

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO DE UN SISTEMA PARA EL DESPLAZAMIENTO, CONTROL Y
MONITOREO DE UNA CÁMARA DE TELEVISIÓN**

TUTOR ACADÉMICO: ING. JOSÉ ROMERO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Barillas M., Alejandro J.
para optar al Título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2017

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 05 de abril de 2017

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Alejandro J. Barillas M., titulado:

“DISEÑO PARA EL DESPLAZAMIENTO, CONTROL Y MONITOREO DE UNA CÁMARA DE TELEVISIÓN”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de electrónica, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Támara Pérez
Jurado

Prof. Alejandro González
Jurado

Prof. José Romero
Tutor académico

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mis familiares y amigos, que con su apoyo y palabras de aliento me dieron las fuerzas necesarias para seguir adelante y nunca rendirme, sin ellos esto no sería posible. Gracias totales.

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Gracias por la oportunidad brindada por el Sr. Jesús Rojas, el Sr. Alexander Rojas y el Ing. Alejandro Cropper de poder ser parte de la familia de la empresa Jealtel Producciones, al Ing. Luis Osorio, por aportarme conocimiento valioso tanto a nivel profesional como personal, a todos los empleados de Jealtel Producciones, al Prof. José Romero por apoyarme en todo momento durante este trabajo, al Prof. Servando Álvarez por sus buenos consejos y disposición.

Barillas M., Alejandro J.

DISEÑO PARA EL DESPLAZAMIENTO, CONTROL Y MONITOREO DE UNA
CÁMARA DE TELEVISIÓN.

Tutor académico: Ing. José Romero. Tesis. Caracas. U.C.V.. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Electrónica. Institución: Jealtel Producciones C.A.. Trabajo de grado. 2017. 218 hojas + anexos.

Palabras Claves: Cámara de televisión; *Dolly*; Cabezal; Paneo; *Tilt*; Foco; *Zoom*; Iris; motores *DC*; *CAN Bus*.

Resumen. El estudio surge de la necesidad de obtener tomas alternativas interesantes durante la transmisión en vivo de eventos. Se plantea un diseño tentativo para el desplazamiento de una plataforma de rodaje sobre un riel recto y que contiene una cámara de televisión. La cámara además debe realizar una serie de movimientos para seguir objetos en constante movimiento; adicionalmente, se diseña una alternativa para el control remoto del foco y del *zoom* del lente óptico. Los movimientos serán ejecutados por motores eléctricos que reaccionarán a los mandos proporcionados por un operador remotamente. Se realizó un estudio en el mercado y análisis comparativo de las posibles alternativas para seleccionar los elementos que se involucran en el funcionamiento del sistema. Para demostrar el correcto funcionamiento del sistema se utilizaron las herramientas *ISIS Proteus* y *MATLAB*, para el diseño de las placas de circuitos impresos se usó el programa *CADSOFT Eagle*. Se elaboró un manual el cual indicará los pasos a seguir para el montaje, desarme y solución de problemas. Finalmente, se indica un presupuesto estimado para tener una referencia del costo ante una posible implementación del diseño. Los resultados mostraron un control adecuado de cada una de las variables planteadas en el trabajo de grado, cumpliéndose con cada uno de los objetivos propuestos.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE GENERAL.....	v
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE FIGURAS	xiii
SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	xxi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
OBJETIVOS.....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos	5
MARCO TEÓRICO.....	6
CAPÍTULO II	27
2. Consideraciones de diseño	27
2.1. Descripción del sistema de posicionamiento de la cámara.....	27
2.2. Condiciones del entorno durante el funcionamiento del sistema	29
2.3. Variables a controlar y condiciones de operación	30
2.4. Características físicas del sistema de posicionamiento	31
2.4.1. Características físicas de la cámara de televisión	32
2.4.2. Selección del cabezal	33
2.4.3. Modo de desplazamiento de la plataforma de rodaje.....	36

2.4.4. Características de la columna.....	40
2.4.5. Características de la plataforma de rodaje	40
2.4.6. Selección del riel.....	41
CAPÍTULO III.....	43
3. <i>Dolly</i>	43
3.1.1. Dimensionamiento del motor.....	43
3.1.2. Estudio para la escogencia del tipo de motor eléctrico.....	52
3.1.3. Selección del motor.....	55
3.1.4. Selección del <i>driver</i>	56
3.1.5. Selección del tipo de sensor de monitoreo de corriente.....	59
3.1.6. Sensor de velocidad y de posicionamiento	61
3.2. Cabezal	62
3.2.1. Dimensionamiento del motor de paneo	62
3.2.2. Dimensionamiento del motor de inclinación (<i>tilt</i>).....	68
3.2.3. Selección del tipo de motor eléctrico.....	74
3.2.3.1. Selección del motor de paneo.....	77
3.2.3.2. Selección del motor de <i>tilt</i>	80
3.2.4. Selección del <i>driver</i> para los motores del cabezal	83
3.3. Foco	87
3.3.1. Selección del mecanismo de enfoque	88
3.4. Fuentes de alimentación de los motores del cabezal y del lente.....	93
3.5. Selección del sensor de voltaje.....	95
3.6. Selección de los sensores de proximidad de final de carrera.....	96
3.7. Comunicación a distancia	100

CAPÍTULO IV	107
4. <i>Dolly</i>	107
4.1. Driver KBMG – 212D	107
4.1.1. Modo de operación del <i>driver KBMG - 212D</i>	108
4.1.2. Configuración de los <i>jumpers</i> de la placa <i>KBMG – 212D</i>	108
4.1.3. Configuración de los potenciómetros de la placa <i>KBMG – 212D</i>	109
4.2. Diseño del <i>hardware</i> para controlar velocidad del <i>dolly</i>	110
4.2.1. Diseño del filtro pasabajas RC	111
4.2.2. Circuito y diseño de la placa	113
4.3. Estimación de la posición del <i>dolly</i> sobre el riel	113
4.4. Calibración inicial de posicionamiento del <i>dolly</i>	118
4.4.1. Lógica a usar para los finales de carrera del <i>dolly</i>	119
4.4.2. Modo de control de posición del <i>Dolly</i>	121
4.4.3. Diagramas de flujo para el control de la plataforma de rodaje	122
4.5. Cabezal	126
4.5.1. Explicación del desarrollo del pre - filtro discreto para establecer referencias con arranque suave de los motores del cabezal	127
4.5.2. Diseño del Controlador Proporcional – Integral	131
4.5.2.1. Algoritmo de anti – saturación del efecto integral del controlador	133
4.5.3. Filtro “pi” para los motores del cabezal	136
4.5.4. Lógica a usar para los finales de carrera de los movimientos del cabezal	137
4.5.5. Modo del control de posición del paneo y <i>tilt</i> de la cámara	140
4.5.6. Diagramas de flujo para el control de los motores del cabezal	141
4.6. Foco	145
4.6.1. Control de la variable foco	145
4.6.2. Diagramas de flujo para el control del enfoque del lente	147
4.7. <i>Zoom</i>	151
4.7.1. Determinación del control de la variable <i>zoom</i>	151

4.7.2. Control de posición del anillo de <i>zoom</i>	153
4.7.3. Diagrama de flujo para posicionamiento del anillo de <i>zoom</i>	154
4.8. Mando de control	155
4.8.1. Descripción del mando de control	155
4.8.2. Estimación de costos de algunos elementos del mando de control ..	158
4.9. Elección de los controladores involucrados en el sistema.....	159
4.10. Diagrama esquemático para el control del equipo.....	168
4.11. Estimación del presupuesto de los elementos seleccionados	172
CAPÍTULO V	174
5. Presentación de las simulaciones	174
5.1. Simulación de control motor <i>dolly</i>	174
5.1.1. Control de velocidad del motor <i>dolly</i>	176
5.1.2. Limitador de velocidad del motor <i>dolly</i>	179
5.1.3. Caso de exceso de corriente en el motor del <i>dolly</i>	180
5.1.4. Casos de activación de finales de carrera	182
5.1.5. Mostrar medición de la posición del <i>dolly</i>	184
5.2. Cabezal	185
5.2.1. Análisis del comportamiento de los motores del cabezal	185
5.2.1.1. Simulaciones motor de paneo	186
5.2.1.2. Simulaciones motor <i>tilt</i>	189
5.2.2. Simulación del voltaje de entrada de los motores del cabezal	193
5.3. Foco	196
5.3.1. Simulación de calibración del servo motor de enfoque	197
5.4. <i>Zoom</i>	201
5.4.1. Simulación de control de <i>zoom</i>	202

CONCLUSIONES	204
RECOMENDACIONES	207
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	208
BIBLIOGRAFÍA	219
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Masa total a soportar por el cabezal.....	33
Tabla 2. Estudio de las posibilidades para el escoger el mecanismo de movimiento del dolly	39
Tabla 3. Masa del equipo	41
Tabla 4. Características de los rieles de cada proveedor.....	42
Tabla 5. Datos a considerar para el dimensionamiento del motor [41]	44
Tabla 6. Características de los distintos motores disponibles en el mercado [45] - [46] - [47] - [48].....	53
Tabla 7. Características del motor seleccionado para accionar el <i>dolly</i> [49]	56
Tabla 8. Características del <i>driver</i> seleccionado [50] - [51]	58
Tabla 9. Características de los métodos de medición de la corriente de carga en un motor [52]	60
Tabla 10. Características físicas y eléctricas del sensor seleccionado [53]	61
Tabla 11. Características del encoder incremental seleccionado [54]	62
Tabla 12. Características de los tipos de motores tomados en consideración para el cabezal [45] - [47] - [46].....	75
Tabla 13. Características de la caja reductora para el motor del paneo [60]	78
Tabla 14. Especificaciones del motor seleccionado para el paneo de la cámara [62]	79
Tabla 15. Especificaciones del motor seleccionado para el tilt de la cámara [58].....	82
Tabla 16. Características del encoder incremental para los motores del cabezal [64]	82

Tabla 17. Datos relevantes de los drivers a ser comparados [65] - [66] - [67] - [68] - [69]	84
Tabla 18. Modo de control del driver seleccionado [68]	86
Tabla 19. Características de las opciones a considerar para el control del foco [71] - [72]	90
Tabla 20. Características del servomotor usado en el control del anillo de enfoque [75]	92
Tabla 21. Especificaciones de la fuente de poder para los motores del cabezal [76] .	93
Tabla 22. Fuente de alimentación para el servomotor del enfoque [77]	94
Tabla 23. Características del sensor de voltaje [78]	95
Tabla 24. Comparación entre los diferentes sensores de proximidad disponibles en el mercado. [80] - [81] - [82] - [83]	98
Tabla 25. Sensor magnético [84]	97
Tabla 26. Características del imán para los finales de carrera de la plataforma de rodaje [85]	99
Tabla 27. Características de cada uno de los estándares y protocolos [87] - [94] [95] - [96] - [97] - [98] - [99]	103
Tabla 28. Análisis comparativo de las alternativas de comunicación a distancia.....	104
Tabla 29. Análisis comparativo de las alternativas de comunicación a distancia.....	105
Tabla 30. Información acerca del transceptor CAN [100]	106
Tabla 31. Desarrollo del conteo de transiciones dependiendo del estado presente y el estado previo (INC = +1, DEC = -1, X = 0)	115
Tabla 32. Lógica de operación de los sensores de final de carrera del dolly	120
Tabla 33. Lógica de operación de final de carrera del paneo de la cámara	138
Tabla 34. Lógica de operación final de carrera del tilt de la cámara	139

Tabla 35. Costo de algunos elementos que formarán parte del diseño del mando de control	159
Tabla 36. Tabla comparativa entre los microcontroladores y los modelos Arduino.	161
Tabla 37. Requerimientos de los controladores implicados en el diseño.	164
Tabla 38. Costo estimado de los elementos principales que formarán parte del equipo	172
Tabla 39. Costo estimado de los elementos principales que formarán parte del equipo	173
Tabla 40. Datos a considerar para las simulaciones de control de los motores	186

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos del lente de la cámara. [4].....	8
Figura 2. Sensor de imagen (CCD) [6]	9
Figura 3. Punto focal del lente [8].....	9
Figura 4. Longitud focal de un lente [7]	10
Figura 5. Variación del f stop mientras disminuye la apertura del diafragma [11]	11
Figura 6. Nomenclatura para indicar la relación del <i>zoom</i> de un lente	12
Figura 7. Focus outlet marca Canon [12].....	12
Figura 8. Cable triaxial [16].....	14
Figura 9. Ejemplo de un cable de fibra y sus elementos [18]	15
Figura 10. Panel de Control Remoto. [21]	16
Figura 11. Descripción del movimiento de "paneo". [22]	18
Figura 12. Descripción del movimiento de "tilt" [22].....	18
Figura 13. Ejemplos de dollies. [23] - [24]	19
Figura 14. Conjunto cabezal - cámara [25].....	20
Figura 15. Plancha de la cámara [26].....	20
Figura 16. Columna de elevación de la cámara [27].....	21
Figura 17. Elementos de una cámara de estudio [28]	22
Figura 18. Ejemplo de conexión entre maestro y esclavos para la comunicación SPI. [29]	23
Figura 19. Señal de modulación por ancho de pulso. [34].....	26
Figura 20. Configuración puente H [35].....	26

Figura 21. Conjunto dolly, columna, cabezal y cámara sobre un riel recto.....	28
Figura 22. Ejemplo de cabezales robóticos [25]- [36]	34
Figura 23. Tipos de cabezales disponibles en la empresa [37]	35
Figura 24. Foto del cabezal seleccionado (cabezal de la grúa).....	35
Figura 25. Mecanismo propuesto por la compañía Ross Video [38].....	36
Figura 26. Mecanismo propuesto por la compañía M.R.M.C. [39].....	37
Figura 27. Mecanismo propuesto por la compañía Egripment [40].....	38
Figura 28. Dolly, columna y caja electrónica instalada	41
Figura 29. Riel seleccionado [40] - [42]	42
Figura 30. Sistema de poleas - motor para mover el dolly [41].....	44
Figura 31. Reductor de velocidad para mover la plataforma de rodaje [43].....	45
Figura 32. Régimen de funcionamiento del motor dolly	50
Figura 33. Motor seleccionado para mover la plataforma de rodaje [49].....	56
Figura 34. <i>Driver</i> seleccionado para el accionamiento del <i>dolly</i> [50]	57
Figura 35. Sensor de corriente modelo ACS712 [53].....	61
Figura 36. Aplicación de una fuerza motora para el paneo de la cámara	64
Figura 37. Carga inercial equivalente para estimar la inercia durante el paneo de la cámara [56].....	66
Figura 38. Movimiento de inclinación de la cámara (tilt).....	68
Figura 39. Sistema reductor de velocidad para el movimiento de inclinación de la cámara	69
Figura 40. Modelo inercial equivalente para el movimiento de tilt de la cámara [58].....	70
Figura 41. Diagrama de cuerpo libre equivalente durante el tilt de la cámara [59]....	72
Figura 42. DF Robot DC Motor driver 2x15A lite [68].....	85

Figura 43. Mecanismo para el manejo del anillo de enfoque a distancia. [70].....	87
Figura 44. Focus outlet marca Fujinon (izquierda), marca Canon (derecha).....	87
Figura 45. Alternativas para el mecanismo de enfoque. RFC – 144 (izquierda), ZR3000F (derecha) [71] [72].....	91
Figura 46. Pieza mecánica que permite acoplar el servo al anillo del lente. [73].....	91
Figura 47. Mecanismo ajustado al lente de la cámara (control de foco e iris). [74]...	92
Figura 48. Fuente de poder seleccionada para alimentar los motores del cabezal [76]	93
Figura 49. Fuente de alimentación de los motores del lente de la cámara [77]	95
Figura 50. Sensor de voltaje [79]	96
Figura 51. Sensor magnético seleccionado [84]	97
Figura 52. Imán para detectar el final de carrera de los movimientos del dolly y la cámara [85].....	99
Figura 53. Capa física y de enlace de las comunicaciones CAN Bus y Ethernet incluida dentro de la arquitectura del microcontrolador [86] - [87].....	101
Figura 54. Módulos de comunicación EIA – 485, CAN Bus y Ethernet [88] - [89] - [90]	101
Figura 55. Módulos de comunicación Ethernet, CAN Bus y EIA – 485 compatibles con el diseño físico de algunos modelos de Arduino [91] - [92] - [93]	102
Figura 56. Módulo de comunicación CAN [100]	106
Figura 57. Configuración del <i>driver KBMG 212-D</i> para controlar la velocidad del motor con una fuente externa [101]	108
Figura 58. Bosquejo para obtener los niveles de tensión exigidos por el	111
Figura 59. Filtro “ <i>Butterworth</i> ” pasabajo RC de 1er. Orden.	111

Figura 60. Diagrama circuital para obtener los niveles de tensión necesarios para controlar la velocidad del motor del dolly	113
Figura 61. Señales del encoder incremental en cuadratura. [102]	114
Figura 62. Rutina de detección de transiciones de ambos canales del encoder	117
Figura 63. Cálculo de la velocidad y posición del dolly	118
Figura 64. Posicionamiento de los sensores de final de carrera del dolly.....	119
Figura 65. Diagrama de bloque para el control de velocidad del motor y posición del dolly	122
Figura 66. Diagrama para detección de final de carrera (sensor1)	123
Figura 67. Diagrama para detección de final de carrera (sensor2)	123
Figura 68. Diagrama para el monitoreo de la corriente del motor dolly.....	124
Figura 69. Rutina de control de velocidad del motor dolly.....	125
Figura 70. Configuración de parámetros y llamado de rutinas al programa principal	126
Figura 71. Esquema de simulación del sistema discreto.....	129
Figura 72. Suavidad de la señal de control. Tiempo de establecimiento: 1s (izq), 2s (der).....	131
Figura 73. Diagrama de bloques del controlador PI digital	133
Figura 74. Solución para la saturación del efecto integral	135
Figura 75. Desarrollo de la ecuación en diferencias del controlador PI + algoritmo de anti – saturación de la parte integral del controlador	136
Figura 76. Filtro "pi" pasa - bajo.....	136
Figura 77. Sensores de final de carrera del paneo de la cámara	138
Figura 78. Sensores de final de carrera del tilt de la cámara.....	139

Figura 79. Diagrama de bloques para el control de velocidad y posicionamiento de la cámara	141
Figura 80. Diagrama de flujo para la discriminación de detección de final de carrera de los motores del cabezal.....	142
Figura 81. Rutina complementaria para la detección de final de carrera de los motores del cabezal.....	143
Figura 82. Diagrama de int. por timer para el desarrollo de la señal de control de ambos motores	143
Figura 83. Diagrama de flujo para detección por exceso de carga de motores del cabezal.....	144
Figura 84. Diagrama para el control de velocidad de los motores del cabezal	144
Figura 85. Diagrama de configuración y llamada de rutinas para el monitoreo y control de los motores del cabezal	145
Figura 86. Diagrama de bloques para el control del anillo de enfoque.....	146
Figura 87. Diagrama de muestra de mensaje de calibración del mecanismo.....	148
Figura 88. Calibración del servo	148
Figura 89. Diagrama para el control de posición del servo.....	149
Figura 90. Configuración de parámetros y mostrar mensaje de realizada calibración	150
Figura 91. Mando de zoom con conector de 8 pines. [103].....	152
Figura 92. Diagrama de bloques para el control de posición del zoom	153
Figura 93. Diagrama de flujo para controlar el zoom del lente	154
Figura 94. Mando de control.....	157
Figura 95. Parte posterior del mando de control	157

Figura 96. Circuito anti - rebotes al momento de presionar el pulsador. Dimensiones de la placa: 32,9 x 37 mm	158
Figura 97. Bosquejo del diagrama circuital del sistema de control	163
Figura 98. Diagrama de araña para seleccionar el controlador del mando de control [104] - [105] - [106]	165
Figura 99. Diagrama de araña para seleccionar el controlador del cabezal y del lente [104] - [105] - [106]	166
Figura 100. Diagrama de araña para seleccionar el controlador del motor del dolly [104] - [105] - [106]	167
Figura 101. Diagrama esquemático del sistema a controlar y los elementos que lo conforman	171
Figura 102. Circuito de prueba para mostrar funcionamiento de control de motor dolly	175
Figura 103. Máxima tensión entregada al driver para que el motor gire en un sentido a su máxima velocidad. Change dir = 0.....	176
Figura 104. Máxima tensión entregada al driver para que el motor gire en sentido contrario a su máxima velocidad. Change dir = 0.....	177
Figura 105. Máxima tensión entregada al driver para que el motor gire en un sentido a su máxima velocidad. Change dir = 1.....	178
Figura 106. Máxima tensión entregada al driver para que el motor gire en sentido contrario a su máxima velocidad. Change dir = 1.....	178
Figura 107. Velocidad limitada en un 50%. Motor gira en un sentido, “cw” = ON, “change dir” = 0	179
Figura 108. Velocidad limitada en un 50%. Motor gira en sentido contrario, “ccw” = ON, “change dir” = 0	180

Figura 109. Exceso de corriente para cuando motor gira en un sentido. Sistema detiene el giro del motor, emergency led = ON	181
Figura 110. Exceso de corriente para cuando motor gira en sentido contrario. Sistema detiene el giro del motor, emergency led = ON	181
Figura 111. Activación sensor 1, detención del motor, sistema sólo permite movimiento en sentido contrario hasta alejarse del final de carrera	182
Figura 112. Activación sensor 2, detención del motor, sistema sólo permite movimiento en sentido contrario hasta que se aleje lo suficiente del final de carrera	183
Figura 113. Estimación de la posición del dolly cuando el motor gira en un sentido y luego invierte su sentido de giro	184
Figura 114. Alimentación del motor paneo, velocidad y recorrido realizado.....	187
Figura 115. Oscilación presentada durante el frenado de final de carrera	188
Figura 116. Corriente y torque del motor paneo	189
Figura 117. Tensión de entrada del motor, posición de inclinación de la cámara	190
Figura 118. Tensión de entrada del motor, posición de inclinación de la cámara con el controlador PI.....	190
Figura 119. Señal de referencia, de velocidad y recorrido del movimiento	192
Figura 120. Corriente y torque del motor tilt	193
Figura 121. Circuito de prueba para desarrollo del filtro discreto	194
Figura 122. Desarrollo de la tensión de los motores del cabezal para $a = 1$, $b = 2$ (izq) y $a = 10$, $b = 20$ (der).....	195
Figura 123. Circuito de prueba para mostrar funcionamiento del servo de enfoque	196
Figura 124. Paso previo al uso del mecanismo de enfoque. Ajuste de rango de movimiento	198

Figura 125. Presionado botón de calibración. Mensaje y ajuste automático del rango de operación	199
Figura 126. Casos para el cual el servo llega a su tope de movimiento.....	200
Figura 127. Circuito de prueba de funcionamiento para el control de zoom.....	201
Figura 128. Caso para obtener una imagen alejada.....	202
Figura 129. Caso para obtener la imagen con un 50% de acercamiento.....	203
Figura 130. Caso para obtener la imagen con acercamiento máximo.....	203

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AC: Altern Current (Corriente Alterna)

AMP: Arbitration on Message Priority (Arbitraje de Prioridad de los Mensajes)

BNC: Bayonet Neill-Concelman (Bayoneta Neill-Concelman)

CAN: Controller Area Network (Control de Área de Red)

CCD: Charge Coupled Device (Dispositivo de Carga Acoplada)

CCU: Camera Control Unit (Unidad de Control de la Cámara)

CD: Collision Detection (Detección de Colisión)

CS: Chip Select (Selección de Chip)

CSMA: Carrier Sense Multiple Access (Acceso Múltiple con Escucha de Portadora)

DC: Direct Current (Corriente Directa)

EFP: Electronic Field Production (Producción Electrónica de Exteriores)

EIA: Electronic Industries Alliance (Alianza de Industrias Electrónicas)

ENG: *Electronic News Gathering* (Captación Electrónica de Noticias)

HD: *High Definition* (Alta Definición)

I2C: *Inter-Integrated Circuit* (Circuito Interintegrado)

ISIS: *Intelligent Schematic Input System* (Sistema de Enrutado de Esquemas Inteligente)

ISO: *International Organization for Standardization* (Organización Internacional de Normalización)

LAN: *Local Area Network* (Red de Área Local)

LCD: *Liquid Crystal Display* (Pantalla de Cristal Líquido)

LED: *Light - Emitting Diode* (Diodo Emisor de Luz)

MISO: *Master In - Slave Out* (Salida de datos del Slave y entrada al Master)

MOSFET: *Metal - Oxide - Semiconductor Field - Effect Transistor* (Transistor de Efecto de Campo Metal-Óxido Semiconductor)

MOSI: *Master Out - Slave In* (Salida de datos del Master y Entrada de datos al Slave)

M.R.M.C.: *Mark Roberts Motion Control*

OSI: *Open System Interconnection* (Interconexión de Sistemas Abiertos)

PI: Proporcional – Integral

PWM: *Modulación por Ancho de Pulso* (Pulse Width Modulation)

RCP: *Remote Control Panel* (Panel de Control Remoto)

RS: *Recommended Standard* (Estandar Recomendado)

SCLK: *Signal Clock* (Señal de Reloj)

SPI: *Serial Peripheral Interface* (Interfaz Serial de Periféricos)

SS: *Slave Select* (Selección de Esclavo)

TTL: *Transistor - Transistor Logic* (Lógica Transistor - Transistor)

UART: *Universal Asynchronous Receiver - Transmitter* (Transmisor - Receptor Asíncrono Universal)

UPS: *Uninterruptible Power Supply* (Sistema de Alimentación Ininterrumpida)

UTP: *Unshielded Twisted Pair* (Par Trenzado Sin Blindar)

INTRODUCCIÓN

Previo a la elaboración de este trabajo de grado, Jealtel Producciones realizó un estudio de las exigencias y necesidades del cliente, motivo por el cual se planteó el diseño de un sistema capaz de proporcionar tomas llamativas y de calidad durante alguna grabación o transmisión en vivo, con la intención además de otorgar una mayor versatilidad y facilidad en la operación del equipo desde un lugar alejado.

Este trabajo tiene como finalidad de proponer un diseño para desplazar, controlar y monitorear los movimientos de una cámara de televisión sobre un riel recto.

El primer capítulo mostrará el planteamiento del problema, expondrá el objetivo general, desglosando los objetivos específicos para cumplir con el objetivo principal del trabajo de grado y se presentará el marco teórico, donde se definirán elementos y términos que el lector debe saber para la comprensión del texto.

El tercer y cuarto capítulo define aspectos como lugares y condiciones de entorno durante la manipulación de la unidad, recopilación de información de los requerimientos de diseño y de operación, así como las variables a controlar en el equipo. Posteriormente se realiza un estudio para seleccionar los elementos de accionamiento, comunicación, monitoreo y del sistema. Se presenta además la elaboración de esquemas y diagramas para explicar la lógica de programación para el control del diseño planteado.

El quinto capítulo muestra los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas para el control de cada una de las variables, estas pruebas son ejecutadas a través de los programas de simulación y de cálculos matemáticos *ISIS Proteus* y *Simulink*, luego, se analizan y discuten los resultados obtenidos.

Por último, se presentan las conclusiones y los aportes más significativos del trabajo de grado, de manera que la empresa tenga documentado todo lo necesario para una futura implementación del sistema.

CAPÍTULO I

Presentación del planteamiento del problema, los objetivos a alcanzar y el marco teórico

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa Jealtel Producciones se dedica básicamente a proporcionar el equipamiento necesario para la cobertura de eventos desde el punto de vista audiovisual.

Las exigencias del cliente por querer vivir una experiencia plena de algún acontecimiento importante, ya sea un noticiero, eventos multitudinarios o filmes cinematográficos, obligan a las empresas a realizar grandes inversiones para proporcionar un servicio de calidad, sin embargo, la situación país ha limitado la posibilidad de adquirir estos servicios debido a que son muy costosos. Por tal motivo, la empresa ha tomado la iniciativa de realizar proyectos para el desarrollo de equipos tecnológicos relacionados con el área para abaratar los costos de inversión. En este sentido se planteó el diseño de un sistema de control capaz de proporcionar tomas llamativas y de calidad durante alguna grabación o transmisión en vivo, con la intención además de otorgar una mayor versatilidad y facilidad en la operación de una cámara de televisión desde un lugar remoto.

