resultados

En esta sección se busca evaluar el modelo para observar si se cumple el objetivo y se atacan las especificaciones presentadas en la sección 3.2, cada una será evaluada. Esta sección se dividirá en tres según las características a evaluar, ya sean características físicas, operativas o de uso. Todas las características valoradas en esta sección únicamente hacen referencia al modelo desarrollado, del mismo modo para las distintas pruebas donde se requiere de un equipo de video se hace el uso de una cámara réflex Nikon® D3200 con la que se tiene acceso y su optometría de fabrica (NIKKOR18-55mm) las cuales cumplen dentro del rango de equipos especificado dentro del apartado 3.2, con las siguientes especificaciones:

- Dimensiones Cámara: $12.5 \times 9.6 \times 7.6$ [cm]
- Peso Cámara: 0.455 [Kg]
- Diámetro Lente: 7.3 [cm]
- Longitud de Lente: 7.9 [cm]
- Peso del Lente: 0.265 [kg]



Figura 100. Nikon® D3200 y optometría.

8.1 Evaluación de características físicas

En esta sección se evalúan especificaciones que representan valores físicos del sistema, ya sean valores como longitudes, tamaños incluso pesos.

8.1.1 Peso del dispositivo

El peso del dispositivo es de suma importancia ya se para el manejo y transporte del dispositivo, en la sección 3.2 se determina con respecto a los productos comerciales y normas de trabajo en el manejo de cargas, un rango de peso del dispositivo dentro del rango entre dos y cuatro kilogramos. Por lo tanto para evaluar este parámetro se requiere ayuda de una báscula y se realizan dos lecturas, una lectura para el dispositivo en modo *time-lapse* (menor número de piezas) y otra con el dispositivo en modo de estabilización (mayor número de elementos).

A continuación en la Tabla 28 se presentan los valores registrados, cabe mencionar que las mediciones se realizan sin el equipo fotográfico, únicamente se realiza la medición del peso del dispositivo para ambas lecturas.

Tabla 28. Medición de pesos del dispositivo

Modo	Peso[Kg]
<i>Time-lapse</i>	1.180
Estabilización	1.320

Como se puede observar el peso es menor al valor mínimo esperado, esto se debe a la implementación de materiales livianos y resistentes como las fibras de carbono y vidrio, mejorando significativamente el peso del sistema, siendo que entre menor sea se deja un rango amplio para el uso de distintos que equipos fotográficos.

8.1.2 Dimensiones del soporte

Según la selección del grupo de cámaras a atacar por el producto, se establecen dimensiones para poder alojar el equipo de video, estas medidas se establecen en rangos de la cámara a alojar así como dimensiones de la optometría. Como se menciona en el apartado 6.2, las dimensiones para el alojamiento del equipo fotográfico se basan en una equipo mayor tanto en peso como en dimensiones al grupo acotado en la sección 3.2, las dimensiones de cada uno de los elementos se pueden consultar en la sección 11.1.2 (Conjunto de planos mecánicos).

De modo que al realizar pruebas con un equipo dentro de la gama seleccionada no existe ninguna limitante para su uso, en la Figura 101 se muestra el equipo de prueba

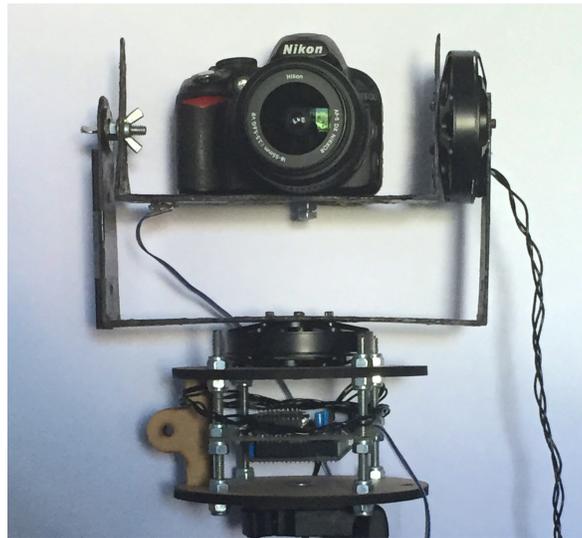


Figura 101. Equipo fotográfico montado.

8.2 Evaluación de características Operativas

En esta sección se busca evaluar las diferentes características de operación del sistema, siendo estas de suma importancia para el desempeño al realizar las diferentes tareas.

8.2.1 Reducción de oscilaciones

Para la evaluación del sistema en modo estabilización se considera una escala cualitativa, como se menciona en la sección 1.3 el presente documento tiene como objetivo presentar un funcionamiento básico del dispositivo propuesto. Se deja como trabajo a futuro un análisis completo de la planta del sistema así como el diseño de un controlador optimizado para la tarea.

Por lo tanto para evaluar la estabilización se propone un experimento comparativo, en el cual se realizan dos grabaciones en igualdad de condiciones, teniendo como único diferenciador entre grabaciones el uso de sistema en una de las grabaciones. Se propone realizar movimientos de 10° de rotación en los ejes Pitch y Roll comparando la grabación, siguiendo la siguiente escala:

- **Contraproducente:** Empeora la grabación cuando se utiliza el equipo en comparación a no utilizarlo.
- **Nula:** No existe ninguna mejora en la grabación cuando se utiliza el equipo en comparación a no utilizarlo.
- **Aceptable:** Existe una mejora mínima en la grabación cuando se utiliza el equipo en comparación a no utilizarlo.
- **Sobresaliente:** Existe una mejora sobresaliente en la grabación cuando se utiliza el equipo en comparación a no utilizarlo. Un desempeño comparable con productos de estabilización en el mercado.

En esta prueba se detecta una falla en el sistema, el sistema encargado de alojar al equipo fotográfico es lo resistente para sostener al equipo, sin embargo cuando se presenta una fuerza externa tiende a ceder y volver a sus estado original, causando un efecto de resorte, este efecto es contraproducente para la estabilización por lo que se recomienda hacer un análisis contra deformaciones y aumentando las capas de fibra de carbono del cuerpo de las estructura para aumentar la rigidez de estas.

Se pueden encontrar en el [Apéndice III: Elementos Audiovisuales](#), el video comparativo del desempeño del sistema en pruebas controladas, después de realizar la prueba comparativa, pues se asignó un desempeño de “Mejora Aceptable” ya que exista una variación positiva en el uso del sistema sin embargo como se observa en el video el desempeño no pude ser comparado con dispositivos similares del mercado.

8.2.2 Resolución de rotación

En esta sección se evalúa la resolución de movimiento del sistema, ya que esta característica tiene un impacto significativo en la captura de *time-lapse*, se evaluó en grados por paso [$^{\circ}$ /paso]. Para la evaluación de esta característica se recurre a la medición el ángulo por paso, se fija uno de los motores sobre una superficie graduada y se coloca un apuntador para definir la posición angular del rotor con respecto al plano graduado. Finalmente se realizan diez lecturas del ángulo en cada paso y se realiza un promedio del ángulo alcanzado. El resumen de resultados alcanzados se presentan en la Tabla 29.

Tabla 29. Resolución de movimiento

Medición	Valor[$^{\circ}$ /paso]
Mayor ángulo registrado	0.95
Menor ángulo registrado	0.4
Promedio	0.65

Como se puede ver el desempeño alcanzado por el dispositivo es aceptable y se encuentra dentro del rango esperado en la sección 3.2.

8.3 Evaluación de características de uso

En esta sección se evalúan aquellas características que van relacionadas al ensamble del sistema y uso de la aplicación móvil.

8.3.1 Número de piezas para la operación del sistema

Ya que el número de piezas que se le dan al usuario resulta relevante en la facilidad de ensamblar en sistema, se realiza un conteo de las piezas con las que el usuario puede interactuar para conseguir los distintos ensambles de las modalidades de uso.

En Figura 102 se muestra un plano de ensamble con todos los elementos con los que el usuario puede interactuar, como se observa existen piezas pre ensambladas las cuales el usuario no tiene la libertad de desensamblar, por lo tanto este ensamble es compuesto por 8 piezas distintas, y un total de 11 piezas.

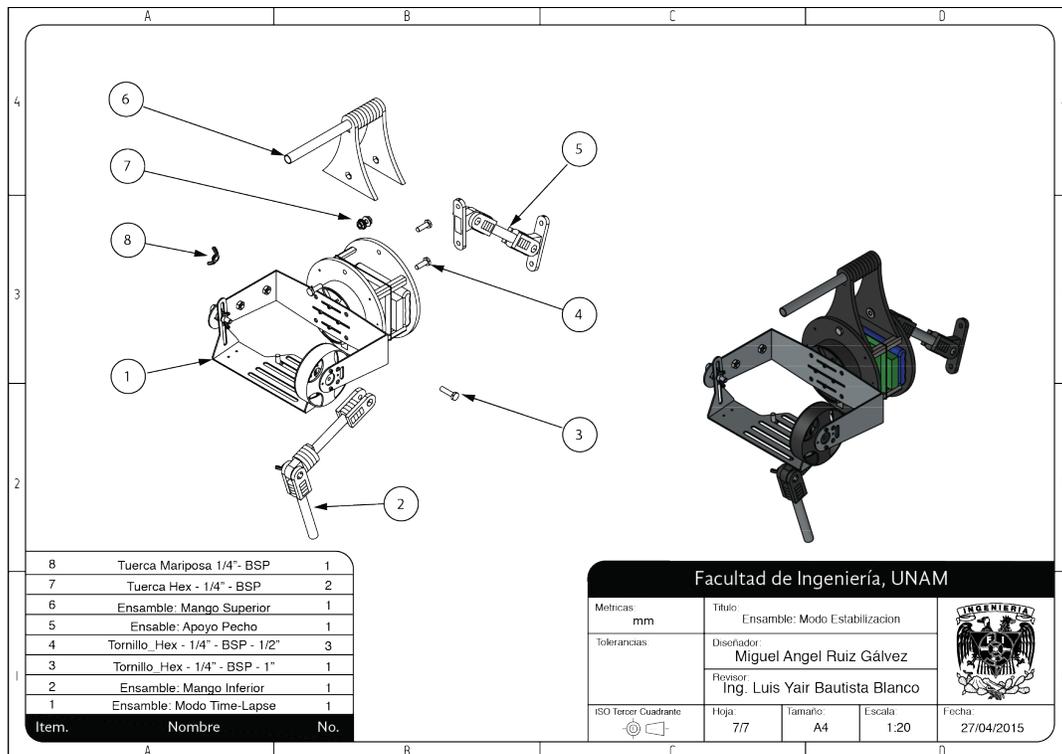


Figura 102. Ensamble: Modo Estabilización.

Este plano se puede ver a detalle en la sección 11.1.2 (Conjunto de planos mecánicos) en el Conjunto de Planos Mecánicos III.

8.3.2 Número de pasos para montar el equipo

En esta sección se emplea la metodología de Ensamble de Boothroyd, ya que se pretende evaluar el número de ensambles que una persona debe realizar para montar el equipo en las diferentes modalidades de uso, se emplea la metodología de ensamble manual como para estandarizar el número de pasos, teniendo la ventaja de obtener al final del proceso no sólo los pasos para montar el equipo sino también el tiempo empleado para cada una de las piezas. Del mismo modo los sub ensambles se consideran como una sola pieza siendo que al usuario se les entregaran previamente ensamblados. Se realiza el análisis de dos ensambles necesarios para operar el equipo, estos son:

Ensamble del equipo fotográfico

Este ensamble presenta tres elementos, el equipo fotográfico, un tornillo de ajuste y el sistema en modo de estabilización. En la Figura 103 se muestra un respectivo ensamble, para continuar con el análisis de ensamble manual de Boothroyd.

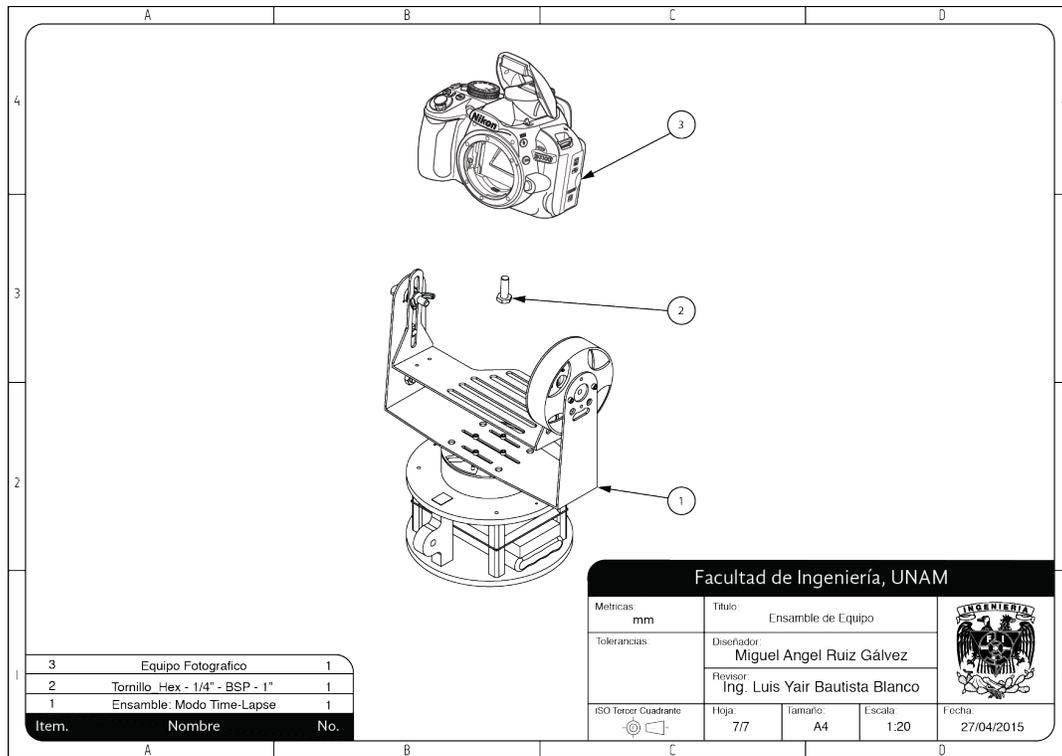


Figura 103. Ensamble de equipo fotográfico.

Este plano se puede ver a detalle en la sección 11.1.2 (Conjunto de planos mecánicos) en el Conjunto de Planos Mecánicos III.

Según el análisis de ensamble de Boothroyd presentado en la 10.1.5, se considera un paso por la inspección de cada una de las piezas, sin embargo la metodología de Boothroyd nos permite añadir operaciones adicionales, como lo es el ajuste de posición del equipo para alinear con los ejes de rotación del equipo con el sistema, teniendo un total de cuatro pasos para este ensamble.

Por otro lado el análisis arroja un tiempo de ensamble manual aproximado de 24 segundos, sin embargo hay que considerar que el tiempo arrojado por el análisis se relaciona según a estadísticas de ensambles para producción en masa por lo que el tiempo real de ensamble podría ser mayor.

Ensamble del sistema en modo estabilización

Del mismo modo se realiza el análisis de ensamble para el modo estabilización, se puede encontrar una ilustración de este ensamble en la Figura 102.

El análisis para este ensamble se puede encontrar en la sección 10.1.6 al igual que el análisis anterior, se detecta un paso por cada inspección de las piezas y se suma una operación adicional para el ajuste de los diferentes apoyos, dando en total de 10 pasos para el ensamble del sistema. Finalmente se obtiene un estimado de 48 segundos como tiempo de ensamble.

8.3.3 Número de paso para programar

No es posible hacer un análisis de usabilidad ya que se requiere un grupo mínimo de 500 personas para obtener una validación, sin embargo como se menciona en la sección 6.8 el apoyo en documentación de experiencia de usuario, por lo tanto esta interfaz se evalúa con respecto a la Regla de los 3 clicks.

La Regla de los 3 clicks es una convención en experiencia de usuario la cual hace referencia a la arquitectura de la información en una app o web, esta regla recomienda organizar los contenidos de tal forma que el usuario pueda llegar a su objetivo en 3 clicks o menos, la correcta aplicación de este principio produce en el

usuario una experiencia positiva ya que pudo cumplir su objetivo satisfactoriamente en pocos pasos. [139]

Con el fin de comprobar esto, se ilustran aquellos elementos que despliegan pantallas diferentes, se marcan con círculos el inicio del flujo (Botones) y con flechas las pantallas consecuentes, a esto se la llama mapa gráfico de navegación.