La propuesta de diseño del equipo tendrá la finalidad de proporcionar efectos atractivos en las tomas de la acción gracias a la versatilidad de movimientos de la cámara, se podrán obtener otras perspectivas y alternativas a nuevos ángulos del evento, otorgando imágenes inéditas que resultarán atractivas para el cliente y, por lo tanto, mejorando la calidad del espectáculo. Un equipo capaz de otorgar todos estos beneficios colocará a la empresa en una posición favorable ya que contará con el elemento diferenciador sobre la competencia en su entorno laboral.

Durante el desarrollo del trabajo de grado se realizarán análisis para determinar cuáles elementos son los más adecuados para ser integrados en el diseño, así como la estimación de costos de tales elementos. Se elaborará un diseño en el cual cada uno de los procesos que conforman el sistema se comporte de la manera deseada y su comprobación se obtendrá a través de pruebas de concepto realizadas en programas de simulación y de cálculos matemáticos.

El proyecto presentará una alternativa de diseño que logre solucionar el problema. Si la empresa considera que la propuesta es viable, podrán comprobar el funcionamiento del equipo a través de la implementación con ayuda de la información suministrada en el trabajo.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar un sistema para el desplazamiento, control y monitoreo de una cámara de televisión.

Objetivos Específicos

1. Definir las condiciones de diseño y operación del equipo.
2. Seleccionar una estructura que permita el movimiento del carro.
3. Diseñar el control de velocidad y de posición del carro.
4. Seleccionar el cabezal adecuado para el control del movimiento vertical y horizontal de la cámara.
5. Diseñar el actuador que posibilite el movimiento del lente de la cámara.
6. Diseñar el control de mando de movimiento del equipo.
7. Elaborar un manual que indique el montaje, manejo y reparación del equipo.

MARCO TEÓRICO

Cámara de televisión: Es un equipo que se encarga de convertir las imágenes que capta en señales eléctricas (señal de video). Existen varios tipos de cámaras, como las cámaras de estudio, que se caracterizan por poseer una gran calidad de imagen, esta exigencia hace que este tipo de equipos sean voluminosos, pesados, y por lo tanto, nada portátiles. En la actualidad también se pueden encontrar lentes de gran tamaño para exteriores, como por ejemplo, para cubrir eventos deportivos. Las cámaras tipo *ENG (Electronic News Gathering)* o “*camcorders*”, tienen la particularidad de ser más ligeras y de poseer un sistema de grabación autónomo; por lo general son usadas en la cobertura de noticias. Las cámaras tipo *EFP (Electronic Field Production)* tienen la característica de estar conectadas a la Unidad de Control de Cámara (*CCU*) mediante un cable, esto facilita la integración de la cámara a una red de estudio de televisión u evento en vivo, también permite la configuración de la misma por los responsables técnicos desde el cuarto de operación. De igual forma, pueden ser clasificadas de acuerdo a su tecnología, existen cámaras analógicas y digitales, aunque hoy en día predominan estas últimas debido a las mejoras en la calidad de la imagen. Las cámaras en general están constituidas por dos partes básicas: el cuerpo de la cámara y el lente de la cámara. [1] - [2]

Cuerpo de la cámara: Denominado “*Camera Head*” o simplemente “*Head*”, es el lugar donde reside la etapa electrónica encargada de la captación y conversión de las imágenes en señales de video. Allí se ubican el prisma y los sensores de imagen (*CCD*), además del sistema eléctrico de procesamiento de video, el sistema de codificación, los moduladores y demoduladores de señales, etc. En la parte exterior del cuerpo, se dispone de varios botones, interruptores e indicadores de eventos que son importantes para la manipulación del equipo y para la comunicación entre el camarógrafo y el director de cámara. Sobre el cuerpo se puede instalar lo que

se denomina “*Viewfinder* o visor”, dicho elemento es una pequeña pantalla donde el camarógrafo puede observar lo que está captando, así como las imágenes capturadas por otras cámaras sí estas pertenecen al sistema de multi – cámaras, muy comunes en estudios de televisión y en eventos de radiodifusión al aire libre. Actualmente una cámara de video puede ser conectada a la unidad de control de la misma por medio de un cable, el cual puede ser de dos tipos; de tipo triaxial ó de fibra óptica (anteriormente existían los cables “*multi – pin*” o “*multi - core*” que eran usados en cámaras analógicas). Cabe destacar que dependiendo del tipo de cámara que se utilice esta etapa de conexión puede venir o no incorporada al cuerpo de la misma. En el caso que no venga incorporada, se hace uso de un adaptador para la conexión de la cámara a la unidad de control. Otros modelos de cámaras, como las *camcorders*, incluyen un adaptador para la instalación de una fuente portátil cuya finalidad es alimentar la parte electrónica de la cámara en caso de no ser alimentada a través del adaptador de cable de cámara [3].

Lente de la cámara: Se refiere a la parte óptica de la cámara y tiene la función de captar la imagen. Está constituido internamente por varios grupos de lentes que se encargan de ajustar el enfoque y el tamaño de la imagen de la toma realizada. En la parte exterior del lente se cuenta principalmente con tres anillos; el anillo de enfoque, que tiene la finalidad de proporcionar nitidez a la imagen, el anillo de *zoom*, que permite un acercamiento óptico de la imagen sin la necesidad de desplazar la cámara, y el anillo de iris cuyo propósito es determinar la entrada de luz del lente. En la Figura 1, se señalan las partes más relevantes para la manipulación del lente de la cámara.



Figura 1. Elementos del lente de la cámara. [4]

Sensor de imagen (CCD – Charge Coupled Device): Es un transductor que convierte la luz incidente en su superficie en una señal eléctrica analógica. Está constituido por diminutos elementos de imagen discretos (píxeles), tal que cada punto de la escena genera cargas eléctricas proporcionales a un estímulo único, que corresponde al grado de luminosidad en ese punto de escena. El formato de la imagen está definido por el tamaño del sensor de imagen. Para cámaras de alta definición (*HD*), el formato de imagen es de $2/3''$, esta medida se refiere a la longitud de la diagonal del *CCD* [5]. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de sensor de imagen.

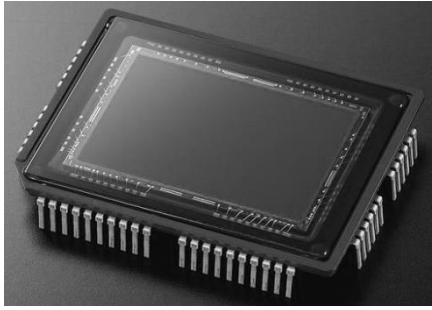


Figura 2. Sensor de imagen (CCD) [6]

Foco: Se define como la convergencia en un punto del eje óptico de los rayos paralelos que inciden sobre una lente convexa. A esto se le denomina “punto focal de la lente”. [7] (Ver Figura 3).

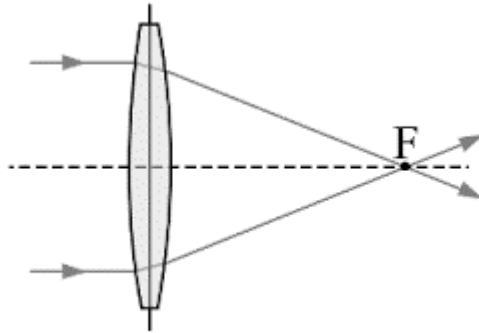


Figura 3. Punto focal del lente [8]

Generalmente, se puede operar el anillo de foco manualmente o por medio de un “*focus outlet*”.

Objetivo Zoom: Un objetivo *zoom* es aquel en que se puede cambiar continuamente su longitud focal sin que se pierda el enfoque. Con esto se puede

modificar el tamaño de la imagen del objeto. Evidentemente, al cambiar el tamaño de la imagen, la posición donde se forma la misma también lo hace (punto focal), de manera que se debe ajustar el enfoque cada vez que esto ocurre. Por tal motivo, los objetivos zoom poseen un mecanismo el cual permite mover simultáneamente dos grupos de lentes denominados grupo variador (modifica el tamaño de la imagen) y grupo compensador (mantiene la imagen enfocada). [9]

Longitud focal: Se define como la longitud comprendida entre el sensor de imagen o *CCD* y el centro óptico del lente. Esta variable es usada para el cálculo de la posición de la imagen, el ángulo de visión, la profundidad de campo y la magnificación de un lente. [9] La Figura 4 refleja el concepto explicado:

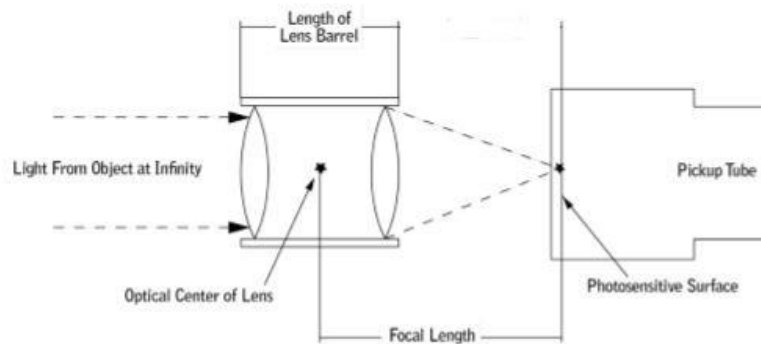


Figura 4. Longitud focal de un lente [7]

Iris del lente de la cámara: Es el anillo que regula la cantidad de luz que permite dejar pasar el lente hacia el sensor de imagen. El control del paso de luz es posible gracias a la apertura y cierre de un diafragma dentro del lente. La variación de este diafragma es expresado por el número F o “*F stop*”, entre más pequeño es este número, más luminosa es la imagen [10]. Generalmente, el fabricante coloca sobre el anillo de iris el número F y se puede apreciar que el número se incrementa en un

factor de $\sqrt{2}$. Cada vez que se aumenta el número F en un factor de $\sqrt{2}$, se reduce el diámetro del diafragma a la mitad del F *stop* anterior, lo que quiere decir que dejará pasar únicamente la mitad de la cantidad de luz que en el caso anterior [9] (Ver Figura 5).

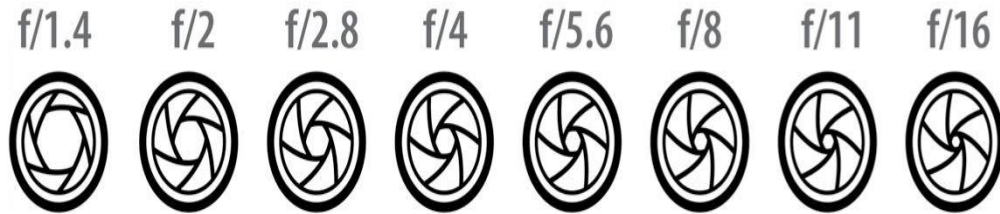


Figura 5. Variación del f *stop* mientras disminuye la apertura del diafragma [11]

Servo – zoom: Mecanismo ajustado a las ranuras del lente de la cámara cuya función es manipular los anillos de *zoom* e iris por medio de un par de motores, permitiendo el control remoto de estas variables (ver Figura 1).

Zoom Ratio (Relación del zoom): Es la relación que existe entre la máxima longitud y mínima longitud focal del lente. Por lo general, esta relación viene indicada en el servo – *zoom* del lente con una nomenclatura conformada por un número seguido de la letra “x”, también es indicada en el cuerpo del lente junto con el rango de operación de la longitud focal, tal y como lo muestra la Figura 6.



Figura 6. Nomenclatura para indicar la relación del *zoom* de un lente

Focus Outlet: Mecanismo que se ajusta sobre una ranura del lente y que tiene la finalidad de modificar la posición del anillo de enfoque por medio de un engranaje. El engranaje se mueve gracias a la acción de una guaya que se encuentra conectada mecánicamente al elemento que usa el operador de cámara para realizar ajustes de foco (Ver Figura 7).



Figura 7. *Focus outlet* marca Canon [12]

Cable coaxial: Es un cable conformado por un núcleo de cobre, un dieléctrico y una malla conductora concéntrica, seguidamente de una cubierta protectora que otorga inmunidad a interferencias externas. Son ampliamente usados para la distribución de señales de video. El más común para llevar a cabo las transmisiones en vivo es el *RG-59*, con conector *BNC* y de 75 ohmios de impedancia.

Cable triaxial: Un cable de estructura similar al coaxial pero con la adición de un aislante y de una segunda malla conductora (ver Figura 8). Tiene la finalidad de conectar la cámara con su respectiva unidad de control de cámara. El sistema de transmisión depende del estándar usado por el fabricante de la cámara de televisión, puede ser un sistema de transmisión analógica o digital. En el caso de la transmisión analógica, se usa la técnica de multiplexión por división de frecuencia para evitar interferencias entre las diferentes señales involucradas, estas pueden ser señales de audio y video provenientes de la cámara, así como señales de control, de intercomunicación, de retorno de audio y video, de señalamiento de cámara al aire y de alimentación para la cámara procedentes de la *CCU*. Es un tipo de cable ampliamente usado en la cobertura de conciertos o eventos deportivos debido a que permite la transmisión de señales a grandes distancias y son fáciles de reparar. Sin embargo, con la aparición de la televisión de alta definición, las exigencias en la calidad de imagen obligaron a los fabricantes a transmitir a velocidades superiores (actualmente hasta 3 Gb/s) y aumentar el ancho de banda del medio (superior a los 750 MHz), por lo que se empleó la tecnología de transmisión de datos por fibra óptica ya que permite cumplir con estas características de transmisión. Posteriormente, se pudo aumentar el ancho de banda de los cables triaxiales para la transmisión en alta definición pero con la limitante de una reducción notable en la longitud del cable.

[13] - [14] - [15]

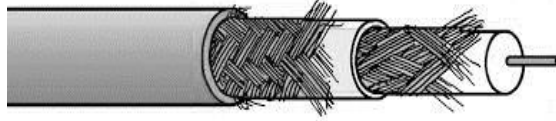
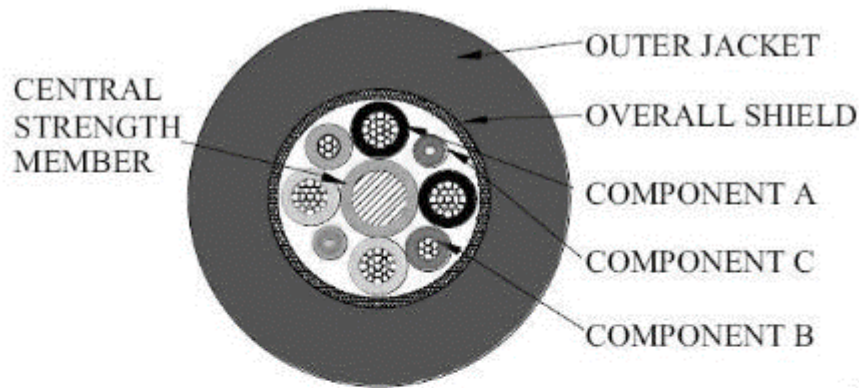


Figura 8. Cable triaxial [16]

Cable de fibra óptica: Consiste en un cable que cuenta con una chaqueta protectora de material plástico, internamente posee un recubrimiento o malla metálica, seguidamente se tienen ocho cables de los cuales cuatro son usados para la alimentación de la cámara otorgada por la unidad de control de cámara (CCU), dos para la transmisión de datos de comunicación y el par de cables restante se caracteriza por ser de tipo fibra monomodo, donde la señal de video se propaga por el medio a través de pulsos de luz. Proporcionan un mayor ancho de banda, ideal para señales de video de alta definición, cubren mayores distancias en comparación con el cable triaxial. Permiten enviar señales de control, video, audio y alimentación. Son cables de elevado costo y requieren de un equipo sofisticado para su reparación. [17] (Ver Figura 9).



- 1. Component A (4 Power Conductors)**
 Conductor: AWG 20 (19x32) Tinned copper.
 Insulation: HDPE
 Nominal diameter: 1.57 mm
 Colours: Black, White, Black/White and White/Black

- 2. Component B (2 Signal Conductors)**
 Conductor: AWG 24 (7x32) Tinned copper.
 Insulation: HDPE
 Nominal diameter: 1.22 mm
 Colours: Red and Grey

- 3. Component C (2 Tight buffered fibres)**
 Fiber: Single mode (9/125 – ITU G.657A).
 Insulation: Thermoplastic
 Diameter: 0.9 ± 0.1 mm.
 Colours: Blue and Yellow

Figura 9. Ejemplo de un cable de fibra y sus elementos [18]

Unidad de Control de Cámara (CCU – Camera Control Unit): Es el punto de enlace entre el sistema de la cámara y un sistema de televisión general, como puede ser, un estudio. Esta unidad cuenta con diversas salidas las cuales poseen las señales de video obtenidas por la cámara según la tipología requerida, así mismo posee las salidas de audio de la misma y las entradas para la comunicación. La unidad permite controlar las funciones de la cámara, codificar y monitorear las señales, en distintos formatos, según se requiera. La unidad de control debe conectarse a una fuente de corriente alterna (AC), necesaria, no solo para la operación de la unidad de control propiamente, sino también, para el funcionamiento de la cabeza de cámara (HEAD), con la potencia enviada, vía cable de fibra o triaxial. La unidad de control de cámara posee salidas de monitoreo, para el monitor de forma de onda (instrumento de medición de señal de video) y para el monitor de video (denominado PIX OUT).

Asimismo, permite la comunicación con el panel de control remoto, que tiene la finalidad de cambiar los parámetros de la cámara. Para el ajuste preciso de los parámetros de la cámara, el operador de video debe visualizar la señal generada en todo momento. [19]

Panel de Control Remoto (RCP - Remote Control Panel): Permite al operador de video controlar y variar de manera remota ciertos parámetros de la cámara. A través del panel, el operador puede activar los procedimientos de ajustes automáticos, que permiten la corrección de la cámara, con un procedimiento de control por *software*. Este equipo puede ser conectado directamente a la cámara, como puede ser conectado al *CCU*, de manera que las señales de control viajan por el cable conectado directamente a la cámara. Es un elemento importante para el control remoto del iris, ajustes de color, balance de blancos y negros, operaciones de filtros y de ganancias, etc. [20] (Ver Figura 10).



Figura 10. Panel de Control Remoto. [21]

Operador de video: Personal técnico encargado del ajuste de las señales de video provenientes de las cámaras, para ello cuenta con una serie de instrumentos de medición y de monitoreo, así como del *RCP* para poder realizar los arreglos necesarios. Entre sus funciones está asegurar una señal de difusión acorde a los estándares y normas de transmisión de señal de video, mantener una colorimetría y luminancia similar en todas las cámaras para que no se noten diferencias en la señal de video, balanceo de blancos y negros, etc.

Tally: Indicador que tiene la finalidad de señalar que la cámara está al aire, usualmente se trata de un led ubicado en el visor (*viewfinder*) de la cámara que se enciende o apaga dependiendo del caso.

Retorno de video: Le permite saber al camarógrafo lo que está al aire en ese momento, puede ser otra cámara, un video grabado, etc. Los *CCU's* de las cámaras tienen a disposición una salida para dicho propósito, de igual forma, las cámaras *Broadcast* también cuentan con esta posibilidad. [13]

Paneo: Es uno de los principales movimientos de la cámara, la palabra proviene de “panorama”, ya que es una técnica muy utilizada para realizar tomas panorámicas. El movimiento consiste en dirigir la cámara horizontalmente de izquierda a derecha y viceversa desde una posición determinada. Un ejemplo de paneo se puede apreciar en la captura de tomas de objetos moviéndose como autos de carrera o personas caminando. La Figura 11 muestra el movimiento descrito.

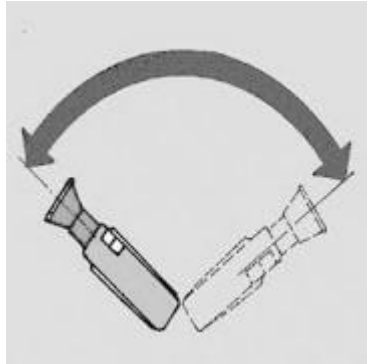


Figura 11. Descripción del movimiento de "paneo". [22]

Tilt: Es otro de los movimientos de la cámara, la palabra quiere decir “inclinarse”, por lo que se habla de un movimiento vertical en el cual se trata de dirigir la cámara hacia arriba o hacia abajo desde una posición determinada (ver Figura 12). Esta técnica es comúnmente usada para revelar objetos verticales como edificios.

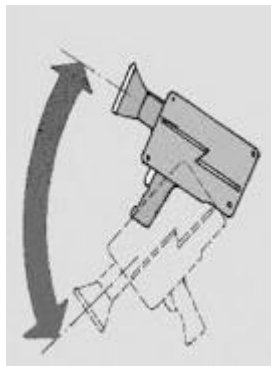


Figura 12. Descripción del movimiento de "tilt" [22]

Dolly: Se trata de una plataforma de rodaje en donde la cámara es montada sobre un trípode o base. Usualmente el operador de cámara se ubica sobre la plataforma para poder realizar la toma. En el mercado se pueden encontrar versiones “robóticas”, de manera que se puede realizar el movimiento del *dolly* remotamente

gracias al accionamiento de un motor eléctrico. Generalmente se operan sobre un riel que puede ser recto o curvo. Es un equipo muy utilizado en eventos televisivos y en la cinematografía ya que permiten una serie de movimientos interesantes, como por ejemplo, movimientos perpendiculares a la acción con la cámara moviéndose hacia adelante y hacia atrás; movimientos paralelos a la escena, en el cual la cámara se mueve de lado a lado; así como movimientos en arco que permite moverse alrededor de un objeto en específico. Algunos ejemplos de *dolly* se pueden observar en la Figura 13.

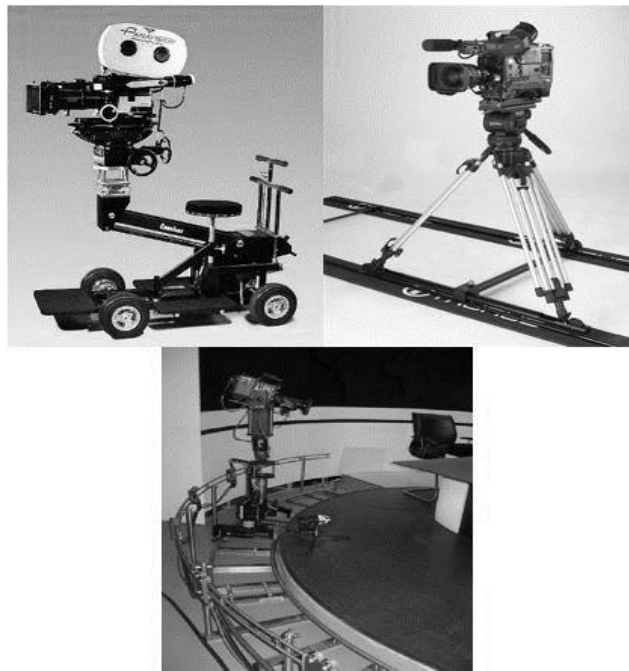


Figura 13. Ejemplos de *dollies*. [23] - [24]

Cabezal: Es la estructura mecánica en donde la cámara descansa y debido a su constitución permite tanto el movimiento vertical (*Tilt*) y horizontal (Paneo) de la misma de una manera fluida y suave. Un ejemplo de cabezal se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Conjunto cabezal - cámara [25]

Plancha de la cámara: Este elemento se coloca en el lugar donde se posicionará la cámara (generalmente en el cabezal) y tiene la finalidad de asegurar la cámara en la estructura donde se sostiene para evitar caerse (ver Figura 15).



Figura 15. Plancha de la cámara [26]

Columna elevadora: Elemento en el cual será fijado el cabezal y deberá estar en la capacidad de soportar el peso agregado. En mecanismos como los *dollies* robóticos son usados para proporcionar otra dimensión de movimiento que ayuda a modificar la altura de la cámara, ya sea de manera manual o automatizada a través de

la acción de un motor eléctrico; también existen casos en que la columna tiene una altura fija. Presentan ventajas a su contraparte el trípode ya que prestan una mayor altura y estabilidad, importante para algunas aplicaciones. En la Figura 16 se muestra un ejemplo.



Figura 16. Columna de elevación de la cámara [27]

Trípode: Es un armazón de tres pies que sirve para sostener ciertos aparatos. Permiten ajustar su altura y cuenta con unos frenos para fijar la posición ideal para la operación de la cámara (ver Figura 17).

En la Figura 17, se muestra una imagen de los elementos necesarios para la manipulación de una cámara de estudio:

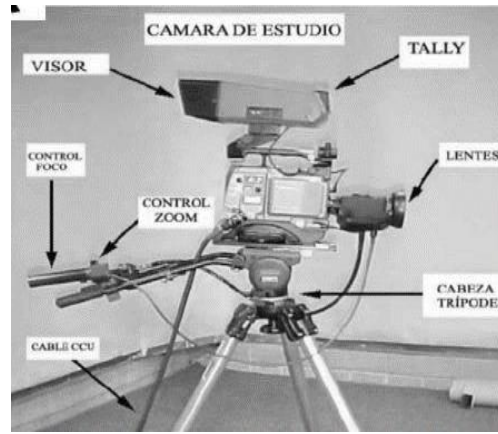


Figura 17. Elementos de una cámara de estudio [28]

Unidad móvil: Es un elemento rodante “tipo oficina” que posee todos los equipos necesarios para realizar una producción televisiva, como por ejemplo, Unidades de Control de Cámaras, Paneles Remotos de Control, instrumentos de medición y de monitoreo de señal de video, entre otros. Se hace uso de ella, en el momento en el que la grabación o transmisión se deba hacer en espacios exteriores no fijos.

Comunicación SPI (Serial Peripheral Interface): Es un protocolo de comunicación síncrona que permite que un dispositivo maestro inicie la comunicación con uno o varios dispositivos esclavos. Es usado normalmente para efectuar comunicaciones a cortas distancias. Tiene como característica que un mismo dispositivo pueda transmitir y recibir información simultáneamente, lo que quiere decir que es un tipo de comunicación *full – dúplex*. El bus de comunicación está compuesto por cuatro líneas denominados *SCLK* (señal de reloj – *Clock*), *MOSI* (*Master Out – Slave In*), *MISO* (*Master In – Slave Out*) y *CS* (*Chip Select*) o también *SS* (*Slave Select*). La línea *SCLK* es dada por el maestro y es la que permite la sincronización en la comunicación. La transmisión de datos se puede dar en cuatro (4) modos diferentes, dependiendo de la configuración de los registros del módulo de

comunicación serial destinado para este fin. Estos modos determinan cuándo los datos son transferidos o leídos por el dispositivo, ya sea en el flanco de subida o de bajada del reloj proporcionado por el maestro [29]. La conexión entre el maestro y los dispositivos esclavos se puede apreciar en la Figura 18.

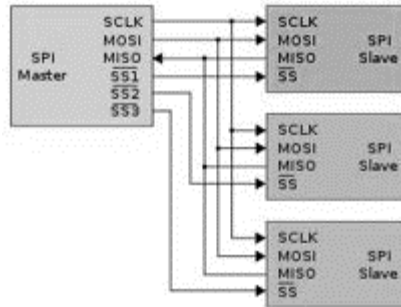


Figura 18. Ejemplo de conexión entre maestro y esclavos para la comunicación *SPI*.

[29]

EIA – 485: Formalmente *RS – 485*, es un estándar de comunicaciones en bus de la capa física del modelo *OSI*. Está definido como un sistema de bus diferencial multipunto. Es ideal para transmitir a altas velocidades sobre largas distancias y a través de canales ruidosos, ya que el par trenzado reduce los ruidos que se inducen en la línea de transmisión. El medio físico de transmisión es un par trenzado que admite hasta 254 estaciones en un solo par, con una longitud máxima de 1200 metros operando a una velocidad de transmisión de hasta 19 Kb / s (*half – dúplex*). [30]

CAN (*Controller Area Network*): “Es un protocolo de comunicaciones basado en una arquitectura de bus para transferencia de mensajes en ambientes distribuidos. Fue originalmente concebido para aplicaciones en el área automotriz, pero rápidamente despertó una creciente atención en el área de control y automatización industrial.