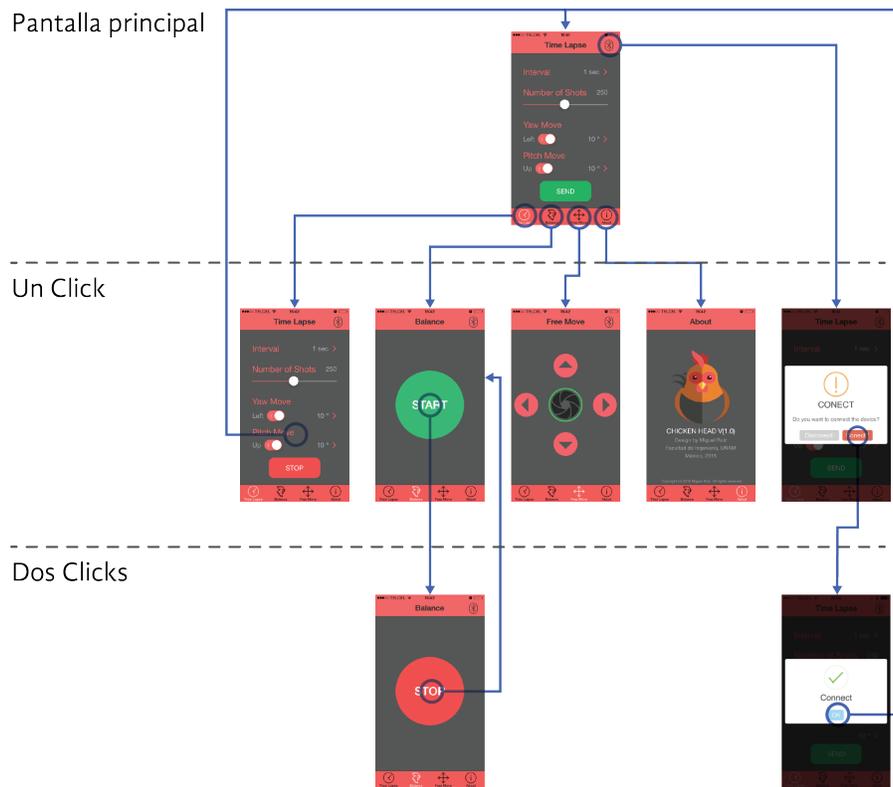


Figura 104. Mapa de Navegación.

Como se puede observar se jerarquiza desde la pantalla principal que arroja la aplicación al menú inicial y subsecuentemente los niveles de profundidad a los que se puede llegar a través de los clicks, se puede concluir que dentro de esta aplicación se puede llegar a la configuración de cualquier función con no mas de dos clicks.

9. Conclusiones

A lo largo del documento “Sistema para captura de *time-lapse* y estabilización de imagen” se realizó una investigación de múltiples productos que resuelven la captura de *time-lapse* y la estabilización de imagen, así como las desventajas de estos productos y la oportunidad para el desarrollo de un nuevo sistema.

La realización de este trabajo fue de gran utilidad, pues además de hacer una revisión de las tecnologías actuales en el campo de la fotografía y cinematografía, permitió incrementar los conocimientos en las áreas de diseño de producto, programación móvil, manufactura, electrónica embebida, instrumentación y su implementación en un sistema que unifica las diversas áreas, así como la capacidad de criterio y toma de decisiones para futuros proyectos.

Asimismo, se comprobó la importancia de una metodología de diseño para el desarrollo de proyectos, ya que permite mantener un proceso creativo de forma ordenada, evitando el trabajo innecesario y enfocando todos los esfuerzos en un objetivo fijo y alcanzable.

Mediante el uso de una metodología de diseño y fabricación del modelo funcional se obtiene un dispositivo que cumple con el objetivo principal el cual es diseñar, construir e implementar, en un modelo funcional, un sistema que conjunte herramientas para la captura de imagen, cumpliendo las necesidades identificadas en este sector de usuarios. Se presenta en la Tabla 30 la lista de especificaciones donde se señalan el rango de valores deseados en la etapa de diseño (sección 3.3) y el valor alcanzado en el dispositivo.

Tabla 30. Tabla de especificaciones obtenidas

Especificación	Unidad	Valor mínimo	Valor Máximo	Valor Alcanzado
Peso del dispositivo: Modo Estabilización	Kg	2	4	1.180
Peso del dispositivo: Modo <i>Time-lapse</i>	Kg	2	4	1.320
Reducir oscilaciones	Mejora en grabación	Ninguna	Sobresaliente	Aceptable
Número de pasos para montar el equipo: Modo <i>Time-lapse</i>	#Pasos	3	10	4
Número de pasos para montar el equipo: Modo Estabilización	#Pasos	3	10	10
Resolución de rotación	°/paso	1	2	0.65
Número de paso para programar	# Pasos	3	7	2
Número de piezas	# de piezas	10	30	11

Del mismo modo en el [Apéndice III: Elementos Audiovisuales](#) se muestra un video con las diferentes funciones del sistema de forma demostrativa.

9.1.1 Trabajo a futuro

El sistema demostró cumplir con las tareas generales de estabilización y captura de *time-lapse*, aunque en la mayoría de los puntos a evaluar se obtienen resultados sobresalientes como el peso del dispositivo, número de pasos para montar el equipo, resolución de rotación, número de pasos para programar y el número de piezas, se identificaron áreas de mejora en siguientes iteraciones del proyecto.

Siendo que para fines de este documento únicamente se busca la prueba de concepto, se encuentra un bajo desempeño en la reducción de oscilaciones, por lo que se propone dar atención especial al diseño de un controlador dedicado a la aplicación y su implementación en el microcontrolador seleccionado.

Durante el manejo de la aplicación móvil se detecta un área de mejora, siendo que la aplicación aún no es capaz de retroalimentar al usuario en el desarrollo o término de un *time-lapse*, por lo tanto en experiencia de usuario queda una brecha en la que el usuario carece de información necesaria.

Del mismo modo se recomienda como siguiente paso la programación de la aplicación en Android, con el fin de cubrir las diferentes cuotas de mercado que cada sistema operativo móvil puede alcanzar, con la facilidad de que no es necesario alterar el hardware y únicamente realizar una aplicación compatible con Bluetooth® 4.0.

Ya que los alcances de este proyecto no contemplan al usuario desde el punto de vista de la ergonomía se recomienda realizar un estudio ergonómico, involucrando sus diversas áreas como lo son la antropometría, fisiología, ergonomía cognitiva y social.

Hasta el momento el dispositivo únicamente se ha visto desde el punto de vista de la ingeniería por lo que se recomienda la colaboración con otras disciplinas como el diseño industrial para aumentar la experiencia de usuario desde el punto de vista funcional y visual, así como disciplinas de publicidad y marketing para su comercialización, e incluso disciplinas legales para su registro de propiedad intelectual, entre otras.

10. Apéndice I: Tablas Boothroyd

10.1.1 Análisis de ensamble manual estructura 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Número de pieza	Número de veces que una operación es terminada simultáneamente	Código de dos dígitos para la manipulación manual	Tiempo de manipulación manual por pieza	Código de dos dígitos para la inserción manual	Tiempo de inserción manual por pieza	Tiempo de operación, segundos (2)*[(4)+(6)]	Costo de operación, centavos 0.4*(7)	¿Consideraciones? para la estimación teórica de las mínimas piezas	Nombre del ensamble
1	2	03	1.88	30	2	7.76	3.104	1	Motor
2	1	83	5.6	00	1.5	7.1	2.84	1	Perfil 1
3	12	11	1.8	38	6	93.6	37.44	1	Tornillo Motor
4	1	80	4.1	30	2	6.1	2.44	0	Cople rodamiento Externo
5	1	13	2.06	30	2	4.06	1.624	1	Rodamiento
6	1	60	1.9	36	8.5	10.4	4.16	0	Cople Rodamiento Interno
7	2	13	2.06	30	2	8.12	3.248	0	Tornillo Base
8	2	14	2.18	30	2	8.36	3.344	0	Tuerca Base
9	1	83	5.6	00	1.5	7.1	2.84	1	Perfil 2
10	1	30	1.95	30	2	3.95	1.58	1	Soporte Cámara Superior
11	1	13	2.06	30	2	4.06	1.624	0	Mariposa
12	1	30	1.95	30	2	3.95	1.58	1	Sello Zapata
13	1	13	2.06	30	2	4.06	1.624	0	Tornillo Sello
14	1	13	2.06	30	2	4.06	1.624	0	Tuerca Sello
						172.68	69.072	7	0.12
						TM	CM	NM	Eficiencia

10.1.2 Análisis de ensamble automático estructura 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Velocidad requerida de ensamble FR (por minuto)	1
Número de pieza	Número de veces que una operación es terminada simultáneamente	Código de cinco dígitos para la manipulación automática	Eficiencia de orientación, OE	Costo relativo del alimentador, CR=FC+DC	Velocidad básica máxima del alimentador, FM	Índice de dificultad para la manipulación automática, DF	Costo de la manipulación automática por pieza, CF+0.03xDF	Código de inserción automática de dos dígitos	Costo relativo de la cabeza de inserción?, WC	Dificultad en la velocidad de la inserción automática, DI	Costo de la inserción automática por pieza, CI=0.06xDI	Costo de operación, centavos (2)x[(8)+(12)]	Estimación del número mínimo de piezas	Nombre del ensamble	
1	2	0 2 0 0 0	0.4	1	230.8	60	1.8	0 3	1.88	112.8	6.8	17.1	1	Motor	
2	1	7 0 8 1 2	0.3	1	642.9	60	1.8	4 3	3.51	210.6	12.6	14.4	1	Perfil 1	
3	12	2 2 0 0 0	0.7 5	1	1125	60	1.8	1 1	1.8	108	6.5	99.4	1	Tornillo Motor	
4	1	0 2 0 0 0	0.4	1	461.5	60	1.8	1 3	2.06	123.6	7.4	9.2	0	Cople rodamiento Externo	
5	1	0 0 0 0 0	0.7	1	656.3	60	1.8	1 3	2.06	123.6	7.4	9.2	1	Rodamiento	
6	1	0 2 0 0 0	0.4	1	461.5	60	1.8	1 3	2.06	123.6	7.4	9.2	0	Cople Rodamiento Interno	
7	2	2 2 0 0 0	0.2 4	4	180	240	7.2	1 3	2.06	123.6	7.4	29.2	0	Tornillo Base	
8	2	0 0 0 0 0	0.7	1	2100	60	1.8	1 4	2.18	130.8	7.8	19.3	0	Tuerca Base	
9	1	7 0 8 1 2	0.3	1	22.5	60	1.8	4 3	3.51	210.6	12.6	14.4	1	Perfil 2	
10	1	6 3 0 0 0	0.4	1	120	60	1.8	3 0	1.95	117	7.0	8.8	1	Soporte Cámara Superior	
11	1	0 2 0 0 0	0.4	1	750	60	1.8	1 3	2.06	123.6	7.4	9.2	0	Mariposa	
12	1	7 4 0 0 0	0.2 5	1	250	60	1.8	3 0	1.95	117	7.0	8.8	1	Sello Zapata	
13	1	2 2 0 0 0	0.7 5	1	661.8	60	1.8	1 3	2.06	123.6	7.4	9.2	0	Tornillo Sello	
14	1	0 0 0 0 0	0.7	1	5250	60	1.8	1 3	2.06	123.6	7.4	9.2	0	Tuerca Sello	
												266.8	7	0.14	
												CA	NM	Eficiencia	

10.1.3 Análisis ensamble manual estructura 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Número de pieza	Número de veces que una operación es terminada simultáneamente	Código de dos dígitos para la manipulación manual	Tiempo de manipulación manual por pieza	Código de dos dígitos para la inserción manual	Tiempo de inserción manual por pieza	Tiempo de operación, segundos (2)*[(4)+(6)]	Costo de operación, centavos 0.4*(7)	¿Consideraciones? para la estimación teórica de las mínimas piezas	Nombre del ensamble	
1	2	03	1.88	30	2	7.76	3.104	1	Motor	
2	1	83	5.6	00	1.5	7.1	2.84	1	Perfil Roll	
3	8	11	1.8	38	6	62.4	24.96	1	Tornillo Motor	
4	1	13	2.06	30	2	4.06	1.624	1	Rodamiento	
5	2	13	2.06	30	2	8.12	3.248	1	Tornillo 1/4	
6	3	14	2.18	30	2	12.54	5.016	1	Tuerca 1/4	
7	1	83	5.6	00	1.5	7.1	2.84	1	Perfil Pitch	
8	1	13	2.06	30	2	4.06	1.624	1	Tornillo ¼ con oreja	
9	1	14	2.18	30	2	4.18	1.672	1	Mariposa ¼	
10	1	83	5.6	00	1.5	7.1	2.84	0	Contrapeso	
							124.42	49.768	9	0.21
							TM	CM	NM	Eficiencia

10.1.4 Análisis ensamble automático estructura 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	1
Número de pieza	Número de veces que una operación es terminada simultáneamente	Código de cinco dígitos para la manipulación automática	Eficiencia de orientación, OE	Costo relativo del alimentador, CR=FC+DC	Velocidad básica máxima del alimentador, FM	Índice de dificultad para la manipulación automática, DF	Costo de la manipulación automática por pieza, CF+0.03xDF	Código de inserción automática de dos dígitos	Costo relativo ζ de la cabeza de inserción?, WC	Dificultad en la velocidad de la inserción automática, DI	Costo de la inserción automática por pieza, CI=0.06xDI	Costo de operación, centavos $(2) \times [(8) + (12)]$	Estimación del número mínimo de piezas	Nombre del ensamble
1	2	0 2 0 0 0	0.4	1	230.8	60	1.8	0 3	1.88	112.8	6.8	17.1	1	Motor
2	1	7 0 8 1 2	0.3	1	20.5	60	1.8	4 3	3.51	210.6	12.6	14.4	1	Perfil Roll
3	8	2 2 0 0 0	0.75	1	1125.0	60	1.8	1 1	1.8	108	6.5	66.2	1	Tornillo Motor
4	1	0 0 0 0 0	0.7	1	656.3	60	1.8	1 3	2.06	123.6	7.4	9.2	1	Rodamiento
5	3	2 2 0 0 0	0.24	1	180.0	60	1.8	1 3	2.06	123.6	7.4	27.6	1	Tornillo 1/4
6	2	0 0 0 3 8	0.7	0.8	2100.0	48	1.44	1 4	2.18	130.8	7.8	18.6	1	Tuerca 1/4
7	1	7 0 8 1 2	0.3	1	25.0	60	1.8	4 3	3.51	210.6	12.6	14.4	1	Perfil Pitch
8	1	2 2 0 0 0	0.75	1	661.8	60	1.8	1 3	2.06	123.6	7.4	9.2	1	Tornillo 1/4 con oreja
9	1	0 0 0 3 8	0.7	0.8	5250.0	48	1.44	1 3	2.06	123.6	7.4	8.9	1	Mariposa 1/4
10	1	7 0 8 1 2	0.7	1	105.0	60	1.8	2 3	3.06	183.6	11.0	12.8	0	Contrapeso
												185.8	9	0.26
												CA	NM	Eficiencia

10.1.5 Análisis ensamble manual: Ensamble de Equipo

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Número de pieza	Número de veces que una operación es terminada simultáneamente	Código de dos dígitos para la manipulación manual	Tiempo de manipulación manual por pieza	Código de dos dígitos para la inserción manual	Tiempo de inserción manual por pieza	Tiempo de operación, segundos (2)*[(4)+(6)]	Costo de operación, centavos 0.4*(7)	¿Consideraciones? para la estimación teórica de las mínimas piezas	Nombre del ensamble
1	1	3 0	1.95	0 0	1.5	3.45	1.38	1	Ensamble: Modo <i>Time-lapse</i>
2	1	1 3	2.06	3 0	2	4.06	1.624	1	Tornillo de ajuste
3	1	3 0	1.95	2 6	9.5	11.45	4.58	1	Equipo Fotográfico
4	1	0	0	9 2	5	5	2	1	Ajuste de equipo
						23.96	9.584	4	0.500834725
						TM	CM	NM	<i>Eficiencia</i>