Entre sus fortalezas, el bus *CAN* considera una arquitectura multi - maestro capaz de proveer características de respuesta en tiempo real y tolerancia a fallas en la recepción de mensajes y mal funcionamiento de los nodos. Además, *CAN* está estructurado de acuerdo con el modelo *OSI*.” [31]

“Dentro de la pila *OSI*, *CAN bus* cubre la capa de enlace de datos y la física. En concreto, la estandarización divide las diferentes capas. Por ejemplo, *ISO 11898 – 1* cubre la capa de enlace de datos, mientras que la física se divide en dos dependiendo de la velocidad: *ISO 11898 – 2* para alta velocidad e *ISO 11898 – 3* para baja velocidad.”

El protocolo de acceso al medio utilizado es el *CSMA / CD + AMP* (*Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection + Arbitration on Message Priority*). En dicho protocolo, los distintos nodos conectados realizan una escucha del medio, de forma que conocen cuándo un mensaje está siendo transmitido. De tal modo, los nodos evitarán mandar una trama de datos cuando la red está ocupada. Puede darse la circunstancia en la que dos nodos manden mensajes a la vez. Este problema se solventa mediante prioridad, En caso de colisión, el nodo con el identificador más bajo será el que logre enviar el mensaje.” [32]

Comunicación *Ethernet*: Es un estándar de comunicación en redes *LAN* (*Local Area Network*) el cual usa un método de transmisión de datos denominado Acceso Múltiple con Detección de Portadora y Detección de Colisiones (*CSMA / CD*), este método consiste en que el dispositivo determina primero si el medio de comunicación se encuentra disponible para la transmisión, de ser afirmativo, todos los

nodos de la red se pondrán en modo de recepción y el nodo seleccionado recibirá la información. Si dos nodos intentan transmitir al mismo tiempo, estos se verán obligados a esperar un tiempo aleatorio para volver a realizar el intento de transmisión. La información será enviada a través de una secuencia de bits denominada trama. Dichas tramas contienen las direcciones físicas de la fuente y del destino, los datos a transmitir y una serie de bits que tienen la finalidad de establecer el sincronismo entre los nodos y detectar los errores de transmisión. Por las características del estándar, es un tipo de comunicación *half – dúplex*, sin embargo, permite velocidades de envío de hasta 100 Mbps. El medio físico más usado hoy en día para las redes LAN es el cable *UTP cat5-e (Unshielded Twisted Pair)* con un conector *RJ-45* colocado a los extremos de este cable. [33]

Modulación por ancho de pulso (*PWM – Pulse Width Modulation*): Es un tipo de modulación el cual modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica para obtener una tensión continua equivalente. Entre sus diversas aplicaciones se encuentra el control de velocidad de motores regulando la cantidad de energía proporcionada por la alimentación. En la Figura 19 se muestra una señal de modulación por ancho de pulso, explicada anteriormente.

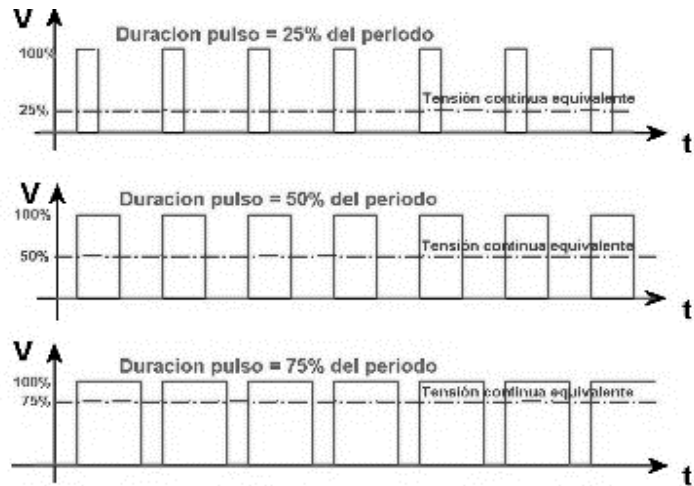


Figura 19. Señal de modulación por ancho de pulso. [34]

Puente “H”: Es un circuito electrónico compuesto por cuatro transistores de potencia, por lo general del tipo *MOSFET* por su alta velocidad de conmutación y bajas pérdidas de potencia en su accionamiento. La finalidad de este circuito es permitir la inversión de giro del motor activando simultáneamente los transistores diagonalmente opuestos. En la Figura 20, se muestra la configuración del circuito y la manera de invertir el sentido de giro. Si se aplica una señal *PWM* para la conmutación de los transistores se podrá regular la entrega de potencia de la fuente a la carga, logrando el control de velocidad del motor. Este método es ampliamente utilizado para el control de motores debido a su alta eficiencia.

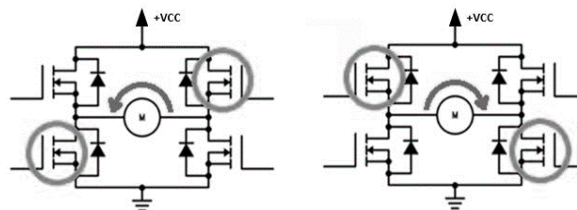


Figura 20. Configuración puente H [35]

CAPÍTULO II

Consideraciones de diseño y características físicas del equipo

2. Consideraciones de diseño

En esta sección se mencionarán las consideraciones del diseño, describiendo el sistema de posicionamiento de la cámara así como las variables a controlar, especificando el mecanismo a usar.

2.1. Descripción del sistema de posicionamiento de la cámara

El sistema de posicionamiento de la cámara está constituido por un riel recto de hasta 60 metros de longitud el cual permitirá el desplazamiento lineal de una plataforma de rodaje gracias al accionamiento de un motor eléctrico.

Sobre el riel se dispone una estructura o plataforma de rodaje compuesta de una serie de elementos (*dolly*) que permiten fijar y orientar una cámara para realizar tomas sobre un espacio amplio.

Sobre el *dolly* se ajustará una columna cuya finalidad será soportar el peso del cabezal y de la cámara de televisión. El cabezal estará sujeto a la columna y será usado para que la cámara pueda realizar movimientos angulares horizontales y

verticales por medio de la acción de unos motores eléctricos. La Figura 21 representa lo descrito anteriormente.

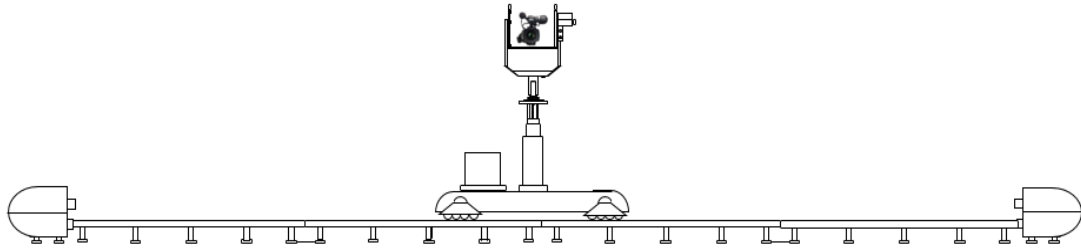


Figura 21. Conjunto *dolly*, columna, cabezal y cámara sobre un riel recto

Para evitar que la cámara choque con la estructura del cabezal e impedir que los cables de video y de control de los motores se enreden durante los movimientos de la cámara, se contarán con unos sensores ubicados en el cabezal, estos determinarán el tope del movimiento angular, tanto horizontal como vertical. De igual forma se agregarán algunos sensores que permitirán determinar la cercanía del *dolly* al final de carrera del riel, asimismo, se colocarán unas piezas mecánicas a ambos extremos del riel para amortiguar el frenado en caso de que el sistema electrónico presente una falla.

En cuanto al control del lente de la cámara, es necesario realizar el ajuste del enfoque y del *zoom*, adicionalmente, el sistema deberá permitir controlar de manera remota el iris del lente, ya que son variables indispensables para obtener la toma deseada.

El equipo podrá ser controlado a distancia mediante comunicación serial, el operador de cámara contará con una consola donde podrá dominar tanto el *dolly* como el cabezal, y simultáneamente visualizar los movimientos de la cámara a través de un monitor, dicha consola podrá indicarle al operador de cámara eventos importantes como presencia de alguna emergencia, estimación de la posición de la plataforma de rodaje así como la proximidad al final de carrera de los movimientos implicados.

El monitoreo será posible gracias a una señal de video de retorno proporcionada por el *CCU* a través del cable de video más apropiado para tal fin. Por último, el operador de cámara estará en constante comunicación con el operador de video y el director de cámara, esto con el propósito de que pueda recibir indicaciones importantes durante la grabación.

2.2. Condiciones del entorno durante el funcionamiento del sistema

Hay que tomar en consideración algunos aspectos relevantes en cuanto al entorno de operación del equipo, y es que no siempre será operado bajo condiciones ambientales controladas, como por ejemplo, en un estudio de televisión, sino que más bien será usado en eventos al aire libre como transmisiones deportivas, conciertos, etc. Esto implica que la parte mecánica deberá soportar tales condiciones y los dispositivos electrónicos tendrán que estar protegidos para evitar inconvenientes en referencia a la seguridad del personal y daños permanentes en la unidad.

2.3. Variables a controlar y condiciones de operación

Para obtener tomas que logren llamar la atención del televidente es importante tener un control adecuado de las siguientes variables: posición y velocidad del *dolly*, posición y velocidad angular del paneo y el *tilt*, posición del anillo del foco, abertura y cierre del diafragma del iris y la posición del anillo de *zoom*, cada una de ellas tendrán ciertas condiciones de operación que serán definidas de acuerdo a las exigencias de la empresa.

(a) **Velocidad del *dolly*:** esta variable contará con un rango de velocidad máxima de operación entre 0,250 m/s y 4 m/s.

(b) **Posición del *dolly*:** será indicada por el operador de cámara mediante un *joystick*. Como señal de retorno, se empleará un estimado de la posición de la plataforma sobre el riel que será indicado en una pantalla *LCD* ubicada en la consola de control, además la proximidad del final de carrera se reforzará con la ayuda de un led una vez que se detecte la activación del sensor.

(c) **Velocidad del movimiento angular vertical de la cámara (*tilt*):** su velocidad máxima será de 60 grados/seg del movimiento angular.

(d) **Suavidad del movimiento angular vertical de la cámara (*smooth tilt*):** ajuste del tiempo de aceleración y frenado del motor que ejecutará el movimiento vertical. El tiempo mínimo será de un (1) segundo y el máximo será de tres (3) segundos.

(e) Velocidad del movimiento angular horizontal de la cámara (paneo): la velocidad máxima del movimiento será de 72 grados/seg.

(f) Suavidad del movimiento angular horizontal de la cámara (*smooth* paneo): de igual forma, se contará con el ajuste del tiempo de aceleración y frenado del motor eléctrico. El tiempo mínimo será de un (1) segundo y el máximo será de tres (3) segundos.

(g) Posición angular vertical y horizontal de la cámara: el control de estas variables será posible a través del monitoreo. El diseño contará con unos sensores que determinarán el final de carrera de ambos movimientos.

(h) Posición del anillo del foco: esta variable se modificará con la ayuda de un servomotor eléctrico y el valor de la posición deberá reflejarse en la consola del operador de cámara.

(i) Control del diafragma del iris y la posición del anillo de *zoom*: el control de estas variables se realizarán por medio del servomotor del lente de la cámara.

2.4. Características físicas del sistema de posicionamiento

En esta sección se determinan las características físicas de los elementos del conjunto *dolly* – columna – cabezal – cámara, además se indica el modo de

desplazamiento para el sistema de posicionamiento de la cámara y se selecciona el riel donde se desplazará el equipo.

2.4.1. Características físicas de la cámara de televisión

El tipo de cámara a ser tomadas en consideración para el diseño serán las que dispongan de *CCU*, ya que esta unidad permite que la señal de video se pueda integrar a la red de control y monitoreo del estudio de televisión o unidad móvil (en caso de grabaciones en vivo al aire libre).

La empresa ostenta de este tipo de cámaras y de las cuales predominan las marcas *Grass Valley*, *Hitachi* y *Sony*. El modo de comunicación entre el *CCU* y la cámara será a través de un cable triaxial o de fibra (dependiendo del modelo y la marca). El dimensionamiento y peso de las mismas son muy similares entre sí; en promedio, las cámaras tienen una masa de aproximadamente 6 Kg (sin incluir el lente). Las planchas a usar para ajustar la cámara al cabezal tienen una masa aproximada de 2 Kg.

Existen dos marcas de lentes disponibles para las cámaras, estas son *Canon* y *Fujinon*. Dependiendo del tipo de toma que se desea, el alcance de acercamiento del lente seleccionado será mayor o menor (relación del *zoom*). Para los efectos de operación del equipo se considera lentes que no superen los 2 Kg.

Con la recopilación de estos datos se tiene un estimado de la carga útil que deberá soportar el cabezal a seleccionar. En la Tabla 1, se presentan las masas consideradas por elemento de la cámara en conjunto con la plancha para su fijación.

Tabla 1. Masa total a soportar por el cabezal

Elemento	Masa
Cuerpo de la cámara	6 Kg
Lente	2 Kg
Plancha / cuña de la cámara	2 Kg
Masa total:	10 Kg

2.4.2. Selección del cabezal

Para escoger la estructura que realizará los movimientos de la cámara se investigó el mercado para obtener una referencia de precios de algunos modelos comerciales que cumplan con las condiciones de diseño, igualmente, se tomaron en consideración los modelos de cabezales disponibles en la empresa. Del estudio se obtuvo una serie de alternativas de las cuales se tomó la elección más económica.

Un par de modelos comerciales se pueden apreciar en la Figura 22, el de la izquierda pertenece a la casa *Egripment*, el de la derecha a la compañía *EZ – FX*, ambos cuentan con los accesorios necesarios para el control remoto de la cámara a través del accionamiento de motores eléctricos.



Figura 22. Ejemplo de cabezales robóticos [25]- [36]

Sin embargo, durante la investigación se presentaron algunos inconvenientes para seleccionar un modelo comercial las cuales se enumerarán a continuación:

- (a) No permiten el control del equipo a las distancias estipuladas en el diseño.
- (b) El producto solamente puede ser adquirido con todos los accesorios y no únicamente el mecanismo.
- (c) Alto costo de los modelos (entre 3.000 y 24.000 US \$).
- (d) Inversión adicional para adaptar la electrónica de control del cabezal.

Estos problemas de funcionalidad y de costo implican que se deberá seleccionar un cabezal disponible en la empresa. La mayoría de los cabezales son manipulados manualmente y se dificulta la modificación del mismo para automatizar los movimientos (ver Figura 23 - imagen de la izquierda), no obstante, se dispone de un cabezal de una grúa (ver Figura 23 - imagen de la derecha) cuyo modo de control era a través de motores eléctricos, este mecanismo es capaz de aguantar la masa de 10 Kg requerida; el inconveniente que presenta esta opción es que los motores no se encuentran en condiciones de ser usados, por lo que se debe invertir en la adquisición de nuevos motores y de los *drivers*, además de eso, se deberá proponer una modificación de la estructura del cabezal para que pueda ser adaptado a la columna

del *dolly* así como plantear una manera de colocar los sensores de final de carrera para los movimientos del mecanismo y evitar inconvenientes durante la operación del equipo. La masa de cabezal es de aproximadamente 6 Kg y está hecho de material de aluminio.

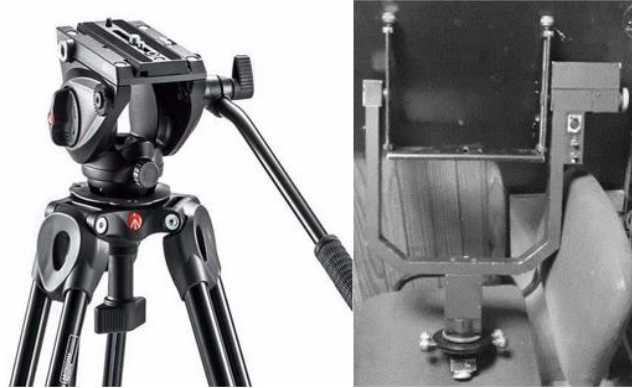


Figura 23. Tipos de cabezales disponibles en la empresa [37]

El cabezal seleccionado se muestra en la Figura 24:



Figura 24. Foto del cabezal seleccionado (cabezal de la grúa)

2.4.3. Modo de desplazamiento de la plataforma de rodaje

Se realizó un estudio en el mercado entre varios proveedores de productos capaces de proporcionar un servicio similar al propuesto en el diseño del trabajo de grado, esto es con la intención de conocer los diferentes mecanismos que usualmente se usan para mover el *dolly* y, de ser posible, seleccionar una de las opciones.

A continuación se presentarán las tres (3) alternativas más comunes encontradas:

(a) **Alternativa n°1:** La compañía *Ross Video* propone un mecanismo en el cual cuenta con un motor que se acopla a las ruedas de la plataforma para realizar el movimiento (Figura 25).



Figura 25. Mecanismo propuesto por la compañía *Ross Video* [38]

(b) Alternativa n°2: La compañía *M.R.M.C.* propone un modelo cuyo motor actúa sobre una cremallera fijada a la estructura del riel. La muestra Figura 26 lo descrito anteriormente:

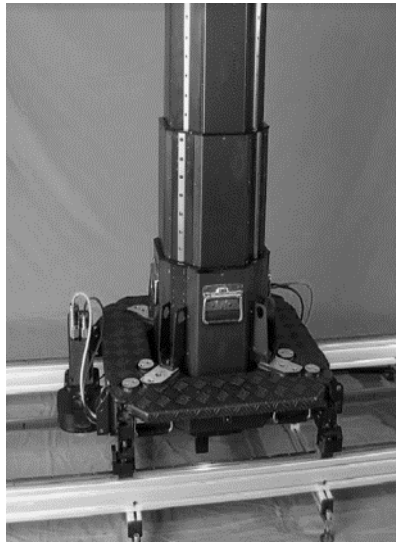


Figura 26. Mecanismo propuesto por la compañía *M.R.M.C.* [39]

(c) Alternativa n°3: La compañía *Egripment* propone un mecanismo diferente a las alternativas anteriores. En este caso, el movimiento es ejecutado a través de un motor, un sistema de poleas y una guaya ajustada a la estructura del *dolly* (ver Figura 27). El motor estará ubicado en uno de los extremos del riel.



Figura 27. Mecanismo propuesto por la compañía *Egripment* [40]

Se contactó al departamento de ventas de cada compañía con el objetivo de tener información acerca del precio de cada estructura, pero resultó ser que para adquirir alguno de estos modelos era necesaria una inversión superior a los 50 mil dólares, monto que sobrepasa el presupuesto de la empresa. Como no es posible la compra de uno de los productos pues se tuvo que realizar un análisis con la ayuda de especialistas en la ingeniería mecánica para establecer parámetros a considerar para así poder comparar cada una de las alternativas planteadas anteriormente, de manera que en caso de una eventual implementación del diseño la compañía tenga el sistema mecánico definido y pueda elaborar el prototipo con el personal adecuado para la tarea, esto les permitirá reducir los costos en la inversión inicial.

La Tabla 2 muestra una comparación de las opciones planteadas:

Tabla 2. Estudio de las posibilidades para el escoger el mecanismo de movimiento del *dolly*

	Alternativa n°1	Alternativa n°2	Alternativa n°3
Costos de inversión	Económico	Costoso	Moderadamente costoso
Mantenimiento	Constante	Constante	Esporádico
Costos de mantenimiento	Costoso	Costoso	Económico
Facilidad de ensamble y desarme	Fácil	Fácil	Más elaborado

En base a los resultados obtenidos en la comparación, se ha llegado a la conclusión de que el sistema mecánico planteado por la compañía *Egripment* es lo más conveniente debido a que los elementos que conforman el conjunto son más económicos y requieren de poco mantenimiento, sin embargo, el proceso de ensamble y desarme del equipo requerirá de más tiempo en comparación con las otras alternativas.

Se ha decidido escoger los modelos del riel, la plataforma de rodaje y la columna propuestos en el catálogo de productos de la misma compañía para definir las características físicas de estos elementos.

2.4.4. Características de la columna

Esta parte del equipo estará ajustada a la base del *dolly* y tendrá como función proporcionar una determinada altura a la cámara. El cabezal seleccionado será fijado a la estructura de la columna para que la cámara tenga un mayor campo de visión durante la filmación. La columna seleccionada pertenece al fabricante *Egripment*, es de forma cilíndrica y está constituida de material de acero, tiene una altura fija de 90 centímetros, un radio de 6 cm, la masa de la misma es de 25 Kg [41].

2.4.5. Características de la plataforma de rodaje

Las características de la plataforma de rodaje son las definidas por el fabricante *Egripment* en su producto “*Generic Track System*”. Este elemento tiene una longitud de un (1) metro, una anchura de 0.28 m y una altura de 0.20 m, está hecho de material de fibra de carbono, con una masa de 25 Kg y tiene la capacidad de soportar hasta 60 Kg [41]. Considerando que el conjunto columna – cabezal – cámara tiene una masa de 45 Kg el modelo seleccionado cumple con los requerimientos de diseño.

La Tabla 3 muestra los pesos de cada elemento definidos anteriormente con la adición de la masa de la caja electrónica donde se ubicará el sistema de control.

Tabla 3. Masa del equipo

Elemento	Masa
Cámara	10 Kg
Cabezal	10 Kg
Columna	25 Kg
Caja de electrónica	15 Kg
<i>Dolly</i>	25 Kg
Total	85 Kg

Un modelo tentativo de la base del *dolly* se puede apreciar en la Figura 28:

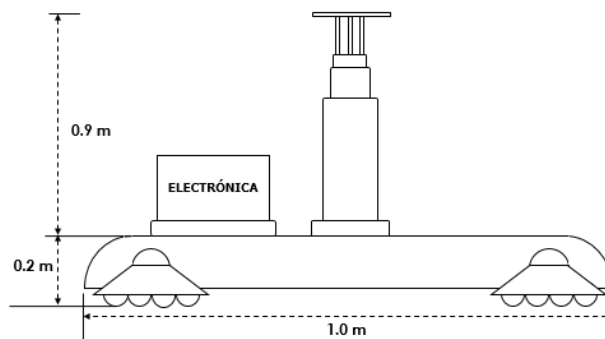


Figura 28. *Dolly*, columna y caja electrónica instalada

2.4.6. Selección del riel

El modelo de riel seleccionado pertenece al producto “*Generic Track System*” del fabricante *Egripment* de manera que sea compatible con las dimensiones del *dolly*. Las características, el precio y la duración de la garantía se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de los rieles de cada proveedor

Compañía	<i>Egripment Support Systems</i>
Modelo	<i>Generic Track System</i>
Dimensiones (L x W x H)	240 x 28 x 11.5 cm
Material	Acero
Carga útil	1000 Kg.m ²
Peso por unidad	14,2 Kg
Cantidad de rieles	24
Precio por unidad	561.00 €
Precio total (incluye accesorios)	18,117.75 €
Garantía	12 meses

La Figura 29 muestra imágenes del riel seleccionado.

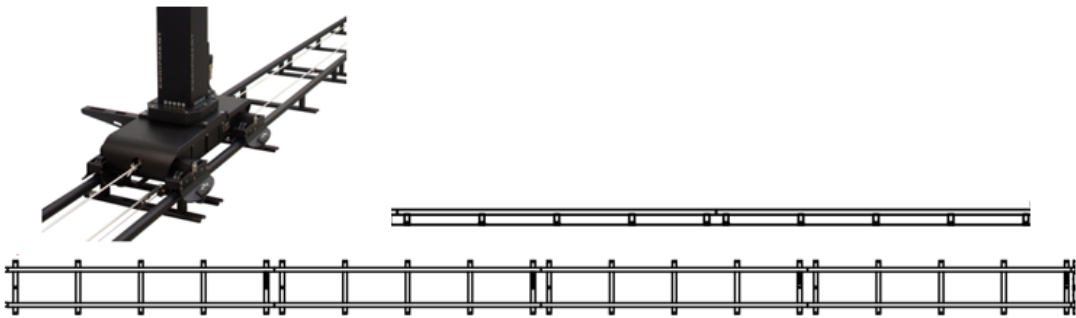


Figura 29. Riel seleccionado [40] - [42]

CAPÍTULO III

Definición de los elementos implicados en el diseño

En este capítulo se explica el proceso de selección de los principales elementos que formarán parte del sistema de posicionamiento de la cámara como por ejemplo, los motores, *drivers*, sensores y módulos de comunicación.

3. *Dolly*

En esta sección se escogen los elementos de accionamiento para el desplazamiento de la plataforma de rodaje.

3.1.1. Dimensionamiento del motor

El mecanismo que se tomará como diseño base para desplazar la plataforma de rodaje será similar al propuesto por la compañía *Egripment* (ver Figura 30).

DRIVE UNIT TERMINOLOGY

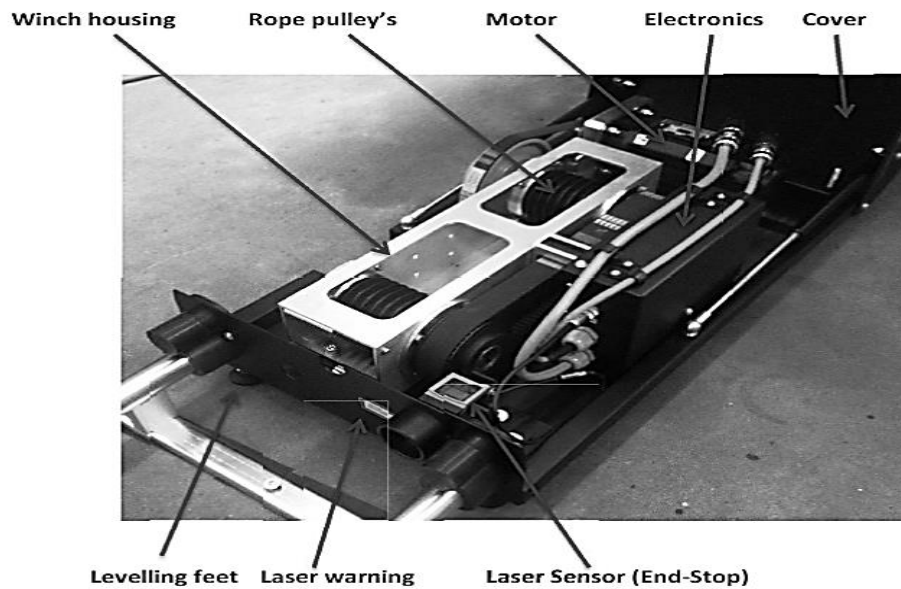


Figura 30. Sistema de poleas - motor para mover el *dolly* [41]

Para dimensionar el motor es necesario conocer la masa de la carga, el radio de la polea de transmisión, la velocidad y aceleración tope de la carga sobre el riel. Gracias al personal de soporte técnico de *Egripment*, se pudieron determinar los diámetros de las poleas del mecanismo, estos parámetros son importantes ya que se usarán en el cálculo que permitirán conocer las exigencias de torque y velocidad que debe cumplir el motor a seleccionar. Los datos recopilados se pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos a considerar para el dimensionamiento del motor [41]

Masa máx. del <i>dolly</i>	85 Kg
Diámetro de la polea conducida	20 cm
Diámetro del cubo de la polea conducida	16 cm
Diámetro de la polea conductora (acoplada al motor)	8 cm
Velocidad máx. <i>dolly</i>	4 m/s
Acel. y desacel. máx. <i>dolly</i>	1 m/s ²

Según los datos suministrados en la Tabla 5, la masa máxima de la carga será de 85 Kg. El diámetro de la polea de transmisión coincide con el diámetro del cubo de la polea conducida y que permite el movimiento gracias al sistema polea – correa donde evidentemente el motor es acoplado en su eje a la polea conductora.