10.1.6 Análisis ensamble manual: Ensamble de Estabilización

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Número de pieza	Número de veces que una operación es terminada simultáneamente	Código de dos dígitos para la manipulación manual	Tiempo de manipulación manual por pieza	Código de dos dígitos para la inserción manual	Tiempo de inserción manual por pieza	Tiempo de operación, segundos $(2)*[(4)+(6)]$	Costo de operación, centavos $0.4*(7)$	¿Consideraciones? para la estimación teórica de las mínimas piezas	Nombre del ensamble
1	1	3 0	1.95	0 0	1.5	3.45	1.38	1	Ensamble: Modo <i>Time-lapse</i>
2	1	3 0	1.95	2 6	1.5	3.45	1.38	1	Ensamble Mango Inferior
3	1	1 3	2.06	3 0	2	4.06	1.624	1	Tornillo Hex 1/4" -1"
4	3	1 3	2.06	3 0	2	12.18	4.872	0	Tornillo Hex 1/4" -1/2"
5	1	3 0	1.95	2 6	1.5	3.45	1.38	1	Ensamble: Apoyo Pecho
6	1	3 0	1.95	2 6	1.5	3.45	1.38	1	Ensamble: Mango Superior
7	1	1 3	2.06	3 0	2	4.06	1.624	0	Tuerca Hex - 1/4"
8	1	1 3	2.06	3 0	2	4.06	1.624	1	Tuerca Mariposa 1/4"
9	1	0	0	9 2	5	5	2	0	Ajuste: Apoyo Pecho
10	1	0	0	9 2	5	5	2	1	Ajuste: Mango Inferior
						48.16	19.264	7	0.436046512
						TM	CM	NM	<i>Eficiencia</i>

11. Apéndice II: Planos y esquemáticos

11.1.1 Conjunto de planos electrónicos

Se puede encontrar en este apéndice el conjunto de planos de la sección electrónica del dispositivo, estos planos se encuentran en formato PDF. Se pueden encontrar en la carpeta del CD de este documentos, así como en el repositorio del proyecto, dentro de la carpeta raíz del proyecto con la siguiente ruta:

<https://github.com/miguueelo/Tesis-SCTEI-UNAM>

Planos > Conjunto de planos electrónicos > Conjunto de planos electrónico.pdf

11.1.2 Conjunto de planos mecánicos

Se puede encontrar en este apéndice el conjunto de planos de cada una de las piezas que conforman el sistema así como los planos de ensamble del dispositivo, estos planos se encuentran en formato PDF. Se pueden encontrar en la carpeta del CD de este documentos, así como en el repositorio del proyecto, se dividen en subconjuntos según la sección a la que pertenezca la pieza, dentro de la carpeta raíz del proyecto con la siguiente ruta:

<https://github.com/miguueelo/Tesis-SCTEI-UNAM>

Planos > Conjunto de planos mecánicos > Conjunto de planos I: Estructura Móvil .pdf

Planos > Conjunto de planos mecánicos > Conjunto de planos II : Soportes, juntas y apoyos .pdf

Planos > Conjunto de planos mecánicos > Conjunto de planos III : Estructura Central .pdf

12. Apéndice III: Elementos Audiovisuales

Se puede encontrar en este apéndice un conjunto de videos en formato mp4, que tiene la tarea de ilustrar las diferentes funciones así como los resultados obtenidos. Se pueden encontrar en la carpeta del CD de este documentos, así como en el repositorio del proyecto, dentro le la carpeta raíz del proyecto con la siguiente ruta:

<https://github.com/miguueelo/Tesis-SCTEI-UNAM>

Elementos audiovisuales > Análisis_de_estabilizacion.mp4

Elementos audiovisuales > Análisis_de_resolucion.mp4

Elementos audiovisuales > Funciones_Básicas.mp4

13. Apéndice IV: Archivos de Código

Se puede encontrar en este apéndice el conjunto de códigos, ya sea el implementado en el microcontrolador, o para la interfaz móvil. Se pueden encontrar en la carpeta del CD de este documentos, así como en el repositorio del proyecto, dentro de la carpeta raíz del proyecto con la siguiente ruta:

<https://github.com/miguueelo/Tesis-SCTEI-UNAM>

Archivos de Código > Implementación Microcontrolador

Archivos de Código > Implementación Interfaz Móvil

14. Referencias

- [1] Fira Barcelona, "El sector de la fotografía e imagen," Department d'Investifació i Estrategia de Mercats, Fira Barcelona, España, 2009.
- [2] Nikon Corporation, "Nikon Anual Report 2013," Departamento de Comunicación, Nikon Corporation, Japón, Anual Report 2013.
- [3] Canon Inc., "Canon Anual Report," Departamento de Comunicación, Canon Inc., Japón, Reporte Anual 2013.
- [4] Karl Ulrich and Steven Eppinger, *Product Design and Development*, Quinta ed. Philadelphia, EUA: McGraw-Hill, 2011.
- [5] George E. Dieter and Linda C. Schmidt, *Engineering Design*, Quinta ed. EUA: McGraw-Hill, 2012.
- [6] G. Boothroyd, *Desing for Assembly Handboock*. Amherst, Massachusetts: University of Massachusetts, 2000.
- [8] Enrique Pacheco Toledo. (2012) enriquepacheco.com. [Online].
HYPERLINK "http://www.enriquepacheco.com/10-tips-for-shooting-time-lapse?lang=es" <http://www.enriquepacheco.com/10-tips-for-shooting-time-lapse?lang=es>
- [7] Dobrila Rancic Moogk, *Minimum Viable Product and the Importance of Experimentation in Technology Startups.*: Technology Innovation Management Review, 2012.
- [9] Mario Pérez. (2010, Novimebre) Blog del Fotógrafo. [Online]. HYPERLINK "http://www.blogdelfotografo.com/nikon-d3100-erase-una-vez-la-mejor-camara-para-principiantes/%20" <http://www.blogdelfotografo.com/nikon-d3100-erase-una-vez-la-mejor-camara-para-principiantes/>
- [10] Luis Sanchez. (2013, Mayo) RecomendarBlog. [Online]. HYPERLINK "http://blog.recomendar.com/las-7-camaras-reflex-mas-recomendadas/" <http://blog.recomendar.com/las-7-camaras-reflex-mas-recomendadas/>

- [11] Nikon Corporation, *Cámara digital D3100 Manual de referencia*. Japón, 2012, Manual de Producto.
- [12] Constructer. (2012, Enero) Instructables. [Online]. HYPERLINK "http://www.instructables.com/id/Timelapse-Photos-With-Your-Camera-The-Easy/?lang=es" <http://www.instructables.com/id/Timelapse-Photos-With-Your-Camera-The-Easy/?lang=es>
- [13] JD Rose. (2005, Diciembre) Photo.net. [Online]. HYPERLINK "http://photo.net/nature-photography-forum/00EUoU?start=0" <http://photo.net/nature-photography-forum/00EUoU?start=0>
- [14] Franz Starp and Dieter Rittmann, "Cable release attachable to a camera shutter," US 4339192 A, Julio 13, 1982.
- [15] Doc-diy. (2010) Doc-diy.com. [Online]. HYPERLINK "http://www.doc-diy.net/photo/remote_pinout/" http://www.doc-diy.net/photo/remote_pinout/
- [16] Photoduino. (2013) Photoduino.com. [Online]. HYPERLINK "http://photoduino.com/es/index.html%20" <http://photoduino.com/es/index.html>
- [18] PHOTOGRAPHIC AND IMAGING MANUFACTURERS ASSOCIATION, INC., "Picture Transfer Protocol (PTP) for Digital Still Photography Devices," PIMA 15740:2000, 2000.
- [17] Control Open Motion. (2013) Sourceforge.net. [Online]. HYPERLINK "http://sourceforge.net/projects/openmoco/" <http://sourceforge.net/projects/openmoco/>
- [19] Duka Istvan. (2010) Digicamcontrol.com. [Online]. HYPERLINK <http://digicamcontrol.com>
- [20] PTPCanon by Andrew Huang Evanzhu. (2010) Pudn.com. [Online]. HYPERLINK "http://www.pudn.com/downloads11/sourcecode/unix_linux/detail43953.

html"

http://www.pudn.com/downloads11/sourcecode/unix_linux/detail43953.html

[21] gPhoto. (2010) gphoto.org. [Online]. HYPERLINK

"http://www.gphoto.org" <http://www.gphoto.org>

[22] Gadget Infinity. [Online]. HYPERLINK

"http://www.gadgetinfinity.com/jjc-multi-exposure-timer-remote-met-for-canon-650d-600d-rebel-t4i-t3i.html" <http://www.gadgetinfinity.com/jjc-multi-exposure-timer-remote-met-for-canon-650d-600d-rebel-t4i-t3i.html>

[23] Gadget Infinity. [Online]. HYPERLINK

"http://www.gadgetinfinity.com/jjc-multi-exposure-timer-remote-met-for-canon-650d-600d-rebel-t4i-t3i.html" <http://www.gadgetinfinity.com/jjc-multi-exposure-timer-remote-met-for-canon-650d-600d-rebel-t4i-t3i.html>

[24] Astro. (2012) [Online]. HYPERLINK <http://orderastro.com>

[25] Syrp. (2013) Syrp.co. [Online]. HYPERLINK <http://syrp.co.nz>

[26] Elysia Visuals. (2013) Elysiavisuals.com. [Online]. HYPERLINK

"http://www.elysiavisuals.com/content/merlin-2-axis-pan-and-tilt-head" <http://www.elysiavisuals.com/content/merlin-2-axis-pan-and-tilt-head>

[28] Joakim. (2003, Mayo) Regnstrom. [Online]. HYPERLINK

"http://www.regnstrom.com/flystand/" <http://www.regnstrom.com/flystand/>

[27] Dynamic Perception. (2013) Dynamicperception.com. [Online].