La Figura 31 mostrará un sistema de polea – correa el cual es usado como medio impulsor para poder mover el *dolly* sobre el riel a través del sistema de polea – guaya:

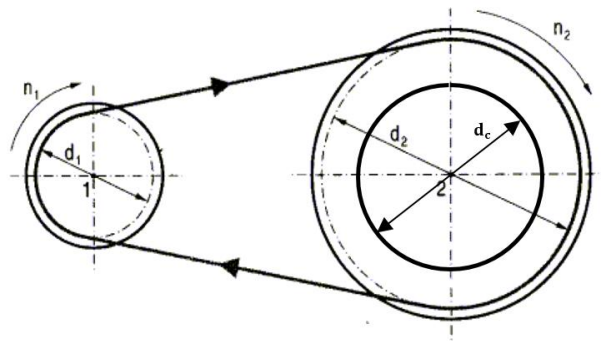


Figura 31. Reductor de velocidad para mover la plataforma de rodaje [43]

La polea de diámetro menor (d_1) es la que será acoplada al eje del motor y, por lo tanto, se le dará la denominación de polea conductora y cuyo diámetro será de 8 cm. La polea de mayor diámetro (d_2) será llamada polea conducida la cual anteriormente se explicó que el diámetro de la misma es de 20 cm con un diámetro de cubo (d_c) de 16 cm.

La velocidad máxima del *dolly* es una condición de operación establecida por la empresa, lo mismo sucede con el valor de la aceleración del motor, pues se

conoce que el tiempo de aceleración y frenado mínimo del *dolly* es de cuatro (4) segundos, lo que indica que el cuerpo a desplazar podrá acelerar o desacelerar en un valor tope de 1 m/s^2 según la ecuación (1):

$$\text{aceleración} = \frac{\text{velocidad}}{\text{tiempo}} \quad (1)$$

Para acelerar una masa de 85 Kg a 1 m/s^2 se debe generar una fuerza de 85 N en base a la Segunda Ley de Newton (despreciando los efectos del roce en el movimiento).

La relación entre la fuerza y el torque está dada por la ecuación (2):

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (2)$$

Donde;

τ : Par o torque [N.m]

r : Distancia entre el eje de torsión y el punto de aplicación de la fuerza [m]

F : Fuerza [N]

De esta manera se puede conocer el par necesario de la polea conducida para la condición de máxima exigencia:

$$\tau = 0,1\text{m} \cdot 85\text{N} = 8,5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Para obtener la máxima velocidad de giro de la polea de transmisión y poder desplazar el *dolly* a 4 m/s se hará uso de las siguientes ecuaciones:

$$x = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (3)$$

$$n_p = \frac{\text{Velocidad máxima}}{x} \quad (4)$$

$$N_p = 60 \cdot n_p \quad (5)$$

Donde:

x: distancia recorrida del *dolly* [m]

r: radio de la polea de transmisión (radio del cubo de la polea conducida) [m]

n_p : número de vueltas por segundo de la polea de transmisión [vueltas/s]

N_p : Valor máx. de revoluciones por minuto de la polea de transmisión [rpm]

De la ecuación (3), la distancia recorrida por el *dolly* a cada vuelta de la polea es de 0,5026 m, lo que quiere decir que para obtener un desplazamiento de 4 m en un segundo se requieren de 7,96 vueltas por segundo de la polea, según la ecuación (4). Finalmente, se podrá determinar la cantidad de revoluciones de la polea necesarias para alcanzar una velocidad de cuatro (4) metros por segundo en el *dolly* por medio de la ecuación (5), lo que da un total aproximado a 478 rpm. La velocidad calculada corresponderá igualmente a la velocidad de giro de la polea conducida.

Existe una relación entre el radio de la polea conductora y conducida y las velocidades de giro de cada una, esto considerando una transmisión ideal donde no existan pérdidas en la transmisión del movimiento por la correa. La relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{N_2}{N_m} \quad (6)$$

Donde;

r_1 : Radio de la polea conductora [m]

r_2 : Radio de la polea conducida [m]

N_m : Velocidad de giro de la polea conductora (velocidad del motor) [rpm]

N_2 : Velocidad de giro de la polea conducida [rpm]

Con los datos proporcionados en la Tabla 5 y con la relación dada en la ecuación (6), es posible calcular la velocidad de giro máxima del motor, el resultado es una velocidad cercana a las 1200 rpm.

$$N_m = 478\text{rpm} \cdot \frac{0,1 \text{ m}}{0,04 \text{ m}} = 1195 \text{ rpm}$$

De igual forma, es posible conocer el torque del motor a esa velocidad ya que se conoce que la polea conducida ejerce un par de 8,5 N.m para poder acelerar la carga máxima de 85 Kg a 1 m/s^2 , además se conoce la relación de radios entre las

poleas, por lo que el resultado se puede obtener a partir de las siguientes expresiones que se deducen gracias a la ecuación (2):

$$F_m = F_2 \quad (7)$$

$$\frac{\tau_m}{r_1} = \frac{\tau_2}{r_2} \quad (8)$$

Donde;

F_m : Fuerza del motor [N]

F_2 : Fuerza de la carga [N]

τ_m : Par motor [N.m]

τ_2 : Par de la carga [N.m]

$$\tau_m = 8,5 \text{ N. m.} \cdot \frac{0,04 \text{ m}}{0,1 \text{ m}} = 3,4 \text{ N. m}$$

Con los resultados obtenidos se puede hacer una estimación de la potencia máxima del motor (P_m) para el movimiento del *dolly*, para ello se recurre a la ecuación (9):

$$P_m = \tau_m \cdot N_m \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (9)$$

$$P_m = 3,4 \text{ N. m.} \cdot 1195 \text{ rpm.} \cdot \frac{2\pi}{60} = 425,5 \text{ W}$$

Lo que quiere decir que en el eje del motor se producirá una potencia mecánica de aproximadamente 426 W en su condición de máxima exigencia despreciando las pérdidas de potencia en la transmisión de la correa entre la polea y el motor seleccionado.

Sin embargo, hay que tomar en cuenta que el motor no trabajará en régimen continuo sino bajo un régimen intermitente donde para un determinado período de operación se presentarán casos de aceleraciones, frenados e inversiones de giro, afectando la vida útil de la máquina debido al desgaste del sistema de aislamiento y por el calentamiento que provocan estos eventos. Para ello, es necesario evaluar las exigencias de potencia térmica impuesta al motor durante el régimen de funcionamiento [44]. La Figura 32, muestra una estimación del comportamiento del motor durante su operación en un período determinado.

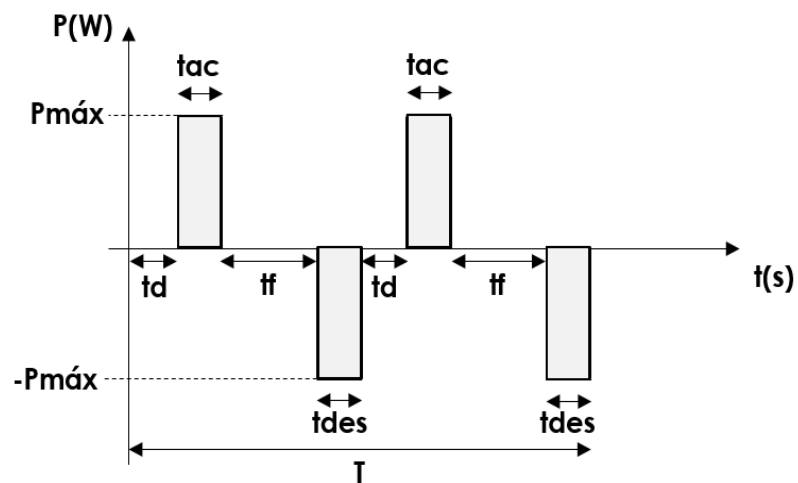


Figura 32. Régimen de funcionamiento del motor *dolly*

Donde;

t_{ac} : Tiempo de aceleración del motor (4 s)

t_{des} : Tiempo de desaceleración del motor (4 s)

t_d : Tiempo motor detenido (11 s)

t_f : Tiempo motor en funcionamiento (11 s)

T : Período del régimen (60 s)

En base a la información anterior, se procede al cálculo de la potencia térmica exigida durante el régimen de operación, para ello es necesario el uso de la ecuación (10) [44]:

$$P_{t\acute{e}rmica} = \sqrt{\frac{\sum P_{if}^2 \cdot t_{if}}{\sum t_{if} + \frac{t_{ip}}{K_v}}} \quad (10)$$

Donde,

$P_{t\acute{e}rmica}$: Exigencia térmica del motor durante el régimen de operación [W]

P_{if} : Potencias solicitadas al motor en los intervalos de tiempo t_{if} [W]

t_{if} : Intervalos de tiempo en que el motor está funcionando [s]

t_{ip} : Suma de los intervalos en que el motor está detenido [s]

K_v : Constante que depende de la forma de refrigeración del motor ($K_v = 1$, para motores donde esencialmente la refrigeración no depende del funcionamiento del motor y $K_v = 3$, para motores donde la ventilación está vinculada al funcionamiento del motor) [44]

La mayoría de los motores comerciales de baja potencia son completamente cerrados y poseen un ventilador acoplado al eje del rotor como medio de refrigeración, no obstante, debido a las etapas de frenado y los intervalos donde el motor está detenido el ventilador deja de refrigerar, lo que conlleva a la disminución de disipación de calor. La potencia térmica durante el régimen es:

$$P_{\text{térmica}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (426\text{W})^2 \cdot 4\text{s} + 2 \cdot (-426\text{W})^2 \cdot 4\text{s} + 2 \cdot (0\text{W})^2 \cdot 11\text{s}}{16\text{s} + 22\text{s} + \frac{22\text{s}}{3}}} = 253.09\text{W}$$

Lo que quiere decir que el motor a seleccionar debe ser capaz de entregar una potencia nominal en régimen continuo de 426 W ya que desde el punto de vista térmico demanda una potencia menor que la potencia de arranque y de frenado del motor.

3.1.2. Estudio para la escogencia del tipo de motor eléctrico

Existe una gran variedad de motores eléctricos en el mercado, algunos de ellos son los motores de corriente continua, los motores de corriente alterna, los motores universales y los motores de paso. A continuación se realizará un estudio para la escogencia apropiada del tipo de motor para la aplicación. En la Tabla 6 se muestran las características de algunos de los motores disponibles en el mercado.

Tabla 6. Características de los distintos motores disponibles en el mercado [45] - [46]
- [47] - [48]

Parámetros	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	Motor de paso de reluctancia variable	Motor electrónicamente conmutados
Par de arranque	Alto	Medio	Alto	Alto
Par a altas revoluciones	Bajo	Alto	Bajo	Medio
Eficiencia	Media	Media	Baja	Alta
Respuesta dinámica del motor	Lenta	Lenta	Lenta	Rápida
Costo del motor	Económico	Costoso	Económico	Costoso
Costo de mantenimiento	Económico	Económico	Económico	Económico
Regularidad del mantenimiento	Constante	Esporádico	Esporádico	Esporádico
Vida útil	Mediano plazo	Mediano plazo	Largo plazo	Largo plazo
Dificultad en el control de velocidad	Fácil	Fácil	Media	Media
Dificultad en el control de posición	Media	Difícil	Fácil	Media

Hay que recordar que para desplazar el *dolly* sobre el riel se requiere de un alto par de arranque para iniciar el movimiento, además, el motor deberá estar en la capacidad de desarrollar velocidades que pueden alcanzar hasta las 1200 rpm.

Generalmente, los motores de corriente alterna son usados en aplicaciones que exigen un alto par y que trabajen a velocidades fijas, no se recomiendan para trabajos que requieran regulación de velocidad puesto a que para lograr tal cometido

se varía la frecuencia de operación del motor, como la frecuencia está estrechamente relacionada con el voltaje aplicado a la(s) fase(s) del motor, es probable que el torque requerido para mover la carga en el arranque sea insuficiente. Existe un modo para asegurar la entrega de corriente necesaria para mover la carga, esto se puede realizar a través de un control vectorial, pero esta solución resulta ser compleja por lo cual se descarta la opción de utilizar el motor trifásico.

Los motores de paso son conocidos por su facilidad en el control de posición del eje, esto les permiten ser usados en una gran gama de aplicaciones, se caracterizan por tener un alto par de arranque, también poseen la ventaja de ser una opción bastante económica y no aportan grandes gastos para el mantenimiento del motor, sin embargo, presentan varios inconvenientes, por ejemplo, el torque se reduce considerablemente una vez que opera a velocidades superiores a unas pocas revoluciones por minuto, es decir, tienen un limitado rango de velocidad de operación, no son recomendados en aplicaciones que exigen aceleraciones y frenados suaves, además, son los motores menos eficientes del mercado. De manera que se descarta esta opción ya que se pueden presentar problemas mientras opera a altas velocidades.

Los motores eléctricamente conmutados tienen la particularidad de disponer un encoder de efecto *Hall*, este dispositivo tiene la función de determinar qué fases se deben alimentar para seguir la secuencia de giro del motor, lo que permite un control de velocidad y de posición a lazo abierto, poseen un amplio rango de velocidades de operación, requieren de poco mantenimiento, son altamente eficientes y cada día están tomando un mayor protagonismo en el área industrial. La desventaja de estos motores es que son costosos en comparación a cualquier tipo de motor disponible en el mercado, de igual forma, los drivers suelen ser mucho más costosos.

Por último, los motores de corriente continua. Estos motores siguen siendo los más comunes en el mercado y se pueden conseguir en infinidad de tamaños y modelos. Tienen la característica de ser fáciles de controlar su velocidad puesto a que basta con alimentar sus terminales con una tensión determinada para hacerlo girar. Poseen un alto par de arranque y permiten trabajar a un amplio rango de velocidades, además, son motores que pudieran catalogarse como una opción económica. Entre sus desventajas se tienen que debido a su modo de conmutación, es necesario que estén en constante mantenimiento, aunque el reemplazo de las escobillas del motor no resulta ser un costo de mantenimiento elevado, además, no permiten un control de posición a lazo abierto del motor, para ello es necesario un sensor de posición como, por ejemplo, un encoder.

Entre las últimas dos alternativas mencionadas anteriormente se opta por el motor de corriente continua simplemente porque son fáciles de controlar, son más comunes de conseguir en el mercado y no requieren de una alta inversión inicial

3.1.3. Selección del motor

Después de una investigación entre diferentes modelos de motores de corriente continua que cumplan con las condiciones de operación, se procedió a realizar la escogencia de uno de las opciones. El motor seleccionado para mover el *dolly* es el que se observa en la Figura 33 y sus características son mostradas en la Tabla 7:

Tabla 7. Características del motor seleccionado para accionar el *dolly* [49]

Tipo de motor	Escobillas – imán permanente – DC
NEMA	56C
Dimensiones (L x D)	378 x 132 mm
Peso	33 Lbs (15 Kg)
Régimen de trabajo	Continuo
Potencia de salida	1 HP (746 W)
Torque	576 oz – in (4.07 N.m)
Voltaje de armadura	90 / 180 V
Corriente	10 / 5.4 A
Velocidad sin carga	1800 rpm
Precio	356.00 US \$
Garantía	12 meses



Figura 33. Motor seleccionado para mover la plataforma de rodaje [49]

3.1.4. Selección del *driver*

Luego de una búsqueda en internet se pudo contactar a una compañía que diseña *drivers* para motores de corriente continua con imán permanente de características semejantes al seleccionado (*KB Electronics, Inc.*). Después de indicar el tipo de aplicación, el proveedor recomendó el modelo *KBMG – 212D* ya que permite un control de velocidad en ambas direcciones de giro por medio de un

potenciómetro o una fuente externa. Las especificaciones se muestran en la Tabla 8 y en la Figura 34 se muestra una imagen del mismo.



Figura 34. *Driver* seleccionado para el accionamiento del *dolly* [50]

Cabe destacar que el fabricante recomienda la adquisición de una tarjeta de aislamiento entre la etapa de control y la de potencia ya que si se desea el control del motor por medio de una fuente externa existe el riesgo de daños permanentes en la etapa de control. Esta tarjeta se encuentra incluida en el precio mostrado en la Tabla 8 y se acopla al cuerpo del *driver*.

Tabla 8. Características del *driver* seleccionado [50] - [51]

Características / Modelo	<i>KBMG - 212D</i>
Voltaje de alimentación	115 / 230 VAC (50 / 60 Hz)
Rango de voltaje de armadura	$\pm 90 / \pm 180$ VDC
Potencia	1 HP / 2 HP
Rango de voltaje de entrada analógico	± 10 VDC
Salidas analógicas	+15 y -15 VDC
Corriente de línea RMS sin disipador de potencia	Hasta 12 A
Corriente promedio de la carga sin disipador de potencia	Hasta 8 A
Rango de ajuste de rampa de aceleración y frenado	0.1 – 15 s
Ajuste de rango de velocidad (%)	55 – 110
Ajuste de banda de zona muerta	Hasta $\pm 5\%$ de la velocidad máxima indicada
Rango de corriente continua	0 – 10 A
Máxima capacidad de carga (% por 2 minutos)	150%
Rango de temperatura de operación	0 – 50 °C
Dimensiones (L x W x H)	109 x 93.7 x 49.5 mm
Notas adicionales	Precio incluye disipador de potencia y etapa de aislamiento. No posee salida de monitoreo de corriente.
Precio	228.00 US \$
Garantía	18 meses

Este modelo se alimenta con una tensión de entrada de 115 o 230 VAC dependiendo del caso. Permite el accionamiento de motores de hasta 1 HP cuando es alimentado con 115 VAC y hasta 2 HP si la tensión de entrada es de 230 VAC. El *driver* está en la capacidad de otorgar hasta 90 VDC en los bornes del motor para 115 VAC y hasta 180 VDC si es alimentado con 230 VAC.

La tarjeta permite la regulación de velocidad del motor para ambos sentidos de giro a través de una fuente externa de ± 10 VDC, cuenta además con una salida simétrica de ± 15 VDC que por lo general es usada en caso de que la regulación se realice con un potenciómetro.

El *driver* cuenta con un conjunto de interruptores y potenciómetros que permiten el ajuste de ciertos parámetros, entre los más destacados están: corriente máxima proporcionada al motor (hasta 10 A), tiempo de aceleración y frenado (entre 0.1 y 15 s), ajuste de rango de velocidad (entre 55 y 110%) y ajuste de la banda de zona muerta ($\pm 5\%$ de la velocidad máxima configurada). Si la aplicación exige valores superiores a los ocho (8) amperios es necesario el uso de un disipador de potencia. Esta tarjeta soporta hasta 150 % de la corriente configurada por un tiempo de dos (2) minutos y puede operar en un rango de temperatura entre los 0 y 50 °C.

3.1.5. Selección del tipo de sensor de monitoreo de corriente

Para que el sistema de control se considere situaciones de carga que superen la capacidad de los motores, se ha decidido utilizar un sensor de corriente de carga. Para tal efecto se muestran los distintos métodos de medición de la corriente para luego determinar el más conveniente para el diseño. A continuación se presentan en la Tabla 9, las características de los métodos comúnmente usados para la medición de la corriente de carga en un motor.

Con los datos recopilados en la Tabla 9 se ha determinado que los sensores de corriente de efecto *Hall* proporcionan características interesantes para la medición de corriente del motor, la más importante de ellas es que se puede aislar

galvánicamente el sistema de potencia del sistema de medición, además de ser la opción más económica

Tabla 9. Características de los métodos de medición de la corriente de carga en un motor [52]

Método de medición de corriente	Resistencia <i>Shunt</i>	Efecto <i>Hall</i>
Precisión	Buena	Buena
Precisión vs Temperatura	Buena	Buena
Costo	Alto	Bajo
Aislamiento	No	Si
Capacidad de medición de altas corrientes	Pobre	Bueno
Problemas de “offset DC”	Si	No
Problemas de saturación / histéresis	No	Si
Consumo de energía	Alto	Bajo
Medición de corriente AC / DC	Ambas	Ambas

Existen numerosos sensores de corriente disponibles en el mercado, de los cuales se ha seleccionado uno proporcionado por el proveedor *Allegro MicroSystems, LLC*, debido a su facilidad de uso. Cabe destacar que el chip usado para la medición de la corriente puede variar en su modelo, por lo que a la hora de solicitar el producto es importante mencionar el modelo específico del encapsulado. Para el motor del *dolly* lo recomendable es usar el encapsulado que permite medir hasta 20 amperios. Las características del sensor y el precio están mostrados en la Tabla 10. La Figura 35 muestra el modelo seleccionado.

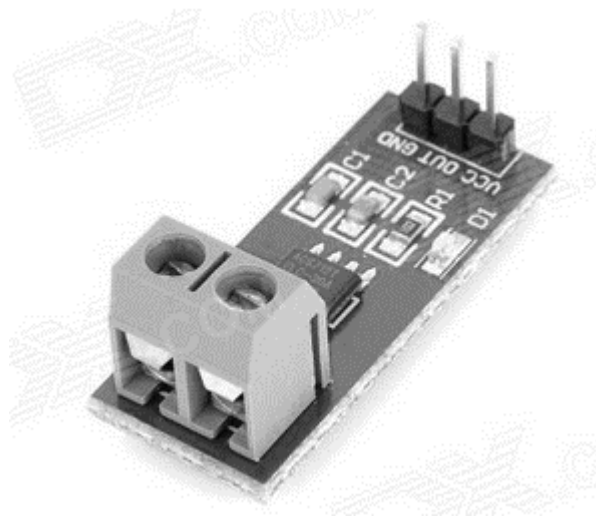


Figura 35. Sensor de corriente modelo ACS712 [53]

Tabla 10. Características físicas y eléctricas del sensor seleccionado [53]

Marca	<i>Allegro MicroSystems, LLC</i>
Dimensiones (L x W x H)	3.1 x 1.3 x 1.1 cm
Peso	3 gr.
Modelo de chip	ACS712
Voltaje de alimentación	5V
Rango de medición	$\pm 5 \text{ A}$, $\pm 20 \text{ A}$, $\pm 30 \text{ A}$
Tipo de señal de salida	Analógica
Rango de op. Señal de salida	0.5 – 4.5 V
Precio por unidad	8.77 US \$

3.1.6. Sensor de velocidad y de posicionamiento

Para facilitar la lectura de velocidad y posicionamiento del *dolly* sobre el riel se recomienda el uso de un encoder incremental, dicho dispositivo estará acoplado a la polea conductora. El sensor seleccionado presenta las características mostradas en la Tabla 11:

Tabla 11. Características del encoder incremental seleccionado [54]

Compañía	<i>Scancon</i>
Modelo	SCH50IF
Voltaje de alimentación	4,5Vdc – 30Vdc
Voltaje de salida	Alto: ($V_{in} - 0,6$) @ -10 mA Bajo: (500mV) @ 10 mA
Corriente de salida por canal	Máx. 30 mA
Respuesta de frecuencia	Hasta 300 KHz
Resolución	1024 pulsos por revolución
Formato de salida	2 canales en cuadratura y 1 canal de referencia
Carga del eje hueco	50 N (axial y radial)
Material	Aluminio
Masa	180 gr
Precio	140,60 €
Garantía	12 meses

3.2. Cabezal

A continuación se seleccionarán los elementos de accionamiento de los movimientos de la cámara (paneo y *tilt*).

3.2.1. Dimensionamiento del motor de paneo

En la escogencia del motor para el movimiento del paneo de la cámara se considera lo siguiente: tanto el piñón del motor como el engranaje del cabezal deben ser de dientes rectos, además deben ser compatibles entre sí, esto se asegura seleccionando ambos elementos con el mismo módulo (relación entre el número de

dientes y el diámetro primitivo del piñón) y ángulo de presión (20 grados) [55]. Se ha decidido usar engranajes módulo 1 (M1) puesto que el grosor del piñón es suficiente para esta aplicación, por último, se considera una relación de 1:5 para facilitar el movimiento, lo que quiere decir que si el piñón del motor tiene 20 dientes, el engranaje del cabezal deberá tener 100 dientes.

La velocidad máxima del paneo es de 72 grados/s (1,256 rad/s) y la masa total estipulada es de 20 Kg.

Para determinar el torque necesario para mover la carga se recurre a la ecuación (11):

$$\tau_{\text{pan}} = J_{\text{pan}} \cdot \dot{\omega}_{\text{pan}} + f_{\text{pan}} \cdot \omega_{\text{pan}} + T_L \quad (11)$$

Donde;

τ_{pan} : Torque necesario para mover la carga del cabezal [N.m]

J_{pan} : Inercia de la carga [Kg. m²]

$\dot{\omega}_{\text{pan}}$: Aceleración angular del movimiento del paneo del cabezal [rad / s²]

f_{pan} : Fricción asociado al movimiento del paneo del cabezal [N / s]

ω_{pan} : Velocidad angular del movimiento del paneo del cabezal [rad / s]

T_L : Torque de carga [N.m]

Considerando que ninguna fuerza adicional es aplicada para impedir el movimiento y que la fricción es despreciable, se obtiene:

$$\tau_{\text{pan}} = J_{\text{pan}} \cdot \dot{\omega}_{\text{pan}} \quad (12)$$

De manera que habrá que determinar la aceleración angular máxima y la inercia rotacional del conjunto, para así obtener el torque máximo. El movimiento de paneo se realizará a través de la relación piñón motor – engranaje (1:5) como lo muestra la Figura 36.

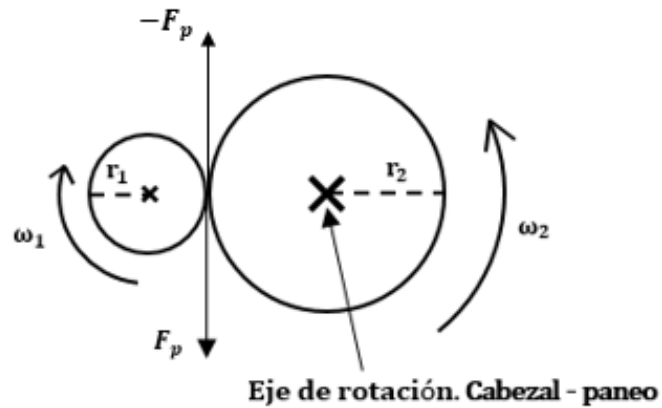


Figura 36. Aplicación de una fuerza motora para el paneo de la cámara

Se desea que el valor de velocidad angular máxima otorgado por el operador se alcance en un tiempo entre uno (1) y tres (3) segundos (tiempo de aceleración y frenado del movimiento que puede ser ajustado con un potenciómetro), de manera que el momento de mayor aceleración del cuerpo ocurre cuando el tiempo para llegar a la velocidad máxima es menor, en este caso, un (1) segundo. Con este análisis se tiene que el cuerpo tendrá una aceleración angular máxima de $1,256 \text{ rad/s}^2$.

La velocidad de giro del motor necesaria para lograr 1,256 rad/s (12 rpm) en el movimiento del paneo, se obtiene de la ecuación (13):

$$\omega_m = \frac{\omega_{\text{pan}}}{r_p} \quad (13)$$

Donde;

r_p : Relación de reducción de velocidad

ω_{pan} : Velocidad angular del movimiento del paneo [rad/s]

ω_m : Velocidad angular del motor de paneo [rad/s]

Lo cual se obtiene una velocidad angular del motor de:

$$\omega_m = \frac{1,256 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{1/5} = 6,28 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Lo que equivale a 60 rpm según lo expresado en la ecuación (14):

$$N_{\text{Paneo}} = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega_m \quad (14)$$

Se considera una inercia equivalente para el estudio, esta será la de un cilindro sólido con un radio de 25 cm que rota sobre su eje principal, tal y como se muestra en la Figura 37.

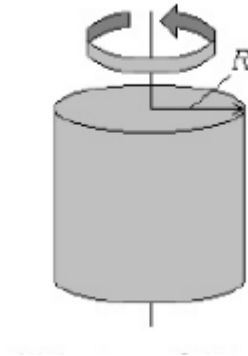


Figura 37. Carga inercial equivalente para estimar la inercia durante el paneo de la cámara [56]

El cálculo de la inercial equivalente se puede realizar aplicando la ecuación:

$$J_{\text{pan}} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot R^2 \quad (15)$$

Donde;

M: Masa del cabezal [Kg]

R: Radio del cilindro de la masa inercial equivalente [m]

El resultado de la inercia de la carga del cabezal es el siguiente:

$$J_{\text{pan}} = \frac{1}{2} \cdot 20 \text{ Kg} \cdot (0,25 \text{ m})^2 = 0,625 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

Con los datos hallados anteriormente se podrá estimar el torque requerido para acelerar la carga con la ecuación (12):

$$\tau_{\text{pan}} = J_{\text{pan}} \cdot \dot{\omega}_{\text{pan}} = 0,625 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 1,256 \text{ rad/s}^2 = 0,785 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Asimismo, el torque inercial que debe aplicar el motor al sistema reductor para acelerar la carga deberá ser:

$$\tau_{\text{m}} = r_{\text{p}} \cdot \tau_{\text{pan}} \quad (16)$$

Donde;

r_{p} : Relación de reducción de velocidad

τ_{m} : Torque del motor para el paneo [N.m]

τ_{pan} : Torque del paneo del cabezal [N.m]

$$\tau_{\text{m}} = \left(\frac{1}{5} \right) \cdot 0,785 \text{ N} \cdot \text{m} = 0,157 \text{ N} \cdot \text{m}$$

3.2.2. Dimensionamiento del motor de inclinación (*tilt*)

Para dimensionar el motor que se encargará de ejecutar el movimiento de la inclinación de la cámara (*tilt*), se consideran ciertos parámetros, estos son el peso, la aceleración máxima y la velocidad máxima de la carga.