HYPERLINK "http://www.dynamicperception.com/Stage-Zero-Pro-Timelapse-Bundle-p/bdl-0-6ftpro.htm"

<http://www.dynamicperception.com/Stage-Zero-Pro-Timelapse-Bundle-p/bdl-0-6ftpro.htm>

[29] Garret W Brown, "Equipment for use with hand held motion picture cameras," 4 017 168, 1977.

- [30] Golin Harris. (2013) All Things Photography. [Online]. HYPERLINK
"http://www.all-things-photography.com/olympus-omd-em5.html"
<http://www.all-things-photography.com/olympus-omd-em5.html>
- [31] Preston Scott. (2011, Junio) Camera Technica. [Online]. HYPERLINK
"http://www.cameratechnica.com/2011/06/16/the-science-of-image-stabilization-technology/"
<http://www.cameratechnica.com/2011/06/16/the-science-of-image-stabilization-technology/>
- [32] Borys Golik, "Development of a Test Method for Image Stabilizing Systems," Department of Imaging Sciences and Media Technology Cologne, University of Applied Sciences, 2006.
- [33] (2013, Julio) ALTFoto. [Online]. HYPERLINK
"http://altfoto.com/2013/07/como-funciona-el-estabilizador-de-imagen"
<http://altfoto.com/2013/07/como-funciona-el-estabilizador-de-imagen>
- [34] Robert Pyzel, "Stabilizer for hand cameras," US 2239201 A, Abril 22, 1942.
- [35] Steven M. Breslau, "Video camera stabilizer," US 4687309 A, Agosto 18, 1987.
- [36] David F. Ligwall, "Camera support," US 5073788 A, Diciembre 17, 1991.
- [38] Harold C. Greene, "Shoulder platform for camera," US 6641010 B2, Noviembre 4, 2003.
- [37] Mario F. Di Leo, "System for camera stabilization," US 8657507 B2, Febrero 25, 2014.
- [39] Brian Buswell, "Body mounted camera support assembly," US5462214 A, Octubre 31, 1995.
- [40] Peter John Taylor, "Apparatus for support and movement of a camera," US20110080564 A1, Abril 7, 2011.
- [41] Jonah Guelzo. (2014, Enero) Youtube. [Online]. HYPERLINK

- "https://www.youtube.com/watch?v=27JDwcACZVM"
<https://www.youtube.com/watch?v=27JDwcACZVM>
- [42] Leonard T. Chapman, "Three-axis remote camera head," US 7209176 B2, Abril 24, 2007.
- [43] Leonard Chapman, "Camera head with pan, roll and tilt movement," US 8485740 B12013, Julio 16, 2013.
- [44] RHINO. (2013) Rhinocameragear.com. [Online]. HYPERLINK
"http://rhinocameragear.com/store/camera-stabilizers/rhino-steady"
<http://rhinocameragear.com/store/camera-stabilizers/rhino-steady>
- [45] Manfrotto. (2013) Manfrotto.com. [Online]. HYPERLINK
"http://www.manfrotto.com/fig-rig" <http://www.manfrotto.com/fig-rig>
- [46] Glidemcam. (2013) Glidecam.com. [Online]. HYPERLINK
"http://glidecam.com/product-xr-series" <http://glidecam.com/product-xr-series>
- [48] RHINO. (2014) Rhinocameragear.com. [Online]. HYPERLINK
"http://rhinocameragear.com/store/camera-rigs/rhino-rig-full-kit"
<http://rhinocameragear.com/store/camera-rigs/rhino-rig-full-kit>
- [47] Zacuto. (2014) Zacuto.com. [Online]. HYPERLINK
" http://store.zacuto.com/gh4-runngun-kit/" <http://store.zacuto.com/gh4-runngun-kit/>
- [49] Zacuto. (2013) Zacuto.com. [Online]. HYPERLINK
" http://store.zacuto.com/gh4-recoil-kit/" <http://store.zacuto.com/gh4-recoil-kit/>
- [50] Turbo Ace. (2014) Turboace.com. [Online]. HYPERLINK
"http://www.turboace.com/turboaceallsteady3-axisdigitalstabilizedcameragimbalultrafastgyrostabilizationforcanon5d6dandblackma-6.aspx%20" <http://www.turboace.com/turboaceallsteady3-axisdigitalstabilizedcameragimbalultrafastgyrostabilizationforcanon5d6dandblackma-6.aspx%20>

[blackma-6.aspx](#)

- [51] Abel Cine. (2014) Abelcine.com. [Online]. HYPERLINK
" <http://www.abelcine.com/store/Steadicam-Archer-2/> "
2/" <http://www.abelcine.com/store/Steadicam-Archer-2/>
- [52] Ward Brown, "Brushless DC Motor Control Made Easy AN857," Microchip Technology Inc., 2002.
- [53] Bilal Akin and Manish Bhardwaj, "Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors," Texas Instruments Incorporated., 2013.
- [54] Padmaraja Yedamale, "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals (AN885)," Microchip Technology Inc., 2003.
- [55] Dymetic Systems Inc., "BRUSHLESS VS BRUSHED MOTORS ," Dymetic Systems Inc., EUA, 2013.
- [56] Steven Keeping, "An Introduction to Brushless DC Motor Control," Hearst Electronic Products, 2013.
- [58] Renesas Electronics Corporation. (2013) renesas.com. [Online].
HYPERLINK
"http://www.renesas.com/applications/key_technology/motor_control/motor_algorithms/child/bldc.jsp"
http://www.renesas.com/applications/key_technology/motor_control/motor_algorithms/child/bldc.jsp
- [57] José Carlos Gamazo-Real, Ernesto Vázquez-Sánchez, and Jaime Gómez-Gil, "Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends," *Sensors (Basel)*., Julio 2010.
- [59] Daniel W Hart, *Electrónica de potencia.*: Pearson Educación, S.A., 2001.
- [60] John G. Kassakian and M.F. Shlecht, *Principles of Power Electronics.*: Prentice Hall, 1991.
- [61] Ralf-Gordon Jahns. (2010, Mayo) Research2guidance.com. [Online].

HYPERLINK "http://research2guidance.com/corporate-app-will-become-as-important-for-companies-as-having-a-corporate-website-a-look-at-the-german-market/" <http://research2guidance.com/corporate-app-will-become-as-important-for-companies-as-having-a-corporate-website-a-look-at-the-german-market/>

- [62] Applicate team. (2014, Enero) applicate.mx. [Online]. HYPERLINK "http://www.applicate.mx/es/Applicate/nada_detiene_crecimiento_aplicaciones_moviles_mexico" http://www.applicate.mx/es/Applicate/nada_detiene_crecimiento_aplicaciones_moviles_mexico
- [63] We Are Social. (2014, Junio) Global Digital Statistics 2014. [Online]. HYPERLINK "http://wearesocial.sg/blog/2014/08/social-digital-mobile-august-2014/" <http://wearesocial.sg/blog/2014/08/social-digital-mobile-august-2014/>
- [64] Market Share Statistics for Internet Technologies. (2014, Agosto) netmarketshare.com. [Online]. HYPERLINK "www.netmarketshare.com" www.netmarketshare.com
- [65] Ryan Connolly. (2013) Youtube. [Online]. HYPERLINK "https://www.youtube.com/watch?v=uBiRDxoGsCs" <https://www.youtube.com/watch?v=uBiRDxoGsCs>
- [66] John E. Fry. (2013) Youtube. [Online]. HYPERLINK "https://www.youtube.com/watch?v=pHsf5kw6saQ" <https://www.youtube.com/watch?v=pHsf5kw6saQ>
- [68] Tom Long. (2013) Youtube. [Online]. HYPERLINK "https://www.youtube.com/watch?v=sz7NvHjiOxQ" <https://www.youtube.com/watch?v=sz7NvHjiOxQ>
- [67] Glass Pixel Studios. (2014) Youtube. [Online]. HYPERLINK "https://www.youtube.com/watch?v=-H-6sFhPKvs" <https://www.youtube.com/watch?v=-H-6sFhPKvs>