La Figura 38 muestra el comportamiento del movimiento en estudio. La cámara se inclina de un lado a otro de la misma manera que lo hace un péndulo.

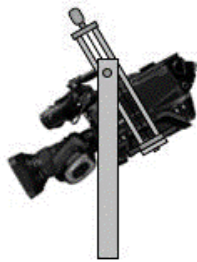


Figura 38. Movimiento de inclinación de la cámara (*tilt*)

Para ejecutar el movimiento, el motor actuará sobre un sistema de engranaje reductor similar a lo que se observa en la Figura 39, donde el eje de rotación del movimiento pasa por el centro del engranaje de mayor radio. La relación de reducción es de 1:2,5, los engranajes son módulo 1 (M1) y tienen un ángulo de presión de 25 grados [57].

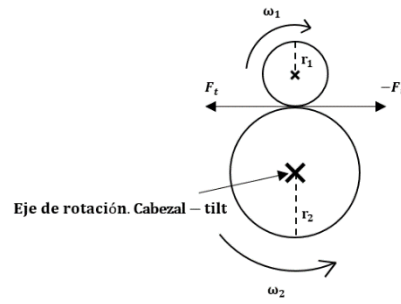


Figura 39. Sistema reductor de velocidad para el movimiento de inclinación de la cámara

Recurriendo a la ecuación (17), se podrá estimar el valor del torque requerido para mover y mantener la carga.

$$\tau_{\text{tilt}} = J_{\text{tilt}} \cdot \dot{\omega}_{\text{tilt}} + f_{\text{tilt}} \cdot \omega_{\text{tilt}} + T_L \quad (17)$$

Donde;

τ_{tilt} : Torque aplicado por el motor del *tilt* [N.m]

J_{tilt} : Inercia de la carga [Kg. m²]

$\dot{\omega}_{\text{tilt}}$: Aceleración angular del movimiento del *tilt* de la cámara [rad / s²]

f_{tilt} : Fricción asociado al movimiento del *tilt* de la cámara [N / s]

ω_{tilt} : Velocidad angular del movimiento del *tilt* de la cámara [rad / s]

T_L : Torque de carga gravitatorio [N.m]

Despreciando el efecto de la fricción se tiene que:

$$\tau_{\text{tilt}} = J_{\text{tilt}} \cdot \dot{\omega}_{\text{tilt}} + T_L \quad (18)$$

$$T_1 = J_{\text{tilt}} \cdot \dot{\omega}_{\text{tilt}} \quad (19)$$

La aceleración de la carga es ajustada a través de un potenciómetro, pues este determina el tiempo en alcanzar el valor de velocidad dado por el operador. El tiempo de aceleración y frenado del movimiento está entre un rango de un (1) y tres (3) segundos. Se ha definido un recorrido total del movimiento de inclinación de la cámara a 120 grados ó $\frac{2\pi}{3}$ rad y la velocidad angular máxima de 1,047 rad/s (10 rpm). El momento de mayor aceleración de la cámara ocurre cuando el tiempo para alcanzar la velocidad máxima es menor, es decir, un (1) segundo, por lo que la aceleración angular de la carga será de $1,047 \text{ rad/s}^2$.

Para determinar la inercia del movimiento se considera un conjunto inercial equivalente al conformado por elementos cuyos momentos de inercia son conocidos. El conjunto inercial lo constituye una barra rígida de longitud 25 cm y masa de 2 Kg y una esfera ubicada a un extremo de la barra de radio 12,5 cm y masa de 10 Kg. El eje de rotación estará en el otro extremo de la barra como lo muestra la Figura 40:

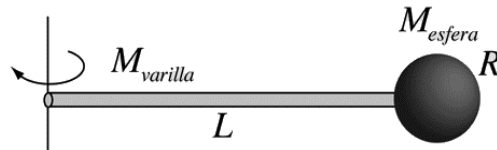


Figura 40. Modelo inercial equivalente para el movimiento de *tilt* de la cámara [58]

El cálculo de la inercia equivalente se puede realizar a través de la ecuación (20):

$$J_{\text{tilt}} = \frac{1}{3} \cdot M \cdot L^2 + \frac{2}{5} \cdot m \cdot R^2 + m \cdot (L + R)^2 \quad (20)$$

Donde;

M: Masa de la barra [Kg]

L: Longitud de la barra [m]

m: Masa de esfera [Kg]

R: Radio de la esfera [m]

El resultado de la inercia del conjunto de la cámara es el siguiente:

$$J_{\text{tilt}} = \frac{1}{3} \cdot 2 \text{ Kg} \cdot (0,25 \text{ m})^2 + \frac{2}{5} \cdot 10 \text{ Kg} \cdot (0,125 \text{ m})^2 + 10 \text{ Kg} \cdot (0,25 \text{ m} + 0,125 \text{ m})^2$$

$$J_{\text{tilt}} = 1,51 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

Con los datos hallados anteriormente se podrá estimar el torque de la parte inercial de la carga con la ecuación (18):

$$T_1 = J_{\text{tilt}} \cdot \dot{\omega}_{\text{tilt}} = 1,51 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 1,047 \text{ rad/s}^2 = 1,581 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Adicionalmente, existe una fuerza externa (fuerza de gravedad). El cálculo a realizar a continuación consiste en determinar el par que aporta la carga (T_L) en la condición más desfavorable, es decir, cuando la cámara tiene un desvío de 60 grados

respecto a su posición de equilibrio. La Figura 41 muestra el diagrama de cuerpo libre.

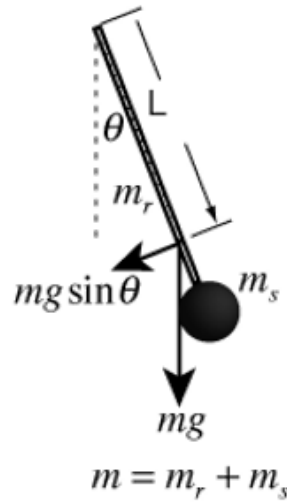


Figura 41. Diagrama de cuerpo libre equivalente durante el *tilt* de la cámara [59]

Según lo mostrado en la Figura 41, el cálculo del torque de la carga se puede realizar empleando la ecuación (21):

$$T_L = m \cdot g \cdot \text{sen} \theta \cdot L \quad (21)$$

Donde,

m : Masa de la esfera + barra rígida [Kg]

g : Aceleración de la gravedad [m/s^2]

L : Longitud de la barra [m]

θ : Ángulo de desvío del movimiento de *tilt* [rad]

Lo que da un resultado de:

$$T_L = 12 \text{ Kg} \cdot 10 \frac{m}{s^2} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{3}\right) \cdot 0,25m = 25,98 \text{ N} \cdot m$$

Sumando ambos resultados se obtiene un torque máximo de:

$$\tau_{\text{tilt}} = T_1 + T_L = 1,581 \text{ N} \cdot m + 25,98 \text{ N} \cdot m = 27,56 \text{ N} \cdot m$$

Asimismo, el torque que debe aplicar el motor al sistema reductor es:

$$\tau_{\text{mt}} = r_t \cdot \tau_{\text{tilt}} \quad (22)$$

Donde;

r_t : Relación de reducción de velocidad de *tilt*

τ_{mt} : Torque del motor para el *tilt* [N.m]

τ_{tilt} : Torque del *tilt* del cabezal [N.m]

$$\tau_{\text{mt}} = \left(\frac{1}{2,5}\right) \cdot 27,56 \text{ N} \cdot m = 11,02 \text{ N} \cdot m$$

Para calcular la velocidad de giro del motor y lograr los 10 rpm en el movimiento del *tilt*, se recurre a la ecuación (13):

$$\omega_{mt} = \frac{\omega_{tilt}}{r_t} \quad (23)$$

Donde;

r_t : Relación de reducción de velocidad

ω_{tilt} : Velocidad angular del movimiento de *tilt* [rad/s]

ω_{mt} : Velocidad angular del motor de *tilt* [rad/s]

Lo cual se obtiene una velocidad angular del motor de:

$$\omega_{mt} = \frac{1,047 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{1/2,5} = 2,618 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

La velocidad del piñón del motor en rpm viene dada por la ecuación (24), lo que da un resultado de 25 rpm.

$$N_{tilt} = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega_{mt} \quad (24)$$

3.2.3. Selección del tipo de motor eléctrico

Se debe definir qué tipo de motores se usarán para el cabezal, en este caso se tomaron en consideración tres alternativas, los motorreductores de corriente continua

con escobillas, los motorreductores electrónicamente conmutados y los motores de paso, ya que son los más comunes que se pueden conseguir en el mercado para este tipo de aplicaciones. La Tabla 12 muestra las características de cada uno:

Tabla 12. Características de los tipos de motores tomados en consideración para el cabezal [45] - [47] - [46]

Características	Motorreductor de corriente continua con escobillas	Motorreductor electrónicamente conmutado	Motor de paso
Costo del motor	Moderadamente costoso	Costoso	Económico
Mantenimiento	Constante	Esporádico	Esporádico
Costo de mantenimiento	Económico	Económico	Económico
Vida útil	Media	Larga	Larga
Eficiencia	Media	Alta	Baja
Rango de velocidades	Amplio	Amplio	Corto
Rango de operación del torque	Amplio	Amplio	Corto
Control de velocidad	Fácil	Complejo	Complejo
Control de posición	Complejo	Fácil	Fácil
Tiempo de respuesta del motor	Lento	Rápido	Lento

La información recopilada en la Tabla 12 permitirá seleccionar el tipo de motor más apropiado para los movimientos de la cámara.

El atractivo de los motores de paso es que permiten el control de posición a lazo abierto, también porque son los motores más económicos del mercado. La desventaja de estos motores es que son poco eficientes, también hay que tener

cuidado con el modo de operación durante la aceleración y el frenado del motor ya que se pueden presentar movimientos bruscos durante esta etapa si no se controlan adecuadamente.

Los motores electrónicamente conmutados son excelentes para aplicaciones que exigen altas velocidades de movimiento, se caracterizan por ser altamente eficientes y gracias a su encoder incorporado se puede determinar la posición del motor, sin embargo, es la alternativa más costosa debido a sus excelentes propiedades mecánicas.

Los motorreductores son los modelos más comunes que se pueden conseguir en el mercado, son ampliamente usados en aplicaciones que exigen regulación de velocidad debido a su facilidad de control. Gracias a su caja reductora incorporada, los motorreductores pueden otorgar un alto par de arranque. El inconveniente de estos motores es el mantenimiento, puesto a que las escobillas se desgastan cada cierto tiempo y, por lo tanto, es necesario un mantenimiento constante.

Para esta aplicación se ha decidido usar un par de motorreductores de corriente continua ya que permiten regular la velocidad con gran facilidad y porque son motores que no requieren de una alta inversión inicial, por esta razón es que en muchos modelos comerciales de cabezales usan este tipo de motores.

3.2.3.1. Selección del motor de paneo

Dentro de los numerosos modelos y fabricantes existentes en el mercado, se decidió optar por los motores fabricados por *Faulhaber* debido a su amplia gama de modelos, documentación extensa y calidad de sus productos.

Las exigencias de la carga para el movimiento del paneo son las siguientes:

- (a) Velocidad máxima de operación del motor: 60 rpm.
- (b) Torque necesario del motor para mover la carga: 0,157 N. m

Según las especificaciones técnicas del fabricante, el primer paso para la selección del motor es escoger la caja reductora apropiada. Del catálogo que propone el proveedor se decidió escoger uno de la serie 38A ya que pueden soportar sin problemas las condiciones de fuerza y torque que debe entregar el motor a la carga. La serie 38A contiene un abanico de opciones que permite elegir la relación de reducción apropiada para la aplicación, como se quiere obtener una velocidad de giro máxima de 60 rpm, la opción que más se asemeja a las exigencias del diseño es el reductor con una relación de 45:1. El fabricante recomienda usar el reductor a velocidades de entrada inferiores a las 4500 rpm [60]. La Tabla 13 muestra las características del reductor seleccionado:

Tabla 13. Características de la caja reductora para el motor del paneo [60]

Marca	<i>Faulhaber</i>
Tipo	Planetario
Serie	38A
Relación	45:1
Eficiencia	90 %
Fuerza axial máxima	200 N
Fuerza radial máxima	200 N
Velocidad de entrada máxima	4500 rpm
Torque continuo	Hasta 20 N.m
Torque intermitente	Hasta 32 N.m
Peso	330 gr.
Dimensiones (L x D)	67,6 x 38 mm
Dimensiones del eje (L x D)	23 x 10 mm

Del catálogo de *Faulhaber* se ha escogido un motor en el cual supere las exigencias de torque de la aplicación en un 100%, esto según las especificaciones técnicas del fabricante [61]. En este caso, se conoce que el torque requerido para mover la carga es de 0,157 N.m, lo que quiere decir que el torque a la entrada del reductor se verá disminuido por su relación y la eficiencia de mecanismo reductor como lo indica la ecuación (25):

$$\tau_{\text{motor pan}} = \frac{\tau_{\text{pan}}}{n_{\text{pan}} \cdot \left(\eta_{\text{reductor pan}} / 100 \right)} \quad (25)$$

Donde;

$\tau_{\text{motor pan}}$: Torque de entrada a la caja reductora [mN.m]

τ_{pan} : Torque que exige la carga (salida de la caja reductora) [mN.m]

n_{pan} : Relación de reducción de la caja reductora del motor *pan*

$\eta_{\text{reductor pan}}$: Eficiencia de la caja reductora del motor *pan*

Dando un resultado igual a:

$$\tau_{\text{motor pan}} = \frac{157 \text{ mN.m}}{45. \left(\frac{90}{100}\right)} = 3,877 \text{ mN.m}$$

De manera que se recomienda utilizar un motor de torque nominal superior a los 8 mN.m y que sea compatible con la caja reductora escogida.

Las especificaciones del motor seleccionado están presentes en la Tabla 14:

Tabla 14. Especificaciones del motor seleccionado para el paneo de la cámara [62]

Tipo de motor	Micromotor DC – Escobillas
Serie	3890H036CR
Voltaje nominal	36 V
Resistencia del motor	0,78 Ω
Potencia de salida	Hasta 401 W
Máxima eficiencia	87 %
Velocidad sin carga	5400 rpm
Corriente sin carga	0,161 A
Torque rotor bloqueado	2887 mN.m
Constante de torque (Km)	63,65 mN.m
Inductancia del rotor	240 μH
Inercia del rotor	171 g.cm ²
Torque nominal	222 mN.m
Corriente nominal	4,3 A
Velocidad nominal	5350 rpm
Dimensiones (L x D)	97,5 x 38 mm
Peso	550 gr.

El motor de paneo puede estar sobredimensionado respecto a las exigencias de torque, sin embargo, durante las pruebas del modelado del motor en conjunto con la carga a través del programa de simulación *Simulink* se obtuvo que el motor seleccionado tiene una respuesta rápida, permitiendo la aceleración de la carga a los valores exigidos en las condiciones de diseño.

3.2.3.2. Selección del motor de *tilt*

Las exigencias de la carga para el movimiento de *tilt* son las siguientes:

- (a) Velocidad máxima de operación del motor: 25 rpm.
- (b) Torque necesario del motor para mover la carga: 11,02 N. m.

El proceso de selección de la caja reductora y del motor para la aplicación es similar al realizado para el motor de paneo. Se tomó la decisión de escoger la misma serie de caja reductora usada en el motor del paneo (serie 38A), de las alternativas presentes en esta serie, la relación de reducción que mejor se adapta es la 100:1

Ahora se procede a la búsqueda del motor dentro del catálogo propuesto por *Faulhaber* recordando escoger uno que pueda otorgar a la entrada de la caja reductora al menos el doble del torque exigido por la aplicación. En este caso, se conoce que el torque requerido para mover la carga es de 11,02 N.m, lo que quiere decir que el torque a la entrada del reductor se verá disminuido por su relación y la eficiencia de mecanismo reductor como lo muestra la ecuación (26):

$$\tau_{\text{motor tilt}} = \frac{\tau_{\text{tilt}}}{n_{\text{tilt}} * (\eta_{\text{reductor tilt}}/100)} \quad (26)$$

Donde;

$\tau_{\text{motor tilt}}$: Torque de entrada a la caja reductora [N.m]

τ_{tilt} : Torque que exige la carga (salida de la caja reductora) [N.m]

n_{tilt} : Relación de reducción de la caja reductora del motor *tilt*

$\eta_{\text{reductor tilt}}$: Eficiencia de la caja reductora del motor *tilt*

Lo que da un resultado de:

$$\tau_{\text{motor tilt}} = \frac{11,02 \text{ N.m}}{100 * (90/100)} = 0,122 \text{ N.m}$$

De manera que se recomienda utilizar un motor de torque superior a los 0,244 N.m y que sea compatible con la caja reductora escogida. Las características del motor seleccionado se pueden apreciar en la Tabla 15.

El precio de ambos motores (incluyendo la caja reductora y un encoder incremental) es de 350 US\$. La duración de la garantía es de 18 meses. [63]

Tabla 15. Especificaciones del motor seleccionado para el *tilt* de la cámara [58]

Tipo de motor	Micromotor DC – Escobillas
Serie	3890H048CR
Voltaje nominal	48 V
Resistencia del motor	1,38 Ω
Potencia de salida	Hasta 406 W
Máxima eficiencia	88 %
Velocidad sin carga	5400 rpm
Corriente sin carga	0,121 A
Torque rotor bloqueado	2911 mN.m
Constante de torque (Km)	84,86 mN.m
Inductancia del rotor	430 μ H
Inercia del rotor	171 g.cm ²
Torque nominal	224 mN.m
Corriente nominal	3,2 A
Velocidad nominal	5360 rpm
Dimensiones (L x D)	97,5 x 38 mm
Peso	550 gr.

En caso de usar el encoder las especificaciones se pueden apreciar en la Tabla 16:

Tabla 16. Características del encoder incremental para los motores del cabezal [64]

Modelo	IE3 - 1024
Resolución	1024 pulsos por revolución
Frecuencia máx. de operación	430 KHz
Tipo de salidas	2 canales en cuadratura y un canal de referencia
Voltaje de alimentación	4,5Vdc – 5,5Vdc
Corriente de consumo	Máx. 23 mA
Corriente de salida por canal	Máx. 4 mA
Niveles de tensión de canales	Bajo: < 0,4Vdc Alto: > 4,5Vdc
Dimensiones (D x L)	22 x 18,1 mm

3.2.4. Selección del *driver* para los motores del cabezal

Luego de una investigación en el mercado, se ha llegado a la conclusión de analizar las tres (3) alternativas mostradas en la Tabla 17. Estos dispositivos tendrán como objetivo accionar los motores del cabezal.

Con la información recopilada y que se ve reflejada en la Tabla 17 se podrá realizar una comparación de los productos para seleccionar el driver que se ajusta más a las exigencias del diseño. Para facilitar el control del motor resulta conveniente que el driver tenga incorporado un sistema de monitoreo de corriente y que sea capaz de indicar al sistema de control la ocurrencia del evento. El modelo *SyRen10* no cuenta con un pin de salida que permita indicar errores por lo que de escoger esa opción es recomendable usar un sensor de corriente. El modelo *EM – 176* tiene la característica de ajustar la rampa de aceleración y frenado por medio de un potenciómetro, además, permite monitorear la corriente a través de un pin de salida analógica, sin embargo, cuenta con la desventaja de que el control es a través de un nivel de tensión analógico, lo que implica el diseño de un filtro pasabajo para que el microcontrolador seleccionado pueda controlar el motor por medio de una señal *PWM*.

Tabla 17. Datos relevantes de los *drivers* a ser comparados [65] - [66] - [67] - [68] - [69]

Características / Fabricante	<i>Dimension Engineering</i>	<i>Electromen</i>	<i>DF Robot</i>
Modelo	<i>SyRen10</i>	<i>EM – 176</i>	<i>DC Motor Driver 2x15A Lite</i>
Voltaje de entrada	6 – 24 V	12 – 35 V	4.8 – 35 V
Corriente pico	20 A @ 18 V	10 A @ Ta < 50 °C	20 A @ 13.8 V
Corriente continua	15 A @ 18 V	15 A	15 A @ 13.8 V
Frecuencia máx. PWM	32 KHz	25 KHz	25 KHz
Dimensiones (L x W x H)	57 x 35 x 14 mm	73 x 65 x 30 mm	73 x 68 x 14 mm
Peso	26 gr.	100 gr.	-----
Notas adicionales	<p>Permite controlar un solo motor. Usar batería en paralelo en caso de alimentar con fuente de poder. Frenado regenerativo. Protección contra exceso de temperatura y corriente. Hasta 4 modos de operación. Control de velocidad por medio de señal analógica 0 – 5 V.</p>	<p>Permite controlar un solo motor. Usar batería en paralelo en caso de alimentar con fuente de poder. Frenado regenerativo. Control de velocidad por medio de señal analógica (0 – 5 V). Permite el monitoreo de la corriente del motor. Ajuste de rampa de aceleración y frenado (0 – 3 s). Protección contra exceso de voltaje (39 V).</p>	<p>Permite controlar 2 motores. Frenado regenerativo. Aislamiento galvánico para protección del microcontrolador. Salida digital que indica exceso de corriente. Protección contra exceso de temperatura y de voltaje. Control de velocidad por medio de señal PWM.</p>
Precio	50.00 US \$	77.19 US \$	43.15 US \$
Garantía	12 meses	12 meses	12 meses

El modelo propuesto por el fabricante *DF Robot* tiene la particularidad de controlar hasta dos motores, cuenta con un conjunto de pines de salida digitales que indican la ocurrencia de exceso de corriente sobre la placa, adicionalmente, cuenta con la ventaja de que se puede controlar directamente la velocidad con una señal *PWM*, la desventaja de este *driver* es que no posee la característica de ajuste de rampa de aceleración y frenado, sin embargo, este problema se puede solucionar a través del diseño de un filtro digital por *software*.

Tomando en cuenta todas las consideraciones anteriores, se ha tomado la decisión de escoger el *driver* propuesto por *DF Robot* ya que proporcionar el control de (2) dos motores con la adquisición de un solo *driver*. La Figura 42 muestra la tarjeta:

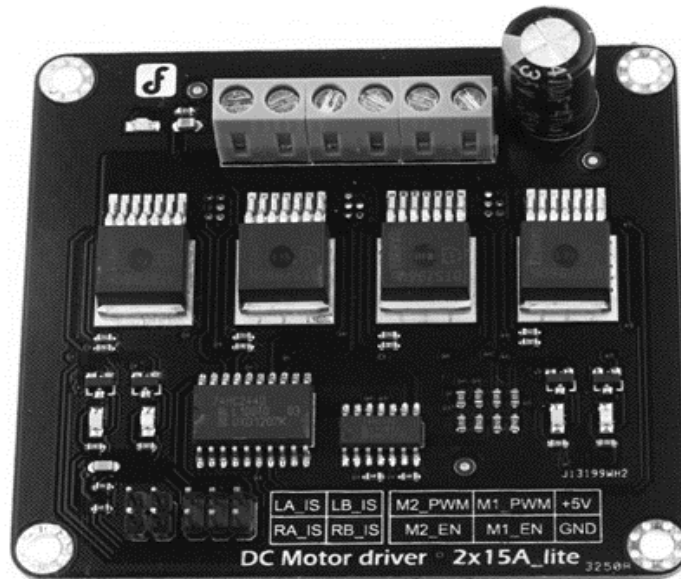


Figura 42. *DF Robot DC Motor driver 2x15A lite* [68]

El modo de control del *driver* seleccionado es explicado en la Tabla 18:

Tabla 18. Modo de control del *driver* seleccionado [68]

5 V	Para alimentar placa del driver
GND	Terminal de referencia
M1_PWM	Pin de control de velocidad M1
M2_PWM	Pin de control de velocidad M2
M1_EN	Pin de dirección de giro M1
M2_EN	Pin de dirección de giro M2
LA_IS RA_IS	Monitoreo de corriente M1. Conectar ambos pines de salida del <i>driver</i> al mismo pin de monitoreo por el microcontrolador.
LB_IS RB_IS	Monitoreo de corriente M2. Conectar ambos pines de salida del <i>driver</i> al mismo pin de monitoreo por el microcontrolador.

La Tabla 18 indica el modo de operación del *driver*. La regulación de velocidad de los motores se realiza a través de un par de pines de entrada en el cual se debe ingresar una señal *PWM*. La tarjeta cuenta con un par de entradas digitales que determinarán el sentido de giro de los motores de acuerdo al nivel lógico (compatible con *TTL*). Las salidas digitales “LA_IS” y “RA_IS” indican al sistema de control un evento de exceso de corriente en el motor, ambas salidas deben estar puenteadas entre sí como lo indica el manual de operación, lo mencionado anteriormente también aplica para las salidas digitales “LB_IS” y “RB_IS”.

3.3. Foco

Generalmente, los camarógrafos manipulan el anillo de enfoque manualmente o con un mecanismo conformado por el *focus outlet*, una guaya y un mando de control como se puede apreciar en la Figura 43. El *focus outlet* será el encargado de modificar la posición del anillo por medio de un conjunto de engranajes cuyo piñón es compatible con el anillo, tal elemento estará sujeto al lente gracias a las ranuras que dispone el cuerpo del lente (ver Figura 44).



Figura 43. Mecanismo para el manejo del anillo de enfoque a distancia. [70]



Figura 44. *Focus outlet* marca *Fujinon* (izquierda), marca *Canon* (derecha)

Sin embargo, para las distancias contempladas entre el camarógrafo y el equipo no es una opción viable, por lo que se deberá encontrar la manera de automatizar el mecanismo de enfoque.

Se plantea un par de alternativas con el fin de controlar el anillo remotamente. La primera opción consiste en acoplar un motor eléctrico al *focus outlet* con la intención de sustituir el movimiento mecánico realizado entre el mando de operación y la guaya. La otra propuesta consiste en buscar en el mercado un mecanismo de control automatizado del anillo.

Para determinar cuál opción es la más adecuada se tuvo contacto con varios profesionales expertos en materia de ingeniería mecánica con el fin de tomar nota de las sugerencias y las metodologías a seguir respecto al diseño de la pieza. Las reuniones arrojaron la misma conclusión, para los efectos del trabajo de grado lo recomendable es buscar un modelo comercial que permita el accionamiento remoto del anillo de enfoque ya que puede ser complicado elaborar un diseño de la pieza para acoplar el motor con el *focus outlet*. Tomando en consideración estas opiniones se procede a investigar el mercado para obtener algunas propuestas de los posibles mecanismos a usar para controlar el anillo de enfoque.

3.3.1. Selección del mecanismo de enfoque

Antes de realizar la búsqueda del mecanismo de enfoque se recopiló información de algunos parámetros importantes que se deberán cumplir para el correcto funcionamiento de control. Los parámetros son los siguientes:

- (a) Diámetro del cuerpo del lente.
- (b) Rango de operación del anillo.
- (c) Peso del lente.