<https://www.youtube.com/watch?v=-H-6sFhPKvs>

- [69] Secretaria del Trabajo y Previsión Social, "Carga manual de materiales," in *NORMA Oficial Mexicana NOM-006-STPS-2000, Manejo y almacenamiento de materiales-Condicion es y procedimientos de seguridad*. NORMA Oficial Mexicana NOM-006-STPS-2000, Manejo y almacenamiento de materiales-Condicion es y procedimientos de seguridad., 2001.
- [70] Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, *Manipulación manual de cargas en el lugar de trabajo* . Europa, 2007.
- [71] Dan Martland. (2013) Youtube. [Online]. HYPERLINK
"https://www.youtube.com/watch?v=g7tXLLBGkNc%20"
<https://www.youtube.com/watch?v=g7tXLLBGkNc>
- [72] Nitsan Simantov. (2014) Youtube. [Online]. HYPERLINK
"https://www.youtube.com/watch?v=T0fR9PP-Vp0"
<https://www.youtube.com/watch?v=T0fR9PP-Vp0>
- [73] Steve Krug, *Don't Make Me Think!*. California, USA: New Riders Publishing Berkeley, 2006.
- [74] Jodie Moule, *KILLER UX DESIGN.*: SitePoint Pty. Ltd. , 2012.
- [75] Pieter-Jan. (2013, Abril) Pieter-jan.com. [Online]. HYPERLINK
"http://www.pieter-jan.com/node/11%20 " <http://www.pieter-jan.com/node/11>
- [76] Analog Devices, Inc., "Using an Accelerometer for Inclination Sensing," Christopher J. Fisher, Analog Devieces, Inc., Aplication Note 2010.
- [78] Starlino. (2009, Dicimebre) A Guide to Using IMU. [Online]. HYPERLINK
"http://www.starlino.com/imu_guide.html"
http://www.starlino.com/imu_guide.html
- [77] Analog Devices Inc., "Phase and Frequency Response of iMEMS® Accelerometers and Gyros," Harvey Weinberg, Analog Devices Inc.,

Apliaction Note 2004.

- [79] Shane Colton. (2007, Junio) The Balance Filter. [Online]. HYPERLINK "https://b94be14129454da9cf7f056f5f8b89a9b17da0be.googledrive.com/host/0B0ZbiLZrqVa6Y2d3UjFVWDhNZms/filter.pdf"
<https://b94be14129454da9cf7f056f5f8b89a9b17da0be.googledrive.com/host/0B0ZbiLZrqVa6Y2d3UjFVWDhNZms/filter.pdf>
- [80] Greg Welch and Gary Bishop, "An introduction to the Kalman Filter," Department of Compute, Science University of North Carolina, 2001.
- [81] humorvitreo optica. (2011, Agosto) humorvitreo-optica.blogspot.mx. [Online]. HYPERLINK "http://humorvitreo-optica.blogspot.mx/2010/10/vision-binocular-ii-estrabismos-cuando.html"
<http://humorvitreo-optica.blogspot.mx/2010/10/vision-binocular-ii-estrabismos-cuando.html>
- [82] Auston Wilson. (2010, Novimebre) DIY Video Camera PVC Fig Rig. [Online]. HYPERLINK "http://www.nextwavedv.com/diy-video-camera-pvc-fig-rig/" <http://www.nextwavedv.com/diy-video-camera-pvc-fig-rig/>
- [83] Stephen Diaz. (2012) Camera test on homemade fig rig. [Online]. HYPERLINK "http://trecrd.com/post/1273372463/new-camera-test-on-homemade-fig-rig" <http://trecrd.com/post/1273372463/new-camera-test-on-homemade-fig-rig>
- [84] David Fox. (2010, Septiembre) Urbanfoxtv. [Online]. HYPERLINK "http://urbanfoxtv.blogspot.mx/2010/09/redrock-rolls-out-nano-dslr-rigs.html" <http://urbanfoxtv.blogspot.mx/2010/09/redrock-rolls-out-nano-dslr-rigs.html>
- [85] CheesyCam. (2011) CheesyCam.com. [Online]. HYPERLINK "http://cheesycam.com/latest-mini-shooter-rigs/" <http://cheesycam.com/latest-mini-shooter-rigs/>
- [86] Jeremy Lin. (2012, Julio) dslr-deal.com. [Online]. HYPERLINK

"<http://www.dslr-deal.com/what-you-never-know-about-redrock-micro-dslr-field-cinema-standard-bundle-v2/>" <http://www.dslr-deal.com/what-you-never-know-about-redrock-micro-dslr-field-cinema-standard-bundle-v2/>

[88] Lelong. (2013) Lelong.com. [Online]. HYPERLINK

"<http://www.lelong.com.my/sevenoak-camera-stabilizer-steadicam-iphone-3gs-4-4s-dslr-canon-sweetpassion-127898764-2015-04-Sale-P.htm>"
<http://www.lelong.com.my/sevenoak-camera-stabilizer-steadicam-iphone-3gs-4-4s-dslr-canon-sweetpassion-127898764-2015-04-Sale-P.htm>

[87] Wolf Crow. (2012, Agosto) Wolfcrow.com. [Online]. HYPERLINK

"<http://wolfcrow.com/blog/master-guide-to-rigging-a-blackmagic-design-cinema-camera-part-8/>" <http://wolfcrow.com/blog/master-guide-to-rigging-a-blackmagic-design-cinema-camera-part-8/>

[89] Aliimg. (2012) Steadicam Single Arm. [Online]. HYPERLINK

"http://i01.i.aliimg.com/wsphoto/v0/586312633_1/New-WONDLAN-Leopard3-Camera-Steadycam-Steadicam-Single-Arm-Vest-System-can-work-with-Carbon-fiber-stabilizer.jpg"
http://i01.i.aliimg.com/wsphoto/v0/586312633_1/New-WONDLAN-Leopard3-Camera-Steadycam-Steadicam-Single-Arm-Vest-System-can-work-with-Carbon-fiber-stabilizer.jpg

[90] UTOPIA. (2014) FLOWCINE GRAVITY ONE. [Online]. HYPERLINK

"<http://www.utopiacam.com/en/steadicam-/1237-gravity-one.html>"
<http://www.utopiacam.com/en/steadicam-/1237-gravity-one.html>

[91] iflight-rc. (2014) iPower GBM8108-90T. [Online]. HYPERLINK

"<http://www.iflight-rc.com/ipower-gbm8108-90t.html>"
<http://www.iflight-rc.com/ipower-gbm8108-90t.html>

[92] Funtobuy. (2014) funtobuyonline.com. [Online]. HYPERLINK

"<http://www.funtobuyonline.com/ftbo-brushless-gimbal-motor-gbm8108->

90t-for-dslr-red-epic-camera-fpv-aerial-photography.html"

<http://www.funtobuyonline.com/ftbo-brushless-gimbal-motor-gbm8108-90t-for-dslr-red-epic-camera-fpv-aerial-photography.html>

[93] Industrial Electronics. (2009) eeherald.com. [Online]. HYPERLINK

"http://www.eeherald.com/section/design-guide/brushless_dcmotor_design.html"

http://www.eeherald.com/section/design-guide/brushless_dcmotor_design.html

[94] Domenico Arrigo, "L6234 THREE PHASE MOTOR DRIVER," 2001.

[95] SGS-THOMSON Microelectronics, "THREE PHASE MOTOR DRIVER," 1996.

[96] InvenSense Inc. , "MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 ," 2013.

[98] Arduino.cc. MPU-6050 Accelerometer + Gyro. [Online]. HYPERLINK

"http://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050"

<http://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050>

[97] Jeff Rowberg. (2011, Julio) i2cdevlib. [Online]. HYPERLINK

"https://github.com/jrowberg/i2cdevlib"

<https://github.com/jrowberg/i2cdevlib>

[99] Emartee. (2014) MPU-6050 3 Axis Gyroscope And Accelerometer Module.

[Online]. HYPERLINK

"http://emartee.com/product/42257/MPU%206050%203%20Axis%20Gyroscope%20And%20Accelerometer%20Module"

<http://emartee.com/product/42257/MPU%206050%203%20Axis%20Gyroscope%20And%20Accelerometer%20Module>

[100] Bluetooth SIG, Inc. (2014) History of the Bluetooth Special Interest Group.