Las marcas de lentes que predominan en la empresa son *Fujinon* y *Canon*. Cada marca posee características que diferencian una de la otra, sin embargo, coinciden en el modo de manipulación del lente. El tamaño del lente depende de la aplicación a ser usado, por lo general, los lentes de amplio recorrido de la longitud focal son los de mayor tamaño y masa, por lo que se ha decidido acotar las opciones para asegurar que no se exceda la masa de la carga del cabezal seleccionado. Con lo dicho anteriormente, se estableció que los lentes a usar no superarán los 2 Kg de masa, tendrán un rango de movimiento del anillo inferior a los 150° y con un diámetro del cuerpo del lente no mayor a los 75 mm. Estas condiciones son el denominador común de los modelos disponibles en la empresa.

Lo más importante a tener en cuenta durante la búsqueda del mecanismo es que permita controlar el anillo de enfoque en todo su rango de operación y que además pueda ser capaz de ser acoplado al cuerpo de los lentes estipulados, sobretodo en el de mayor diámetro del cuerpo.

La búsqueda permitió encontrar un par de alternativas que pudieran funcionar para el diseño, estas serán comparadas de acuerdo a las condiciones establecidas.

De acuerdo a lo que indica la Tabla 19, el modelo *RFC – 144* sólo es compatible con lentes de 60 y 67 mm de diámetro, lo que reduce las posibilidades de

usar el mecanismo con los lentes disponibles en la empresa. Por otro lado, el proveedor del modelo *ZR3000F* tiene la particularidad de elaborar un mecanismo que se adapte a las necesidades del cliente, de manera que lo más conveniente será optar por el modelo propuesto por el proveedor *JonyJib*. Hay que mencionar que lo que se desea en el producto es el mecanismo que se ajustará en el lente ya que el modo de control será diseñado durante el desarrollo del trabajo de grado, no obstante, el producto deberá ser adquirido con todos los accesorios y al precio mencionado en la tabla anterior.

Tabla 19. Características de las opciones a considerar para el control del foco [71] - [72]

Características / Proveedor	<i>EZ FX</i>	<i>JonyJib</i>
Modelo	<i>RFC – 144</i>	<i>ZR3000F</i>
Notas relevantes	Incluye servomotor, piñones para lentes <i>Canon</i> y <i>Fujinon</i> , ensamble al lente, unidad de control, extensión de cable, paquete de baterías para alimentación, maleta de viaje. Modelo compatible solo con lentes de 60 y 67 mm de diámetro.	Incluye servomotor, piñón del servo (para lentes <i>Canon</i> y <i>Fujinon</i>), ensamble al lente, unidad de control, fuente de alimentación, extensión de cable (hasta 9 m). Proveedor elabora modelos de acuerdo a las necesidades del cliente.
Precio	699 US \$	1000 US \$
Garantía	12 meses	12 meses



Figura 45. Alternativas para el mecanismo de enfoque. *RFC – 144* (izquierda), *ZR3000F* (derecha) [71] [72]

Una descripción del mecanismo seleccionado se puede apreciar en la Figura 46, mientras que en la Figura 47 se muestra la pieza acoplada al cuerpo del lente.

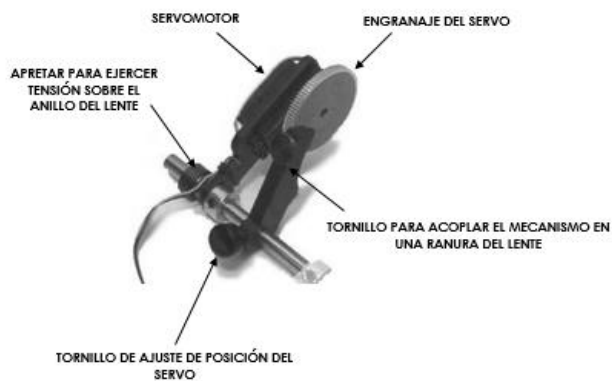


Figura 46. Pieza mecánica que permite acoplar el servo al anillo del lente. [73]



Figura 47. Mecanismo ajustado al lente de la cámara (control de foco e iris). [74]

Gracias a los datos suministrados por el proveedor se pudo determinar el modelo del servomotor usado en estos mecanismos, sus características se mencionan en la Tabla 20.

Tabla 20. Características del servomotor usado en el control del anillo de enfoque

[75]

Marca	<i>Futaba</i>
Modelo	<i>S3010</i>
Tipo de piñón	25 dientes – Metal
Dimensiones (H x W x L)	40 x 20 x 38 mm
Masa	41 g
Rango de operación	180°
Voltaje de alimentación	4.8 – 6 V
Torque	5.2 – 6.5 Kgf.cm
Ancho de pulso mínimo	1000 us
Ancho de pulso máximo	2000 us

3.4. Fuentes de alimentación de los motores del cabezal y del lente

El *driver* seleccionado para el control de los motores del cabezal puede soportar una tensión de entrada de hasta 35V y una corriente de 15A @ 13.8V, por lo que se escogerá una fuente de 24V de 300W para la alimentación de la etapa de potencia.

La fuente de poder que alimentará a los motores del cabezal tendrá las siguientes características:



Figura 48. Fuente de poder seleccionada para alimentar los motores del cabezal [76]

Tabla 21. Especificaciones de la fuente de poder para los motores del cabezal [76]

Dimensiones (L x W x H)	215 x 115 x 50 mm
Masa	1,1 Kg
Tensión de entrada	115 / 230 VAC
Voltaje	24 V
Corriente máxima	14,6 A

Potencia máxima	300 W
Notas adicionales	Protección contra sobretensión, cortocircuito y sobrecalentamiento.
Precio	26,35 US \$
Garantía	12 meses

Para el servomotor del mecanismo de enfoque, se conoce que su voltaje de operación es entre 4.8 – 6V y una corriente máxima de 1100 mA, se utilizará una fuente de poder para otorgar la energía al servo. Las características de la fuente seleccionada están en la Tabla 22.

Para detectar algún inconveniente con las fuentes de alimentación de los motores del cabezal y del lente de la cámara, así como de las baterías de los controladores, se usará un sensor de tensión que indicará al sistema de control si el voltaje aplicado está por debajo de los niveles adecuados durante la operación.

Tabla 22. Fuente de alimentación para el servomotor del enfoque [77]

Modelo	NLP40-7629J
Dimensiones (L x W x H)	10.8 x 6.35 x 2.92 cm
Masa	200 gr.
Voltaje de entrada	90 – 264 VAC (50 / 60 Hz)
Voltaje de salida	5 V – 12 V
Corriente máxima de salida	4 A – 2 A
Potencia máxima	40 W
Precio	10.95 US \$
Garantía	90 días

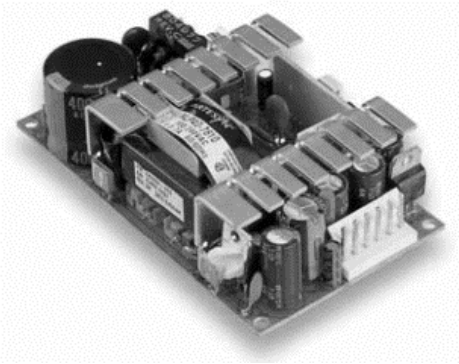


Figura 49. Fuente de alimentación de los motores del lente de la cámara [77]

3.5. Selección del sensor de voltaje.

Las especificaciones del sensor seleccionado se pueden apreciar en la Tabla 23, el sensor se muestra en la Figura 50:

Tabla 23. Características del sensor de voltaje [78]

Proveedor	<i>Icstation</i>
Dimensiones (L x W x H)	28 x 16 x 15 mm
Voltaje de alimentación	5 V
Chip principal	LM393
Rango de voltaje de detección	0 – 25 VDC
Notas adicionales	Posee potenciómetro de ajuste de referencia de tensión, salida analógica 0 – 5 VDC y un pin de salida digital <i>TTL</i> , si el valor de tensión medida es superior a la referencia la salida digital se activa “1” lógico.
Precio	6.16 US \$
Garantía	12 meses

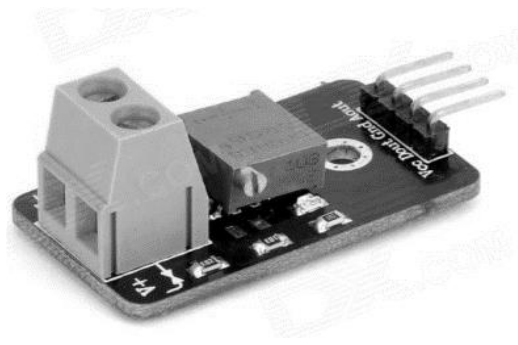


Figura 50. Sensor de voltaje [79]

3.6. Selección de los sensores de proximidad de final de carrera

Para evitar daños en el equipo es recomendable agregar al sistema un conjunto de sensores que permitan determinar la proximidad de final de carrera de los movimientos del cabezal y del *dolly*. De manera que se planteará la automatización de la detención del movimiento con sensores que detecten la presencia del objeto estando o no en contacto físico con la estructura. Existen numerosos sensores en el mercado que pueden realizar el trabajo, como los sensores magnéticos, los sensores mecánicos, etc., por lo que es necesario realizar una comparación entre ellos, especificando las ventajas y desventajas de estos dispositivos.

Evidentemente, es importante tener un conocimiento previo de las condiciones ambientales durante la operación del equipo, las características físicas del objeto a detectar, a qué distancia se requiere la detección y la disponibilidad del espacio para el sensor, de manera de elegir la opción más adecuada. En la Tabla 24 se muestran las ventajas y desventajas de los diferentes tipos sensores de proximidad.

Tomando en consideración la Tabla 25, es recomendable elegir al sensor magnético como sensor de proximidad debido a que son dispositivos económicos, de fácil operación y con la ventaja de que son insensibles al polvo y la humedad.

En el mercado existen numerosos sensores magnéticos que pueden funcionar para la aplicación planteada en este trabajo de grado. El sensor seleccionado para la detectar el final de carrera de los movimientos del equipo se puede observar en la Figura 51 y sus características se presentan en la Tabla 24:

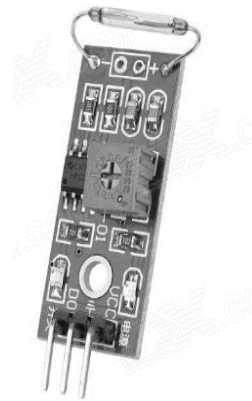


Figura 51. Sensor magnético seleccionado [84]

Tabla 24. Sensor magnético [84]

Modelo	<i>IM131122016</i>
Tipo de sensor	Magnético
Dimensiones (L x W x H)	4.0 x 1.4 x 0.7 cm
Masa	5 gramos
Alimentación	3.3 – 5.0 V
Tipo de salida	Digital – TTL
Lógica de activación	Nivel bajo – activo / nivel alto – inactivo.
Sensibilidad	Hasta 1.5 cm
Otras características	Se puede regular la distancia de operación.
Precio	3.45 US\$

Tabla 25. Comparación entre los diferentes sensores de proximidad disponibles en el mercado. [80] - [81] - [82] - [83]

Tipo de sensor	Ventajas	Desventajas
Final de carrera	Son robustos.	Requieren del contacto directo con el objeto a detectar. Son costosos. Constante mantenimiento.
Inductivo	Son robustos. No entran en contacto físico con el objeto a detectar. Tiempo de respuesta corto. Larga vida útil. Insensibles al polvo y la humedad, materiales no metálicos, etc. Brindan excelente costo-beneficio.	Son costosos. Margen de operación corto. Puede ser afectado por campos magnéticos intensos.
Magnético	Son económicos. Larga distancia de detección (hasta 120 mm – dependiendo del imán). Precisos para la detección de principios y finales de carrera. Disponibilidad de sensores de dimensiones pequeñas. Insensibles al polvo y la humedad.	Vida útil corta. Puede ser afectado por campos magnéticos intensos.
Fotoeléctrico	Rangos de medición de hasta 100 metros.	Las propiedades del objeto pueden perjudicar la detección (brillo, rugosidad).

El imán a seleccionar para la detección del *dolly* y de la cámara deberá poseer un campo magnético lo suficientemente fuerte para asegurar la activación del sistema de seguridad durante el uso del equipo. Las características del mismo se presentarán en la Tabla 26:

Tabla 26. Características del imán para los finales de carrera de la plataforma de rodaje [85]

Tipo de imán	Disco
Dimensiones (L x D)	3.125 x 0.16 cm
Masa	0.33 Oz. (9.36 g)
Material del imán	Neodimio (NdFeB). Grado N45
Orientación de la polaridad	Axial
Fuerza de atracción	7.66 Lbs. (3.47 Kgf)
Inducción magnética	13500 Gauss
Precio	1.39 US\$
Garantía	10 años. Evitar el uso en ambientes de altas temperaturas o de alta humedad.

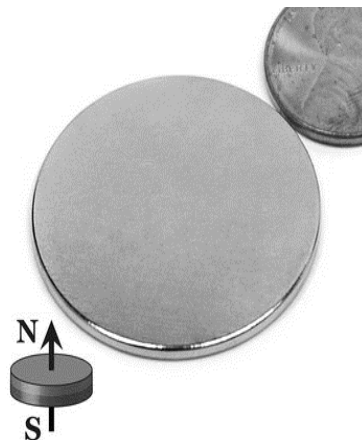


Figura 52. Imán para detectar el final de carrera de los movimientos del *dolly* y la cámara [85]

3.7. Comunicación a distancia

Existen diversos protocolos y estándares de comunicación que permiten transmitir y recibir datos a grandes distancias y que por lo general son usados en el campo de la industria, tal es el caso de *Industrial Ethernet*, *MODBUS*, *CAN Bus*, etc. También se dispone del estándar *Ethernet*, comúnmente usado para la comunicación entre dispositivos conectados a una Red de Área Local (*LAN*).

Durante la investigación se pudo notar que los estándares y protocolos de comunicación más llamativos para ser usados como el modo de comunicación a distancia entre los controladores involucrados en el diseño son el estándar *EIA - 485*, el protocolo *CAN Bus* y el estándar *Ethernet*, ya que son estándares gratuitos y ampliamente usados en la industria, por tal motivo se hará una comparación entre estas alternativas para posteriormente escoger una de ellas para el proyecto planteado.

Actualmente se pueden encontrar microcontroladores que incluyen módulos de comunicación serial dentro de su estructura interna con el objetivo de comunicarse con el mundo exterior y reducir espacios en el diseño de la placa para una determinada aplicación, tal es el caso de algunos de los microcontroladores fabricados por la casa *Microchip*, estos dispositivos disponen internamente de elementos de la capa física y de enlace de datos de los protocolos más comunes, como por ejemplo, *Ethernet* y *CAN Bus*.

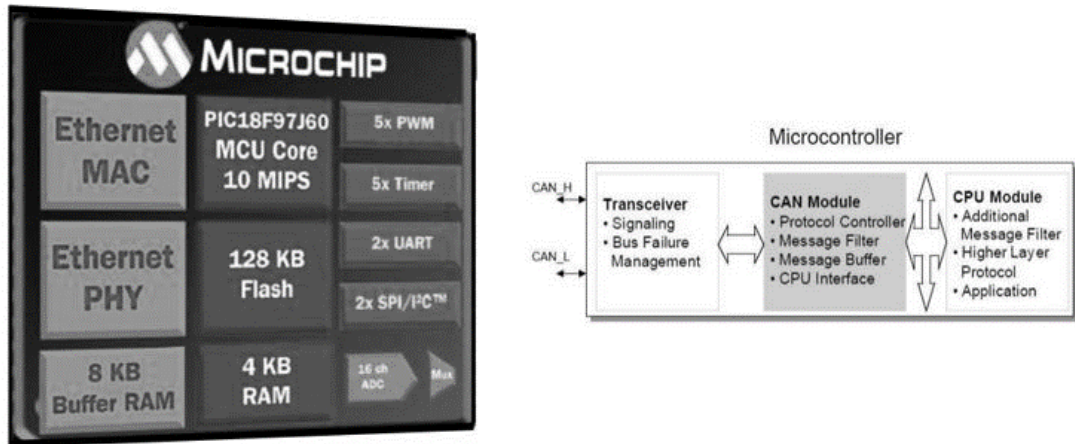


Figura 53. Capa física y de enlace de las comunicaciones *CAN Bus* y *Ethernet* incluida dentro de la arquitectura del microcontrolador [86] - [87]

De igual forma, se pueden encontrar en el mercado módulos de estos métodos de comunicación y que por medio de comunicaciones seriales de corto alcance (como *UART*, *SPI* o *I2C*) se logran comunicar con los microcontroladores que no incluyen dentro de su estructura los elementos que permiten la comunicación a distancia. Algunos ejemplos de estos módulos se pueden apreciar en la Figura 54:

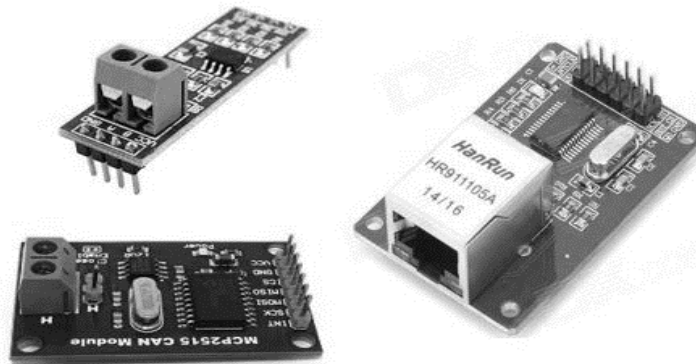


Figura 54. Módulos de comunicación *EIA – 485*, *CAN Bus* y *Ethernet* [88] - [89] - [90]

Incluso se pueden hallar transductores que son compatibles con el diseño físico de algunos modelos *Arduino* (Figura 55)

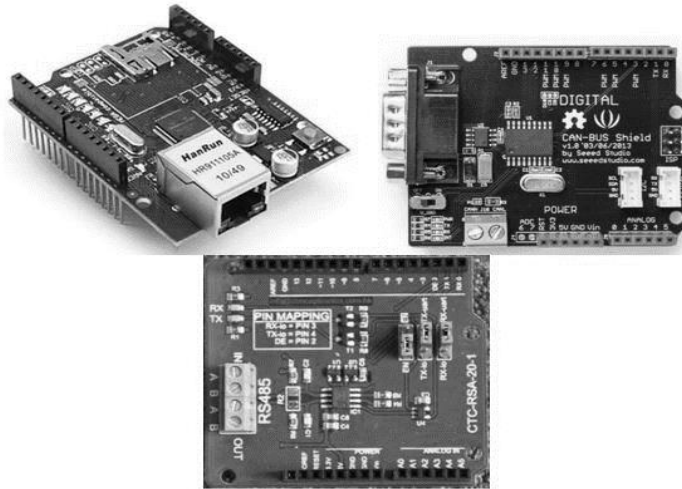


Figura 55. Módulos de comunicación *Ethernet*, *CAN Bus* y *EIA – 485* compatibles con el diseño físico de algunos modelos de *Arduino* [91] - [92] - [93]

Las características más relevantes para la investigación de cada una de las opciones se pueden apreciar en la Tabla 27:

Tabla 27. Características de cada uno de los estándares y protocolos [87] - [94] [95] - [96] - [97] - [98] - [99]

	<i>EIA – 485</i>	<i>CAN Bus</i>	<i>Ethernet</i>
Topología	Bus / Punto a punto / Anillo	Bus	Bus / Estrella / Punto a punto
Tipo de cable	Par trenzado apantallado	Par trenzado apantallado	Cable de red UTP cat. 5e
Número de nodos (sin repetidor)	Hasta 32	Hasta 110	Hasta 1024
Simultaneidad en la comunicación	<i>Half duplex / Full dúplex</i>	<i>Half duplex</i>	<i>Full duplex</i>
Tipo de comunicación	Maestro – Esclavo (<i>MODBUS</i>)	Multimaestro	-----
Método de comunicación	<i>Multicast / Broadcast (MODBUS)</i>	<i>Multicast</i>	<i>Multicast / Broadcast</i>
Velocidad de transmisión a 100 metros	1 Mb/s	500 Kbps	10 Mb/s
Acceso al medio	-----	<i>CSMA / CD + AMP</i>	<i>CSMA / CD</i>
Trama definida	No	Si	Si
Longitud de la trama	Definida por el usuario	Hasta 17 bytes	Hasta 1542 bytes
Rango de precios del transceptor	1 – 15 US\$	8 - 24 US\$	6 – 12 US\$
Aplicación	Industria	Industria automotriz	Redes de datos / Internet
Librerías gratuitas	Si (<i>MODBUS</i>)	Si	Si

Es importante además realizar un análisis definiendo las ventajas y desventajas de los posibles modos de comunicación entre los dispositivos con el fin de determinar cuál de las alternativas posee más facilidades para comprobar el funcionamiento y cuál de ellas podría ser la más beneficiosa para la empresa. Los resultados del estudio se pueden observar en la Tabla 28 y Tabla 29.

Tabla 28. Análisis comparativo de las alternativas de comunicación a distancia

	Ventajas	Desventajas
<i>EIA – 485</i>	<p>Transceptores económicos.</p> <p>Se puede usar un protocolo definido por el propio usuario.</p> <p>Se usa comúnmente con el protocolo <i>MODBUS</i> el cual es un protocolo de comunicación industrial gratuito.</p> <p>Baja inversión inicial.</p> <p>Su implementación es fácil y requiere de poco desarrollo.</p> <p>Librerías gratuitas con el protocolo <i>MODBUS RTU</i> para las tarjetas Arduino.</p>	<p>Estándar que define la capa física más no la de enlace de datos. (Protocolo de comunicación no definido).</p> <p>Tipo de comunicación maestro – esclavo.</p>
<i>CAN Bus</i>	<p>Alta inmunidad de interferencia.</p> <p>Comunicación multi – maestro. Mensaje prioritario predomina y consigue acceso al medio.</p> <p>Baja carga del bus. Mayor eficiencia de transmisión.</p> <p>Baja inversión inicial.</p> <p>Librerías gratuitas para las tarjetas Arduino.</p>	<p>Los transceptores son los más difíciles de adquirir entre las opciones estudiadas.</p>

Tabla 29. Análisis comparativo de las alternativas de comunicación a distancia

	Ventajas	Desventajas
<i>Ethernet</i>	<p>Mayor cantidad de datos enviados en una sola trama.</p> <p>Velocidades de hasta 10 Mb/s.</p> <p>Librerías gratuitas para las tarjetas Arduino.</p>	<p>Es necesario el uso de un concentrador o switch por su topología estrella.</p> <p>Mayor costo en la inversión inicial.</p> <p>Alta probabilidad de colisión de datos en el bus – se reduce el ancho de banda.</p> <p>No es recomendable su uso para entornos de alta interferencia.</p> <p>Es necesario definir una trama dentro del paquete IP que contenga las funciones a realizar y los datos a enviar.</p>

Tomando en cuenta el balance hecho entre la Tabla 28 y Tabla 29, resulta conveniente usar el protocolo *CAN* debido a su robustez y eficiencia en la transmisión de datos, las cuales son características fundamentales para cualquier aplicación que requiera de una comunicación a distancia entre varios nodos.

Una vez tomada la decisión de usar el protocolo *CAN*, se escogerá el transceptor a ser usado en el diseño, las características del mismo están mostradas en la Tabla 30. El modo de interacción con el microcontrolador será por medio de la comunicación *SPI*, del cual todos los microcontroladores disponibles en el mercado poseen este tipo de comunicación, de manera que no habrá problemas por

incompatibilidad entre estos módulos y los controladores que posteriormente serán seleccionados.

Tabla 30. Información acerca del transeptor *CAN [100]*

Fabricante	<i>Seed Studio</i>
Modelo	<i>CAN Bus Shield v1.2</i>
Voltaje de operación	5 V
Chip(s) principal(es)	MCP2515 – Controlador del bus MCP2551 – transeptor del bus
Tipo de comunicación	<i>Half – dúplex</i>
Velocidad máxima	1 Mb/s
Longitud máx. de alcance	1200 m
Notas adicionales	Se comunica con el controlador vía <i>SPI</i> . Incluye conector <i>DB – 9</i> . Compatible con algunos modelos de arduino. Tramas de formato base (identificador de 11 bits) y formato extendido (identificador de 29 bits)
Precio	20.66 €

El módulo se puede apreciar en la siguiente imagen:

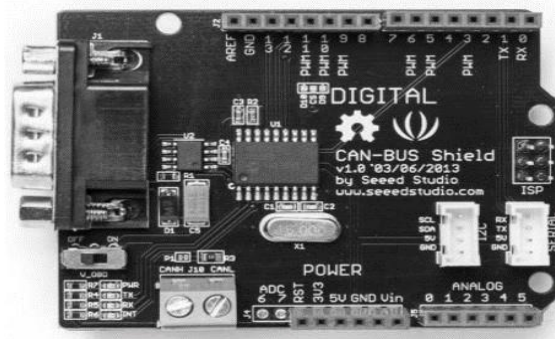


Figura 56. Módulo de comunicación *CAN [100]*

CAPÍTULO IV

Definición del sistema de control

En este capítulo se complementa la información necesaria para definir el modo de control de las variables del sistema.

4. *Dolly*

A continuación se explicará con más detalle cómo debe ser configurado el *driver* seleccionado para el accionamiento del motor. Además, se propone un circuito capaz de proporcionar los niveles de tensión adecuados para regular la velocidad del motor. Se habla además de la metodología usada para estimar la posición del *dolly* sobre el riel por medio de un encoder incremental. También se expresa cómo es el comportamiento de los sensores de final de carrera durante la detección del *dolly* y la lógica usada para detener el movimiento cuando es necesario. Por último, se muestra un diagrama de bloques en donde se menciona cómo será el control de velocidad y de posición de la plataforma de rodaje.

4.1. Driver KBMG – 212D

Para un correcto funcionamiento del motor, se debe ajustar algunos parámetros en el driver, como por ejemplo, corriente máxima, rampa de aceleración y

desaceleración, velocidad máxima, entre otros. Esto es posible a través de una serie de *jumpers* y potenciómetros.

4.1.1. Modo de operación del *driver KBMG - 212D*

El modo de control del *driver* es como se muestra en la Figura 57, en este caso, se hará uso de una fuente de alimentación externa que pueda proporcionar un rango de tensión entre ± 10 V, de esta manera, será posible el control de velocidad en ambas direcciones de giro del motor. La fuente externa se conectará a los terminales “COM” y “SIG” sin olvidar hacer el puente entre los terminales “EN” y “COM”.

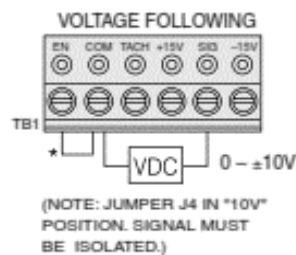


Figura 57. Configuración del *driver KBMG 212-D* para controlar la velocidad del motor con una fuente externa [101]

4.1.2. Configuración de los *jumpers* de la placa *KBMG – 212D*

Antes de conectar el motor al *driver* se debe ajustar algunos parámetros por medio de unos *jumpers* que se disponen en la tarjeta de manera que se pueda indicar el voltaje de línea, el voltaje máximo de alimentación de la bobina del motor, la

corriente máxima permitida en el devanado y tipo de control a realizar en el motor. La configuración a realizar es la siguiente:

- (a) J1A – J1B (Voltaje de línea): Ubicar ambos en la posición de 115 VAC.
- (b) J2 (Corriente de armadura): Seleccionar el valor más cercano a la corriente nominal, de las opciones propuestas (1,7; 2,5; 5; 7,5; 10 A), la más conveniente es la posición 10 amperios.
- (c) J3 (Voltaje de armadura del motor): Para un voltaje de alimentación de 115 VAC, la posición de J3 debe estar ajustada a la opción “A90”.
- (d) J4 (Voltaje de entrada analógico): Para el control de velocidad a través de una fuente externa se debe posicionar en la opción “10V”.
- (e) J5 (Modo de control – de torque o de velocidad): Como se desea un control de velocidad, se selecciona la opción “SPD”.
- (f) Los demás *jumpers* se dejarán configurados en la posición por defecto ya que no formarán parte del control del motor.

4.1.3. Configuración de los potenciómetros de la placa KBMG – 212D

El *driver* posee varios potenciómetros de ajuste de algunas variables. Estos deberán ser ajustados previo al uso del equipo. Los más relevantes se enumerarán a continuación, indicando entre paréntesis el valor de ajuste previo al uso del equipo:

- (a) Ajuste de tiempo de la rampa de aceleración del motor (4 s).
- (b) Ajuste de tiempo de la rampa de frenado del motor (4 s).
- (c) Velocidad tope de operación (1200 rpm – aprox. 66 %).