[Online]. HYPERLINK "http://www.bluetooth.com/Pages/History-of-

Bluetooth.aspx" [http://www.bluetooth.com/Pages/History-of-](http://www.bluetooth.com/Pages/History-of-Bluetooth.aspx)

[Bluetooth.aspx](#)

- [101] Apple Inc. (2014) MFi licensing program. [Online]. HYPERLINK
"https://developer.apple.com/programs/mfi/"
<https://developer.apple.com/programs/mfi/>
- [102] Kevin Townsend, "Introduction to Bluetooth Low Energy," *Adafruit Learning System*, Abril 2014.
- [103] Apple Inc. (2013, Septiembre) About Core Bluetooth. [Online].
HYPERLINK
"https://developer.apple.com/library/ios/documentation/NetworkingInter
netWeb/Conceptual/CoreBluetooth_concepts/AboutCoreBluetooth/Introd
uction.html" \l "//apple_ref/doc/uid/TP40013257"
[https://developer.apple.com/library/ios/documentation/NetworkingInter
netWeb/Conceptual/CoreBluetooth_concepts/AboutCoreBluetooth/Introd
uction.html#/apple_ref/doc/uid/TP40013257](https://developer.apple.com/library/ios/documentation/NetworkingInter
netWeb/Conceptual/CoreBluetooth_concepts/AboutCoreBluetooth/Introd
uction.html#/apple_ref/doc/uid/TP40013257)
- [104] Google Inc. (2013) Bluetooth Low Energy. [Online]. HYPERLINK
"https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/bluetooth-
le.html"
[https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/bluetooth-
le.html](https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/bluetooth-
le.html)
- [105] Bluetooth SIG, Inc. (2015) Bluetooth Smart and Smart Ready products now
available . [Online]. HYPERLINK
"http://www.bluetooth.com/Pages/Bluetooth-Smart-Devices-List.aspx"
<http://www.bluetooth.com/Pages/Bluetooth-Smart-Devices-List.aspx>
- [106] Nordic Semiconductors. (2014) Nordicsemi.com. [Online]. HYPERLINK
"https://www.nordicsemi.com/eng/Products/Bluetooth-Smart-Bluetooth-
low-energy/nRF8001"
[https://www.nordicsemi.com/eng/Products/Bluetooth-Smart-Bluetooth-
low-energy/nRF8001](https://www.nordicsemi.com/eng/Products/Bluetooth-Smart-Bluetooth-
low-energy/nRF8001)

- [108] Nordic Semiconductor, "nRF8001 Product Specification ," 2013.
- [107] Adafruit Corporation. (2014) Bluefruit LE - Bluetooth Low Energy (BLE 4.0) - nRF8001 Breakout - v1.0. [Online]. HYPERLINK
"http://www.adafruit.com/products/1697"
<http://www.adafruit.com/products/1697>
- [109] Micro Crystal Switzerland, "DS – Series Watch Crystal 32.768 kHz," DS – Series Watch Crystal 32.768 kHz, 2010.
- [110] Atmel Corporation, "AVR055: Using a 32kHz XTAL for run-time calibration of the internal RC," 2008.
- [111] STMicroelectronics , "AN2867: Oscillator design guide for ST microcontrollers," 2009.
- [112] Texas Instruments, "Application Report: MSP430 32-kHz Crystal Oscillators," 2009.
- [113] Vishay Semiconductors, "Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection," Vishay Semiconductors, 2010.
- [114] pighixxx. (2014) ATmega2560 PIN OUT. [Online]. HYPERLINK
"pighixxx.com" pighixxx.com
- [115] Atmel Corporation, "ATmega2560/V," p. 442, 2012.
- [116] Ingeniería de Diseño, "Lineamientos y recomendaciones de diseño mecánico," Departamento de Diseño, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2014.
- [118] Geoffrey BOOTHROYD, *Product design for manufacture and assembly*. EUA: Marcel Dekker, Inc, 2002.
- [117] Canon Company. (2015, Enero) Canon EOS-1D Mark IV. [Online].
HYPERLINK
"http://www.canon.es/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos-1d_mark_iv/"

http://www.canon.es/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos-1d_mark_iv/

- [119] G. Boothroyd and Dekker, "Desing Rules for Machining," in *Product Desing for Manufacture and Assembly*. Nueva York, 1994.
- [120] P.G. Leaney and Gunter Wittenberg, *Desing For Assembling.*, 1992.
- [121] Robert Bogue, *Desing for manufacture and assambly: background, capabilitoes and and aplication.*, 2000.
- [122] Villacero S.A. de C.V. (2015) Catalogo: Solera. [Online]. HYPERLINK "http://www.villacero.com/images/pdf/esp/solera.pdf"
<http://www.villacero.com/images/pdf/esp/solera.pdf>
- [123] Starlino Electronics. (2010) www.starlino.com. [Online]. HYPERLINK "http://www.starlino.com/imu_guide.html"
http://www.starlino.com/imu_guide.html
- [124] Arduino. (2015) ATmega2560-Arduino Pin Mapping. [Online]. HYPERLINK "http://arduino.cc/en/Hacking/PinMapping2560"
<http://arduino.cc/en/Hacking/PinMapping2560>
- [125] Ho-Pyeong Lee and Yoo Inn-Eark , "Robust Control Design for a Two-axis Gimbaled Stabilization System," 2008.
- [126] Özgür Hastürk, Aydan M. Erkmen, and Ismet Erkmen, "Proxy-Based Sliding Mode Stabilization of a Two-Axis Gimbaled Platform".
- [128] Sigurd Skogestad, "Probably the best simple PID tuning rules in the world," Department of Chemical Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 2001.
- [127] WATLOW, *PRACTICAL PID GUIDE FOR PROCESS CONTROL*. EUA, 2005.
- [129] MATLAB. (2011) Introduction: PID Controller Design. [Online]. HYPERLINK "http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction&sec

tion=ControlPID"

<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>

- [130] Max Nisen. (2014, Noviembre) Quartz.com. [Online]. HYPERLINK
"http://qz.com/298635/these-programming-languages-will-earn-you-the-most-money/" <http://qz.com/298635/these-programming-languages-will-earn-you-the-most-money/#>
- [131] Eric Ries. theleanstartup.com. [Online]. HYPERLINK
"http://theleanstartup.com/principles"
<http://theleanstartup.com/principles>
- [132] Apple Inc. (2015) iOS Human Interface Guidelines. [Online]. HYPERLINK
"https://developer.apple.com/library/ios/documentation/UserExperience/Conceptual/MobileHIG/IconMatrix.html"
<https://developer.apple.com/library/ios/documentation/UserExperience/Conceptual/MobileHIG/IconMatrix.html>
- [133] Apple Inc. (2015) UITabBarController Class Reference. [Online].
HYPERLINK
"https://developer.apple.com/library/ios/documentation/UIKit/Reference/UITabBarController_Class/"
https://developer.apple.com/library/ios/documentation/UIKit/Reference/UITabBarController_Class/
- [134] Evercoder Software SRL. (2015) moqups.com. [Online]. HYPERLINK
"https://moqups.com" <https://moqups.com>
- [135] Apple Inc. (2015) Using Design Patterns. [Online]. HYPERLINK
"https://developer.apple.com/library/ios/referencelibrary/GettingStarted/RoadMapiOS/DesignPatterns.html"
<https://developer.apple.com/library/ios/referencelibrary/GettingStarted/RoadMapiOS/DesignPatterns.html>

- [136] Apple Inc. (2015) Model-View-Controller. [Online]. HYPERLINK
"https://developer.apple.com/library/mac/documentation/General/Conceptual/DevPedia-CocoaCore/MVC.html"
<https://developer.apple.com/library/mac/documentation/General/Conceptual/DevPedia-CocoaCore/MVC.html>
- [138] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design.*: Elsevier , 2005.
- [137] Thxou. (2014, Octubre) Patrón De Diseño MVC Al Detalle. [Online].
HYPERLINK "http://www.thxou.com/2011/11/04/programando-para-ios-patron-de-diseno-mvc/"
<http://www.thxou.com/2011/11/04/programando-para-ios-patron-de-diseno-mvc/>
- [139] Jorge Márquez. (2007, Abril) Usandolo.com. [Online]. HYPERLINK
"http://usandolo.com/principios-de-usabilidad-la-regla-de-los-3-clicks/"
<http://usandolo.com/principios-de-usabilidad-la-regla-de-los-3-clicks/>