- (d) Ajuste de corriente continua máxima para ambas direcciones de giro del motor (10 A).
- (e) Ajuste de zona muerta de la señal de regulación de velocidad ($\pm 5\%$).

Como el dispositivo no tiene un método para que el sistema de control se percate de un evento no deseado, se conectará un sensor de corriente en serie con el devanado de armadura del motor para monitorear esta variable que será importante para la estimación de la posición del *dolly* sobre el riel y para la detección de exceso de corriente de la máquina.

4.2. Diseño del *hardware* para controlar velocidad del *dolly*

La velocidad del motor se fija con un nivel de tensión en un rango comprendido entre $\pm 10\text{VDC}$, por lo que se debe proponer una manera de generar ese nivel de tensión con el controlador seleccionado.

En las especificaciones del *driver KBMG – 212D* no se indica la exigencia de corriente de la señal analógica para el control de velocidad del motor, se concluye que el nivel de carga requerida es baja (despreciable), por lo tanto se plantea el uso del chip *MAX232* para generar el nivel de tensión de referencia de velocidad. El chip *MAX232* es un transceptor comúnmente empleado para la transmisión serial de corta distancia y que permite enviar datos con niveles de tensión dentro del rango de $\pm 10\text{VDC}$, partiendo de una alimentación de 5VDC . Normalmente este dispositivo se comunica con el microcontrolador por transmisión *UART (Universal Asynchronous Receiver - Transmitter)* que dispone de un par de canales para el envío y recepción de datos. Sin embargo, se manipulará únicamente el pin de transmisión del transceptor

para obtener una conversión de la señal digital de 0 – 5V, proveniente de una salida *PWM* del microcontrolador, a una de $\pm 10V$ (señal de transmisión del *MAX232*). La señal obtenida del pin de transmisión del transceptor será demodulada a una tensión analógica a través de un filtro pasabajas RC, de manera que al modificar el ancho de pulso de la señal *PWM* se pueda obtener el rango de tensión deseado. La Figura 58 muestra un bosquejo de lo explicado anteriormente.

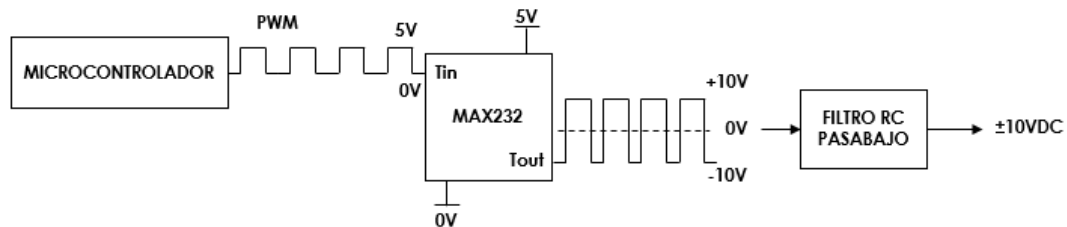


Figura 58. Bosquejo para obtener los niveles de tensión exigidos por el *driver KBMG – 212D*

4.2.1. Diseño del filtro pasabajas RC

Se considera el circuito mostrado en la Figura 59:

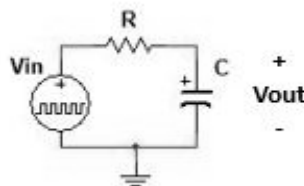


Figura 59. Filtro “*Butterworth*” pasabajo RC de 1er. Orden.

La señal “Vin” proviene del pin de transmisión del integrado *MAX232*. La frecuencia de transmisión es igual a la que proporciona el microcontrolador con la señal *PWM*, en este caso, una frecuencia de 10 KHz. El ancho de pulso varía conforme se modifica el valor de tensión en la entrada analógica del potenciómetro correspondiente a la variable a controlar. La función de transferencia del filtro se presenta a continuación:

$$TF_{lpf} = \frac{1}{(RC)s + 1} = \frac{1}{\tau s + 1}$$

Para obtener a la salida del filtro pasa bajas solo el nivel promedio o *DC* se tomará una frecuencia de corte tres (3) décadas por debajo de la frecuencia fundamental. Para escoger los elementos discretos que conforman el filtro se fijó el valor del capacitor a 1 μ F y se despejó el valor de la resistencia por medio de la ecuación (27):

$$R = \frac{1}{f \cdot C} \quad (27)$$

De lo cual se obtiene un valor para la resistencia de $R = 100 \text{ K}\Omega$. Este filtro permite una atenuación de la frecuencia fundamental (10KHz) de 60 dB, lo suficiente como para que el rizado de la señal analógica se considere despreciable para la aplicación.

4.2.2. Circuito y diseño de la placa

En base a la información anterior, se presenta el diagrama circuital (Figura 60) para que el *driver* reciba el nivel de tensión de referencia para el control de velocidad del motor del *dolly*. El diseño de la placa se muestra en los anexos como Figura 1.

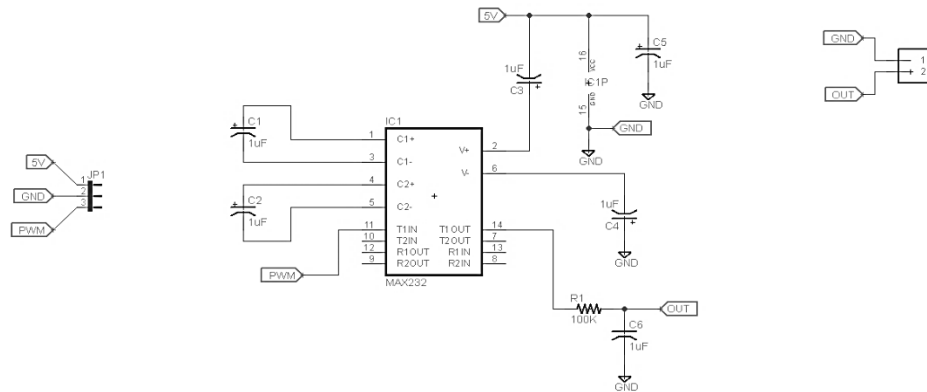


Figura 60. Diagrama circuital para obtener los niveles de tensión necesarios para controlar la velocidad del motor del *dolly*

4.3. Estimación de la posición del *dolly* sobre el riel

La estimación de la posición y velocidad del *dolly* se realizará de acuerdo a la información dada por un encoder incremental en cuadratura acoplado en la polea conductora ubicada en el eje del motor. Este dispositivo tiene la característica de poseer dos canales de los cuales sus señales están desfasadas 90° entre sí, permitiendo estimar la velocidad y la posición del *dolly*, así como discriminar el sentido de giro del motor.

En la Figura 61 se muestra el funcionamiento del encoder en base a las dos señales implicadas, denominadas “A” y “B”. Para obtener una mejor precisión de la medida se recomienda tomar nota de la ocurrencia de las transiciones de ambas señales (codificación 4x), debido al comportamiento periódico y al desfase de 90° entre ambos canales, es posible obtener hasta cuatro estados diferentes los cuales se han enumerado partiendo de “0” hasta el “3”.

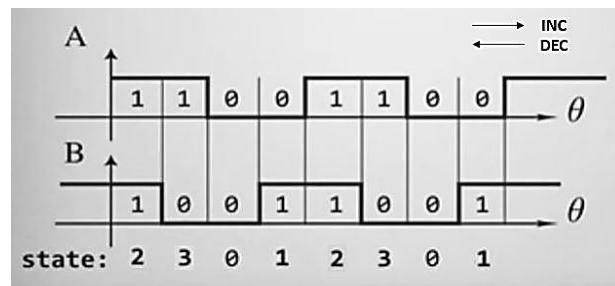


Figura 61. Señales del encoder incremental en cuadratura. [102]

En base a la figura anterior, se elaboró una tabla que permitirá la evolución del conteo de transiciones dependiendo del estado presente y el estado anterior. Se ha escogido arbitrariamente el sentido derecho como el caso en el cual se incrementará la cuenta, de suceder lo contrario, se decrementará. Como se puede apreciar en la Tabla 31, para los casos en el que se no se presenta adyacencia en los estados y cuando coinciden el estado presente con el estado anterior, no se realizará la cuenta de las transiciones porque tal hecho no ocurre para esos casos.

Tabla 31. Desarrollo del conteo de transiciones dependiendo del estado presente y el estado previo (INC = +1, DEC = -1, X = 0)

	Estado anterior	0	1	2	3
Estado presente	AB	00	01	11	10
0	00	X	DEC	X	INC
1	01	INC	X	DEC	X
2	11	X	INC	X	DEC
3	10	DEC	X	INC	X

Lo indicado en la Tabla 31 será utilizado para elaborar una matriz 4x4, de manera que dependiendo del caso presentado en las transiciones de cada canal, se ubicará en la posición requerida de la matriz y se tomará el valor que contiene, este valor será utilizado para obtener las transiciones ocurridas dentro de un intervalo de tiempo determinado.

El conteo de las transiciones será usado para estimar la posición y la velocidad del *dolly* sobre el riel por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\text{pos} = \frac{x}{N} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{100} \quad (28)$$

Donde:

pos: ubicación del *dolly* sobre el riel [m]

x: n° de pulsos detectados

N: Resolución del encoder

r: Radio de la polea conductora acoplada al motor [cm]

$$\text{velocidad} = 60 \cdot \left(\frac{\text{pps}}{r_p \cdot N} \right) \quad (29)$$

Donde;

velocidad: Velocidad del *dolly* [rpm]

pps: Pulsos por segundo detectados

r_p : Relación entre polea conducida y polea acoplada al motor

N: Resolución del encoder

Para el cálculo de la posición del *dolly* se tomará en consideración el radio de la polea para determinar el desplazamiento lineal. Estos cálculos serán realizados cada segundo por medio de una rutina de interrupción por *timer*. El desarrollo del código será en base a los diagramas de flujo mostrados en las siguientes figuras: Figura 62 y Figura 63.

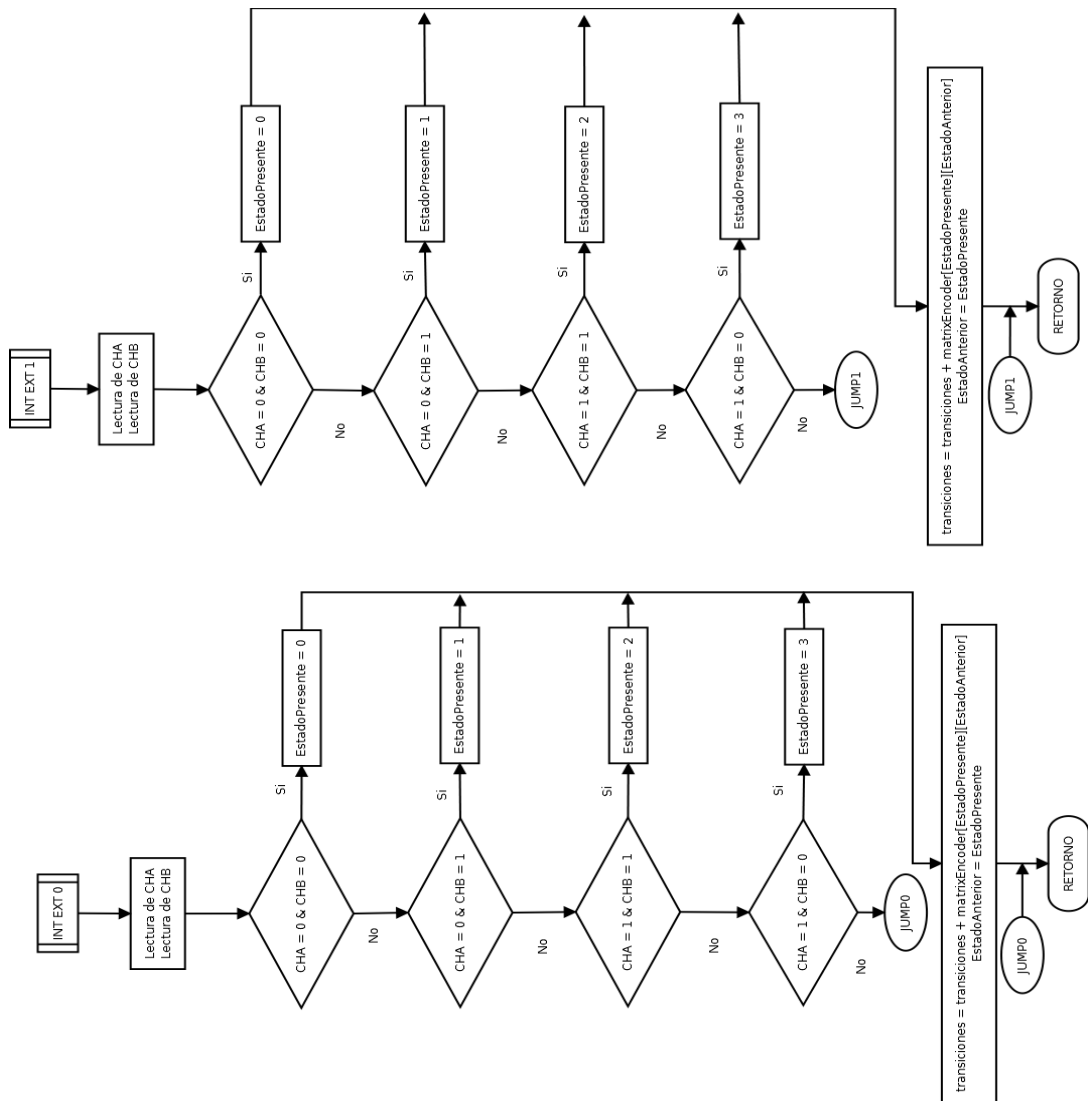


Figura 62. Rutina de detección de transiciones de ambos canales del encoder

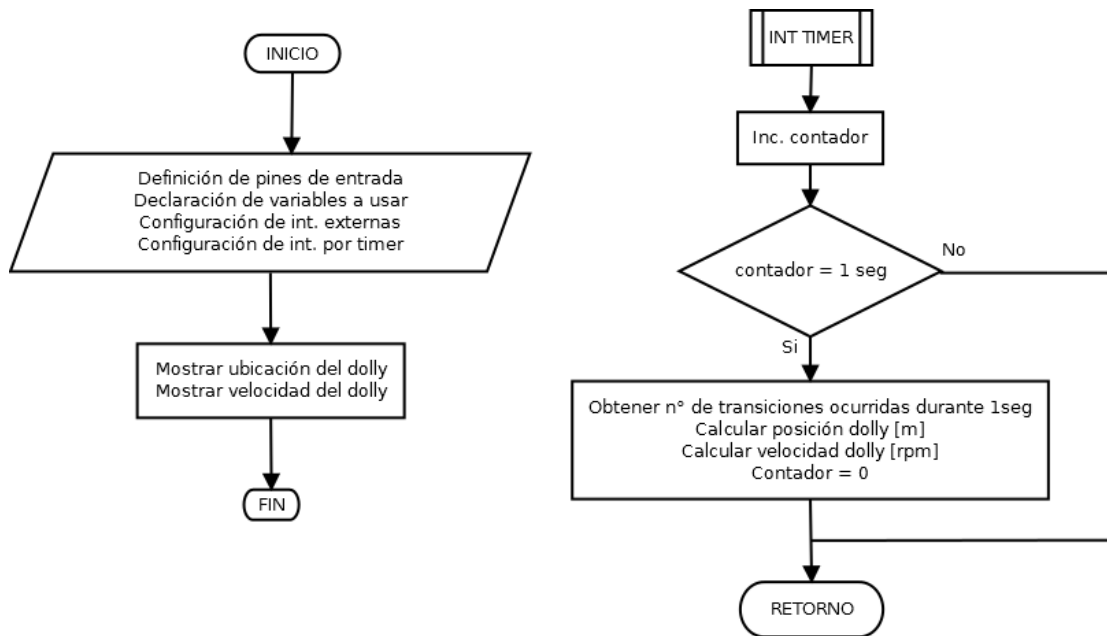


Figura 63. Cálculo de la velocidad y posición del *dolly*

4.4. Calibración inicial de posicionamiento del *dolly*

Antes de poner en funcionamiento el equipo se debe calibrar la posición del *dolly* respecto a uno de los extremos, de manera que se pueda tener una lectura adecuada de la posición de la plataforma de rodaje, para ello el operador debe hacer uso del *joystick* del mando de control para ubicar el *dolly* en uno de los extremos. Una vez ocurrida la primera detección de la plataforma por uno de los finales de carrera, el sistema de control interpreta que dicha posición será la referencia (0 m).

4.4.1. Lógica a usar para los finales de carrera del *dolly*

Como medida de seguridad, se ha decidido utilizar los sensores magnéticos para indicar al usuario que el equipo está próximo al final de carrera. También serán usados para calibrar la posición del *dolly* sobre el riel.

En el caso del movimiento de la plataforma de rodaje, un par de sensores estarán ubicados debajo de la base del *dolly*, mientras que se usará un par de imanes que serán colocados cada uno en las cercanías de los extremos del riel (ver Figura 64).

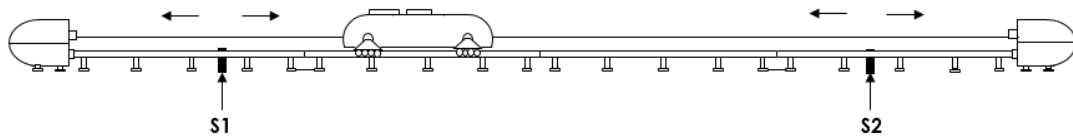






Figura 64. Posicionamiento de los sensores de final de carrera del *dolly*

La lógica de funcionamiento para la detección del final de carrera se explicará a continuación:

Tabla 32. Lógica de operación de los sensores de final de carrera del *dolly*

	Evento		Acción
Sensor 1		→	Continuar movimiento – Apagar led mando de control
		←	Detener movimiento – Encender led mando de control
Sensor 2		→	Detener movimiento – Encender led mando de control
		←	Continuar movimiento – Apagar led mando de control

La Tabla 32 muestra cómo se comportará el sistema ante los eventos de final de carrera del *dolly*. En el instante que se detecta la activación del sensor 1 (por flanco de subida), el sistema dejará de alimentar el motor y deshabilitará el movimiento en esa dirección (si fuere el caso), permitiendo únicamente que la plataforma se desplace en la dirección opuesta una vez que se detenga. Para el sensor 2 ocurrirá algo similar pero para la dirección opuesta del movimiento propuesto con el sensor 1.

Como la señal que indica el final de carrera es un pulso habrá que discriminar cuándo se debe frenar la plataforma de rodaje, para ello se usará un contador por cada sensor y que indicará si la plataforma deberá frenar o no.

4.4.2. Modo de control de posición del *Dolly*

El diagrama de bloques de la Figura 65 propone un control de posición a manual (a lazo abierto) del *dolly*. El operador de cámara generará una consigna analógica de velocidad del motor a través un potenciómetro ubicado en el mando de control, el controlador enviará el mensaje por medio del protocolo *CAN*, luego, la trama será recibida al sistema embebido correspondiente y éste modificará el ancho de pulso de la de la señal *PWM*. Como el *driver* trabaja a tensiones entre $\pm 10V$ para modificar la velocidad del motor, es necesario agregar un *hardware* conformado por el *MAX232* y un filtro *RC* pasabajas para lograr tal condición. El sistema estará monitoreado por un sensor de corriente para detectar posibles eventualidades en la corriente del motor para así tomar los correctivos preventivos. Por medio del encoder se estimará la velocidad y la posición del *dolly*. El control de posición del equipo será posible a través del monitoreo de la señal de retorno proveniente del *CCU*. En caso de que se detecte el final de carrera de la plataforma de rodaje se avisará al resto de los controladores del sistema para tomar acción al respecto.

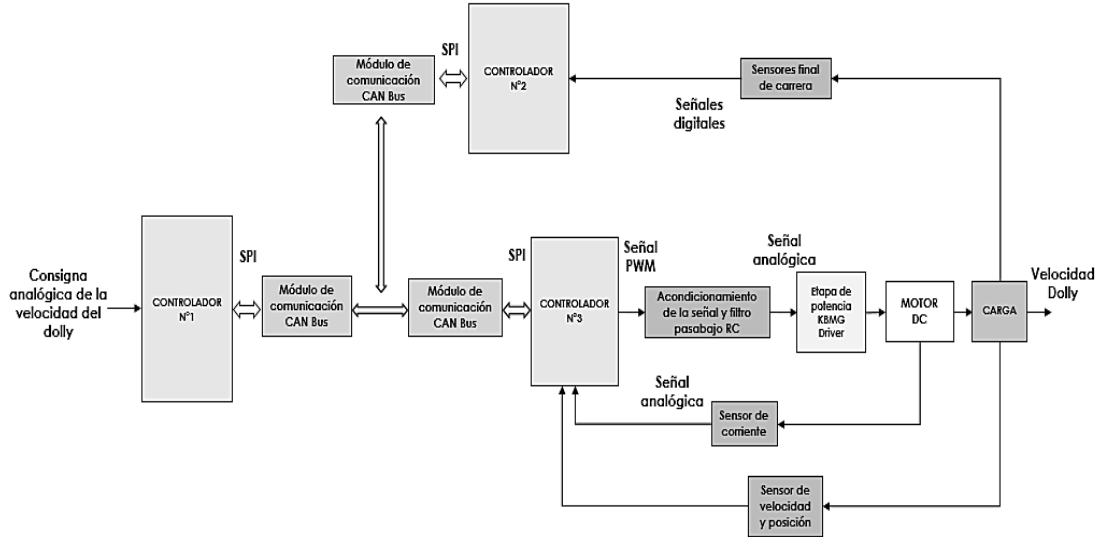


Figura 65. Diagrama de bloque para el control de velocidad del motor y posición del *dolly*

4.4.3. Diagramas de flujo para el control de la plataforma de rodaje

Las siguientes figuras: Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69 y Figura 70, muestran los diagramas de flujo a usar para realizar el código que controlará la velocidad del motor del *dolly* por medio de la simulación en *ISIS Proteus*. También se percata de las advertencias de final de carrera de la plataforma y de emergencia ante la presencia de exceso de corriente en el motor, deteniendo el movimiento del mismo para evitar daños en el funcionamiento del equipo, asimismo desarrollará el cálculo de la estimación de la posición del *dolly* sobre el riel.

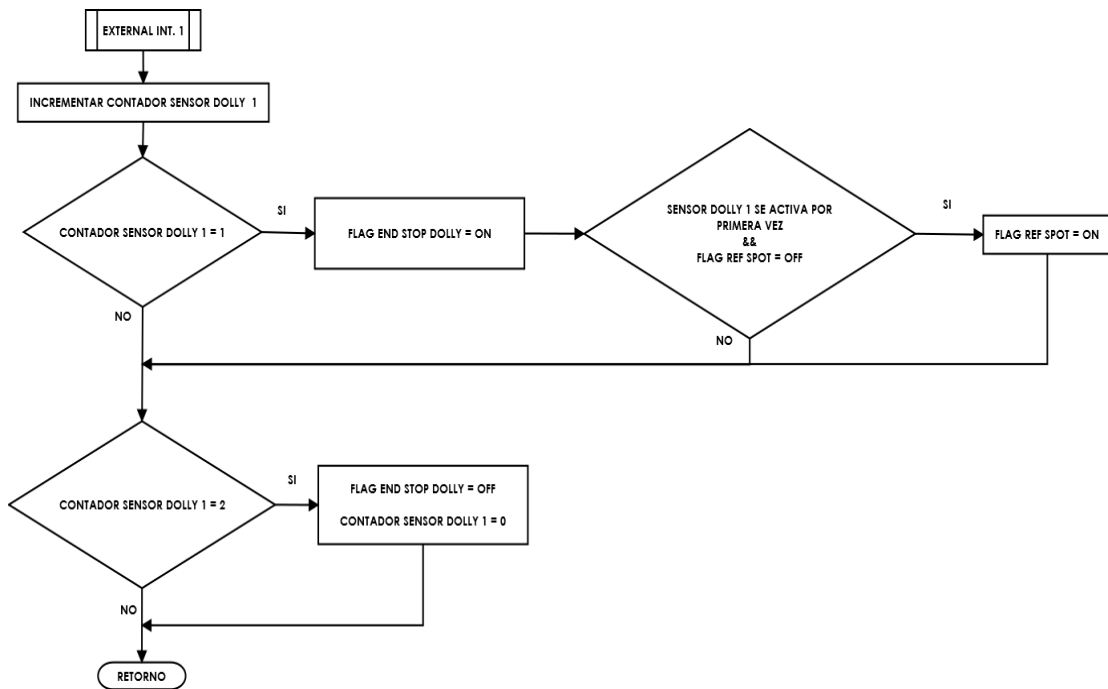


Figura 66. Diagrama para detección de final de carrera (sensor1)

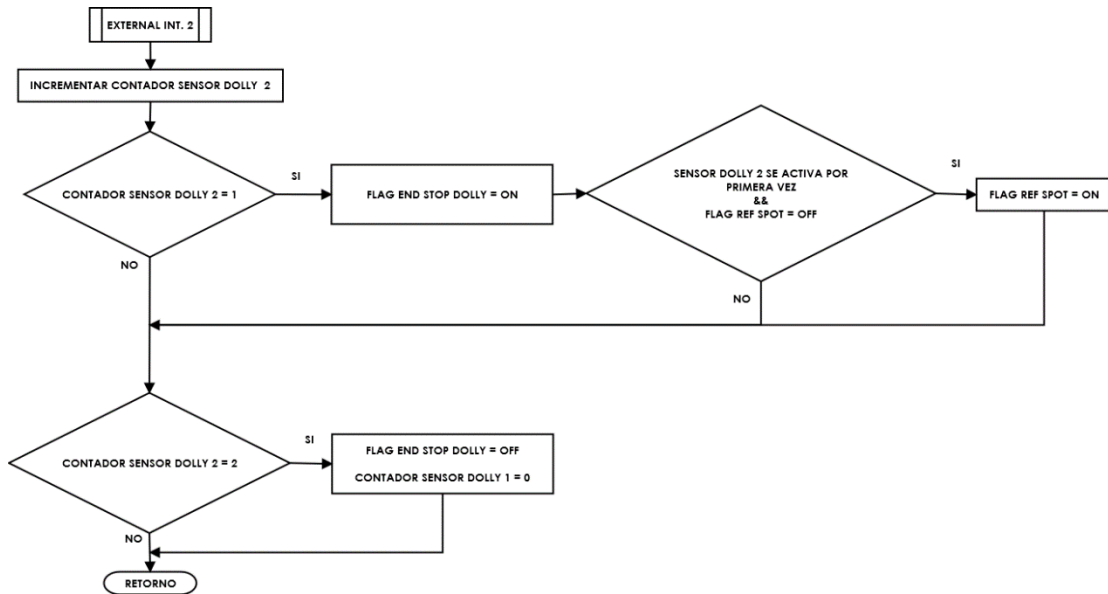


Figura 67. Diagrama para detección de final de carrera (sensor2)

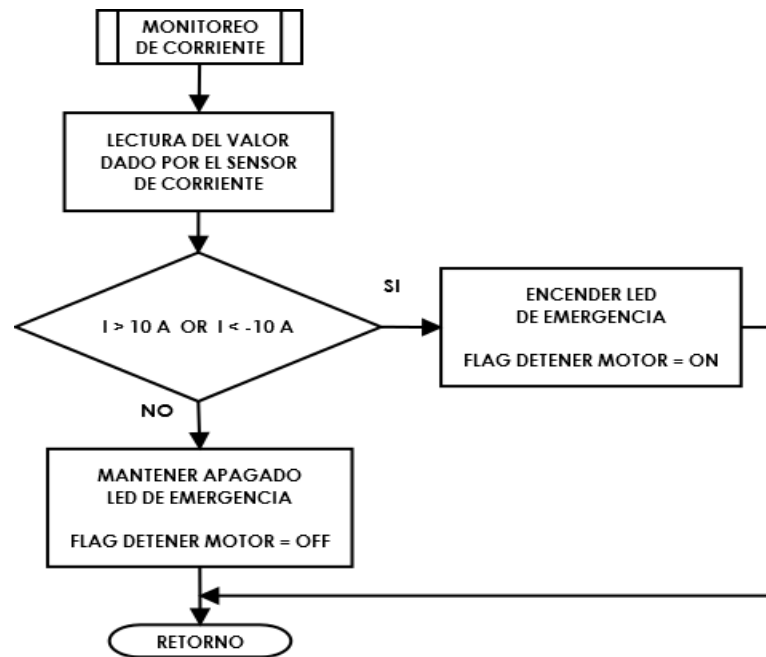


Figura 68. Diagrama para el monitoreo de la corriente del motor *dolly*

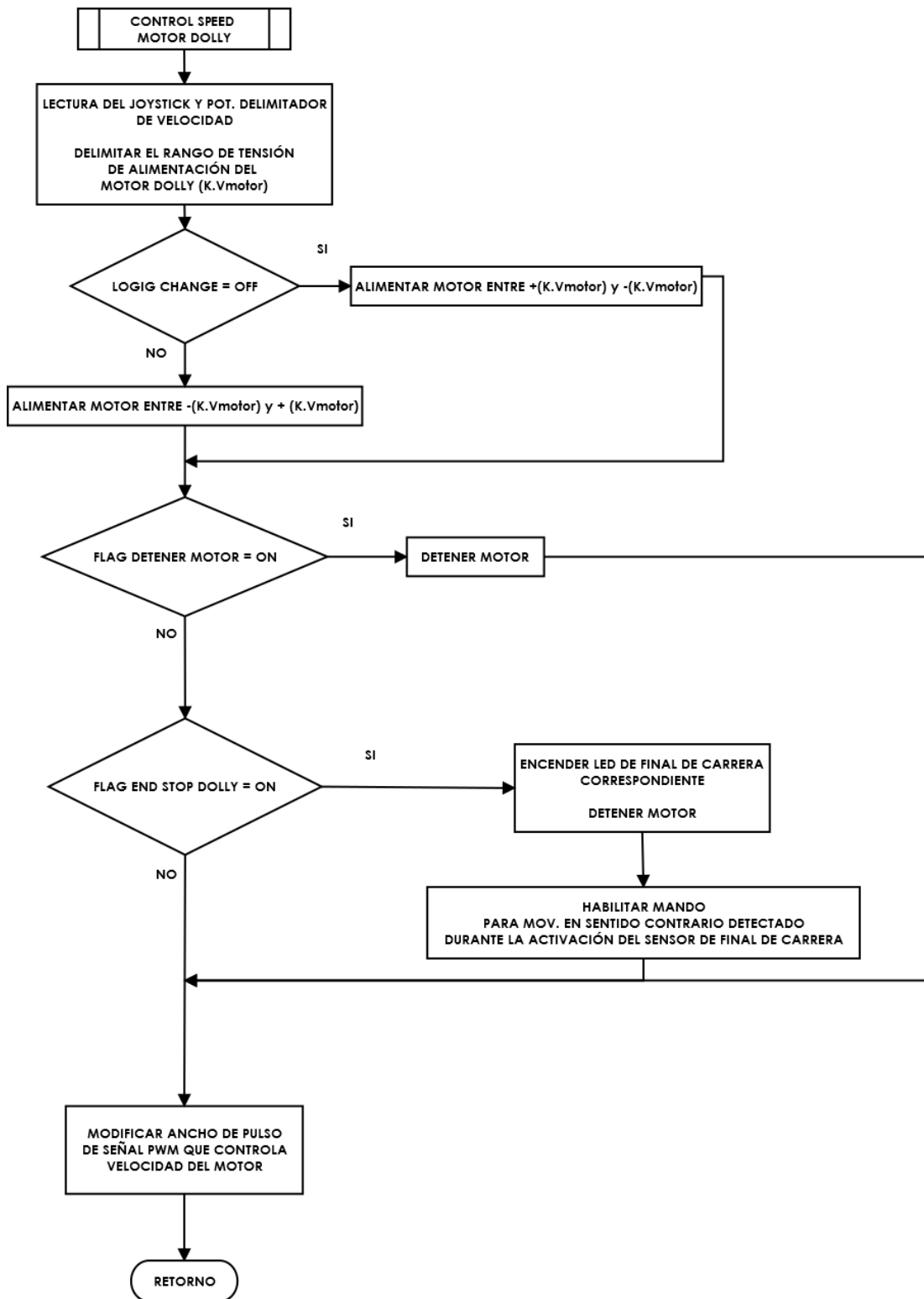


Figura 69. Rutina de control de velocidad del motor *dolly*

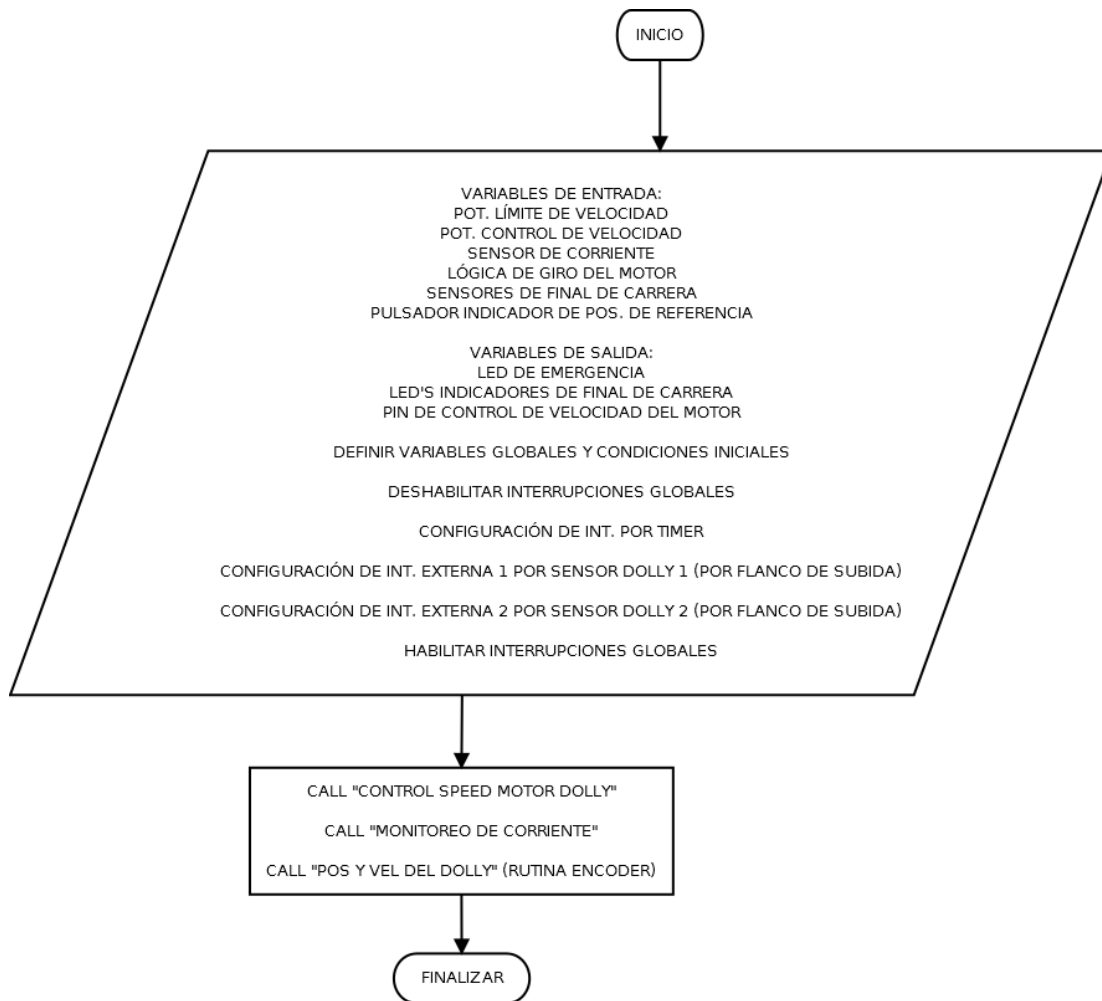


Figura 70. Configuración de parámetros y llamado de rutinas al programa principal

4.5. Cabezal

El control de las variables de paneo y de *tilt* serán explicadas en esta sección. Se presenta el diseño de un filtro “pi” para alisar la corriente de los motores.

4.5.1. Explicación del desarrollo del pre - filtro discreto para establecer referencias con arranque suave de los motores del cabezal

Para las aplicaciones en el cual el equipo será usado es importante asegurar que tales movimientos se realicen de manera suave, fluida, evitando aceleraciones y frenados bruscos durante el movimiento. Por tal razón, en el diseño propuesto se contará con un par de perillas (potenciómetros) con las cuales el personal que manipulará el equipo decidirá qué tan suaves serán los movimientos del paneo y *tilt* durante su uso, estos elementos serán parte fundamental para el control de los motores y en el diseño a explicar más adelante.

Ante las características de los movimientos de la cámara es necesario plantear una solución que permita llegar al valor de velocidad en un tiempo estipulado y no de manera instantánea para evitar movimientos bruscos, esto será posible aumentando paulatinamente la tensión de entrada del motor, este valor será otorgado por el operador con un *joystick* ubicado en el mando de control, de manera que se propone un control de velocidad que permita el movimiento suave en la aceleración y en el frenado del equipo. Para lograr este cometido se recurre a la teoría de control.

En base a lo dicho anteriormente, una manera para lograr tal comportamiento es a través de la aplicación de un pre - filtraje de la señal de mando, el modelo del pre - filtro de segundo orden en el dominio discreto se presenta a continuación:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{z \cdot (e^{-aT} - e^{-bT})}{(z - e^{-aT}) \cdot (z - e^{-bT})}$$

Donde:

a: Posición del polo más cercano al eje “j ω ”

b: Posición del polo más alejado al eje “j ω ”

T: Período de muestreo

a, b, T > 0

Si la señal de referencia es una entrada escalón (caso extremo), entonces se puede obtener a la salida del filtro una señal suavizada que depende de la dinámica propia del filtro. Para que el valor final de la salida del filtro coincida con la amplitud de la entrada escalón se debe calcular la inversa de la constante estática, esto es posible aplicando el teorema del valor final que corresponde a la ecuación (30) :

$$\lim_{k \rightarrow \infty} x(k) = \lim_{z \rightarrow 1} [(1 - z^{-1})X(z)] \quad (30)$$

De igual forma, se considera una entrada escalón como la excitación del sistema discreto:

$$\begin{aligned} \lim_{z \rightarrow 1} [(1 - z^{-1})Y(z)] &= \lim_{z \rightarrow 1} \left(\frac{z-1}{z} \right) \left(\frac{z}{z - e^{-aT}} - \frac{z}{z - e^{-bT}} \right) \left(\frac{K_1 z}{z-1} \right) \\ \lim_{z \rightarrow 1} [(1 - z^{-1})Y(z)] &= \frac{K_2 (e^{-aT} - e^{-bT})}{(1 - e^{-aT})(1 - e^{-bT})} = Ke_z \\ Ke_z &= \frac{1}{Ke_z} = \frac{(1 - e^{-aT})(1 - e^{-bT})}{K_1 (e^{-aT} - e^{-bT})} \end{aligned}$$

Donde;

K_{ez} : Constante estática en el dominio discreto.

K_z : Inversa de la constante estática en el dominio discreto.

Para el desarrollo del algoritmo por *software* es necesario obtener la ecuación en diferencias, suponiendo $U(z)$ como la señal de referencia de velocidad (entrada del filtro) y $Y(z)$ como la referencia de velocidad suavizada (salida del filtro), se tiene:

$$Y(z) - (e^{-aT} + e^{-bT})z^{-1}Y(z) + e^{-(a+b)T}z^{-2}Y(z) = (ze^{-aT} - e^{-bT})z^{-1}U(z) \quad (54)$$

Tomando en consideración la representación del sistema discreto obtenido anteriormente (ecuación (54)), el desarrollo del diagrama de bloques del controlador digital queda de la siguiente forma:

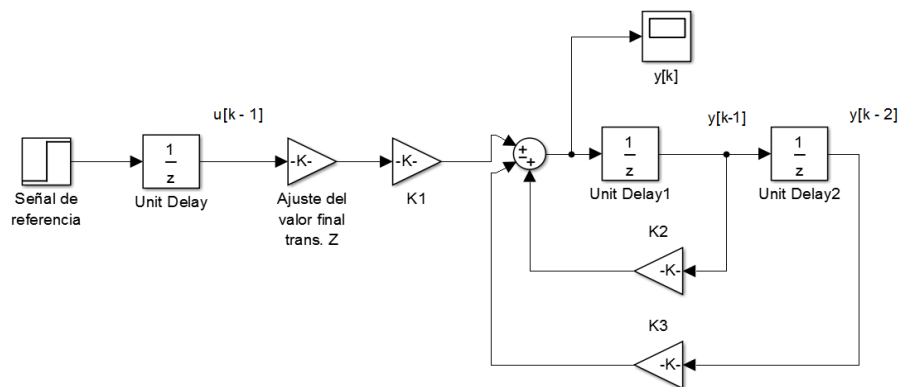


Figura 71. Esquema de simulación del sistema discreto

Usando la propiedad del Teorema de corrimiento (ecuación (31)) se podrá conseguir la ecuación en diferencias:

$$Z[X(n - kT)] = z^{-k}X(z) \quad (31)$$

La expresión de la ecuación en diferencias es la presentada a continuación:

$$\begin{aligned} y(k) - (e^{-aT} + e^{-bT})y(k - 1) + (e^{-(a+b)T})y(k - 2) \\ = (e^{-aT} - e^{-bT})u(k - 1) \end{aligned} \quad (32)$$

Con la ecuación (32) se puede elaborar un algoritmo que a fin de cuentas permitirá que el voltaje del motor aumente o disminuya paulatinamente.

Las siguientes imágenes mostrarán el comportamiento del filtro discreto, cuando es excitado con una entrada escalón.

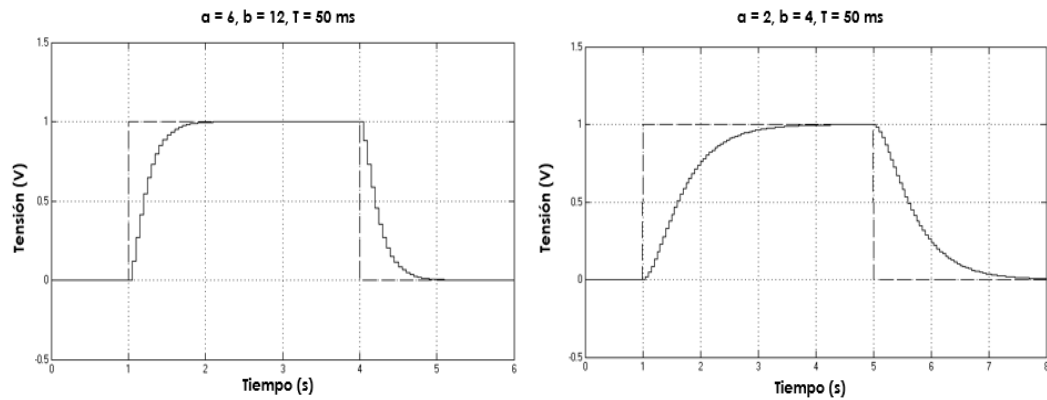


Figura 72. Suavidad de la señal de control. Tiempo de establecimiento: 1s (izq), 2s (der)

4.5.2. Diseño del Controlador Proporcional – Integral

Para eliminar el efecto del efecto de carga debido a la aceleración de la gravedad y lograr que la cámara se mantenga fija en una posición determinada durante el movimiento del *tilt*, se ha decidido diseñar un control de velocidad a lazo cerrado con la ayuda de un encoder incremental y un controlador Proporcional – Integral en tiempo discreto.

Con el encoder se tomará la información de la velocidad de giro del motor, ésta será comparada con la señal de referencia para luego ser procesada por el controlador PI.

Un controlador PI discreto se puede representar en términos de su función de transferencia pulso:

$$G_c(z) = K_p + \frac{K_i}{1 - z^{-1}} \quad (33)$$

Donde;

K_p : Ganancia proporcional

K_i : Ganancia integral

De igual forma, la función de transferencia pulso de la ecuación (33) se puede expresar de la siguiente manera:

$$G_c(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{(K_p + K_i) - K_p \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (34)$$

Donde;

$M(z)$: Salida del controlador PI digital

$E(z)$: Señal de error

Con la expresión de la ecuación (34) se halla la ecuación en diferencias del controlador PI digital:

$$m[k] = (K_p + K_i) \cdot e[k] - K_p \cdot e[k - 1] + m[k - 1] \quad (35)$$

La ecuación (35) permite desarrollar el algoritmo por *software* del controlador PI digital, tomando como señal de entrada la diferencia entre la señal de excitación y la velocidad detectada por el encoder. El diagrama de bloques que desarrolla la ecuación en diferencias a través de su transformada Z se puede observar en la Figura 73.

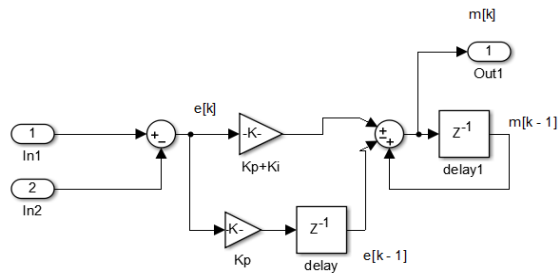


Figura 73. Diagrama de bloques del controlador PI digital

La salida denominada $m[k]$ determinará la tensión de alimentación del motor. Los valores apropiados de K_p y K_i fueron hallados en base a ensayo y error mediante simulación ($K_p = 0,1$; $K_i = 0.027$).

4.5.2.1. Algoritmo de anti – saturación del efecto integral del controlador

En la práctica, los controladores PI sufren un efecto de saturación que ocurre cuando la señal de referencia supera las restricciones físicas de una determinada variable, esto se debe al efecto de la acción integral del error, lo que trae como

consecuencia un comportamiento no lineal del sistema. Para evitar este evento, se elabora un algoritmo de anti – saturación de la parte integral del controlador.

Partiendo de la ecuación (33) se obtiene la función de transferencia de pulso que se usará para hallar el algoritmo:

$$M(z) = Kp.E(z) + Q(z) \quad (36)$$

Donde;

$$Q(z) = \frac{Ki.E(z)}{1 - z^{-1}}$$

Para evitar la saturación del sistema se limitará la señal de salida $M(z)$ en un rango determinado de valores para mantener su comportamiento lineal. Si por alguna razón la señal de salida no se encuentra dentro del rango de valores permitido se deberá llevar el valor del error a cero realimentando la diferencia de la señal de salida con el valor límite tal y como lo muestra la Figura 74:

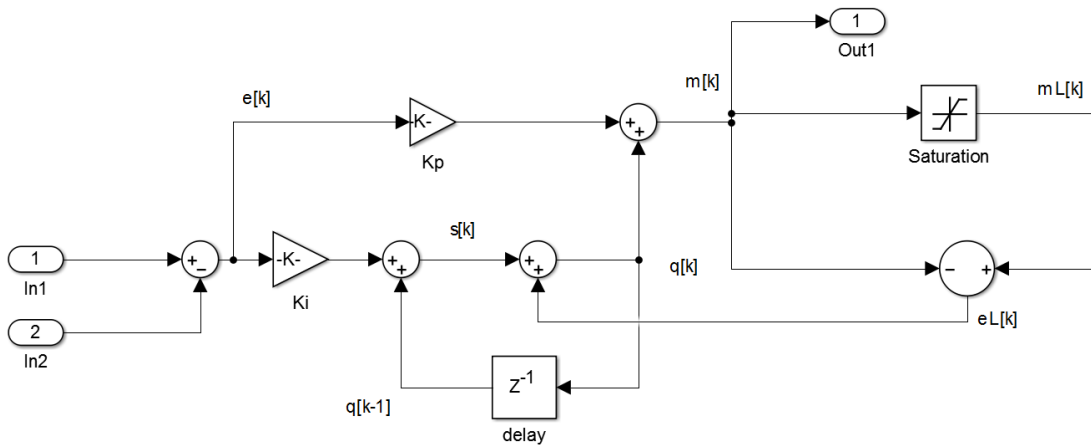


Figura 74. Solución para la saturación del efecto integral

Finalmente, la ecuación (37) muestra la expresión del controlador PI en adición con la etapa de anti - saturación de la acción integral:

$$q[k] = Ki \cdot e[k] + q[k - 1] + e_L[k] \quad (37)$$

Con lo explicado anteriormente se procede a realizar el diagrama de flujo del controlador PI, el cual es mostrado en la Figura 75:

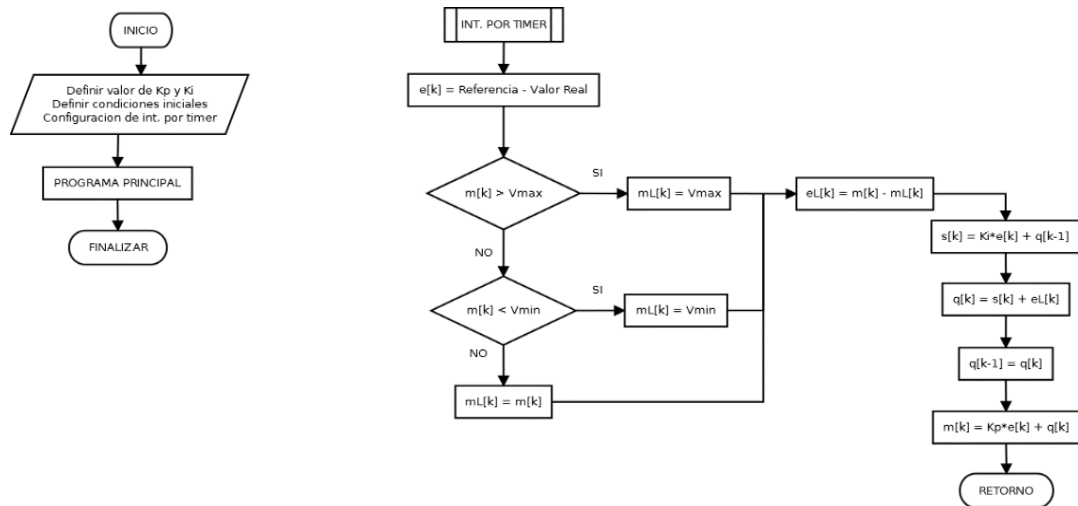


Figura 75. Desarrollo de la ecuación en diferencias del controlador PI + algoritmo de anti – saturación de la parte integral del controlador

4.5.3. Filtro “pi” para los motores del cabezal

El filtro será usado para los motores de corriente continua implicados en el movimiento del cabezal y tendrá la función de alisar la corriente del motor. Para atenuar los armónicos de corriente de altas frecuencias y evitar sobrepicos de tensión durante la conmutación se colocará un par de condensadores referenciados a tierra como lo muestra la configuración de la Figura 76:

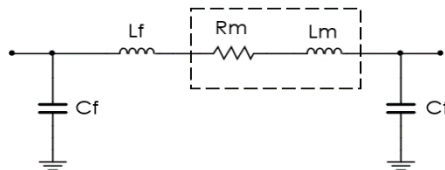


Figura 76. Filtro "pi" pasa - bajo

Los valores de la bobina y de los condensadores fueron fijados mediante la simulación del modelado en el dominio de la frecuencia del filtro y de los motores en conjunto con la carga, de manera que la corriente de los motores presente un rizado despreciable. Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$L_{f_{\text{pan}}}=10\text{mH}, L_{f_{\text{tilt}}}=20\text{mH}$$

$$C_{f_{\text{pan}}}=C_{f_{\text{tilt}}}=470\mu\text{F}$$

Se recomienda usar capacitores electrolíticos o de película de tantalio. La bobina de choque debe estar en la capacidad de soportar la corriente de la carga.

4.5.4. Lógica a usar para los finales de carrera de los movimientos del cabezal

Es necesario tener un control en el límite del movimiento del paneo puesto que el cable de video de la cámara se puede enredar con la estructura del equipo. Por tal motivo se propone limitar el rango de movimiento con un par de sensores. Para la detección de final de carrera del paneo, se plantea una solución muy similar a la del dolly, en esta ocasión, los sensores (S1 y S2) estarán ubicados de manera tal que el recorrido del paneo sea de $\pm 135^\circ$ desde su punto de referencia, los imanes se colocarán en el cuerpo del cabezal. La lógica de funcionamiento está reflejada en la Tabla 33.

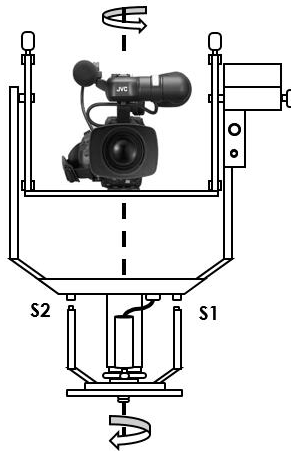










Figura 77. Sensores de final de carrera del paneo de la cámara

Tabla 33. Lógica de operación de final de carrera del paneo de la cámara

	Evento		Acción
Sensor 1			Detener movimiento – Encender led mando de control
			Continuar movimiento – Apagar led mando de control
Sensor 2			Continuar movimiento – Apagar led mando de control
			Detener movimiento – Encender led mando de control

En cuanto a la inclinación de la cámara (*tilt*), es importante limitar su movimiento porque se puede correr el riesgo de que el lente se tope con la estructura del cabezal, por lo que se colocarán unos topes mecánicos y un par de sensores que indicarán cuando detener el movimiento, los imanes estarán sobre la estructura que sostiene la cámara.

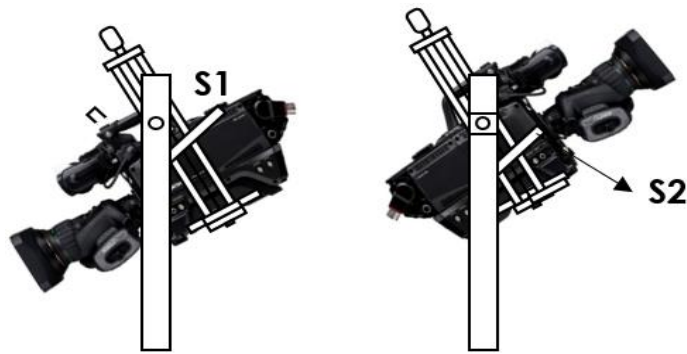


Figura 78. Sensores de final de carrera del *tilt* de la cámara

La lógica está presente en la Tabla 34, si se detecta la activación del sensor, se detendrá la acción y sólo se permitirá el movimiento en el sentido contrario. La “X” implica que no importa la dirección del movimiento, puesto que el sensor no se encuentra activado.

Tabla 34. Lógica de operación final de carrera del *tilt* de la cámara

	Evento		Acción
Sensor 1	OFF	↪	Detener movimiento – Encender led mando de control
	ON	X	Continuar movimiento – Led apagado mando de control
Sensor 2	OFF	↩	Detener movimiento – Led encendido mando de control
	ON	X	Continuar movimiento – Led apagado mando de control

4.5.5. Modo del control de posición del paneo y *tilt* de la cámara

La Figura 79 muestra un control a lazo abierto de la posición de la cámara para ambos movimientos del cabezal. El operador proporciona una consigna analógica de velocidad para el motor que corresponde al movimiento, esto se realiza por medio de un *joystick* ubicado en el mando de control. Se genera una trama con el mensaje asociado al movimiento y éste será recibido por el controlador asignado para ejecutar la acción. La señal de control de velocidad será recibida por el *driver* y el motor girará a la velocidad indicada por el operador. Para determinar la posición de la cámara será necesario el uso de la señal de retorno del *CCU* para poder monitorear el comportamiento del movimiento. El sistema tendrá conocimiento del final de carrera del movimiento gracias a los sensores magnéticos, cuando ocurra tal situación, se tomarán acciones al respecto. Asimismo, el *driver* de los motores indicará algún evento no deseado (exceso de corriente del motor). Como se dijo anteriormente, el encoder del motor *tilt* será usado para realizar un control de velocidad a lazo cerrado, permitiendo mantener una posición fija de la inclinación de la cámara, contrarrestando el efecto de la gravedad.

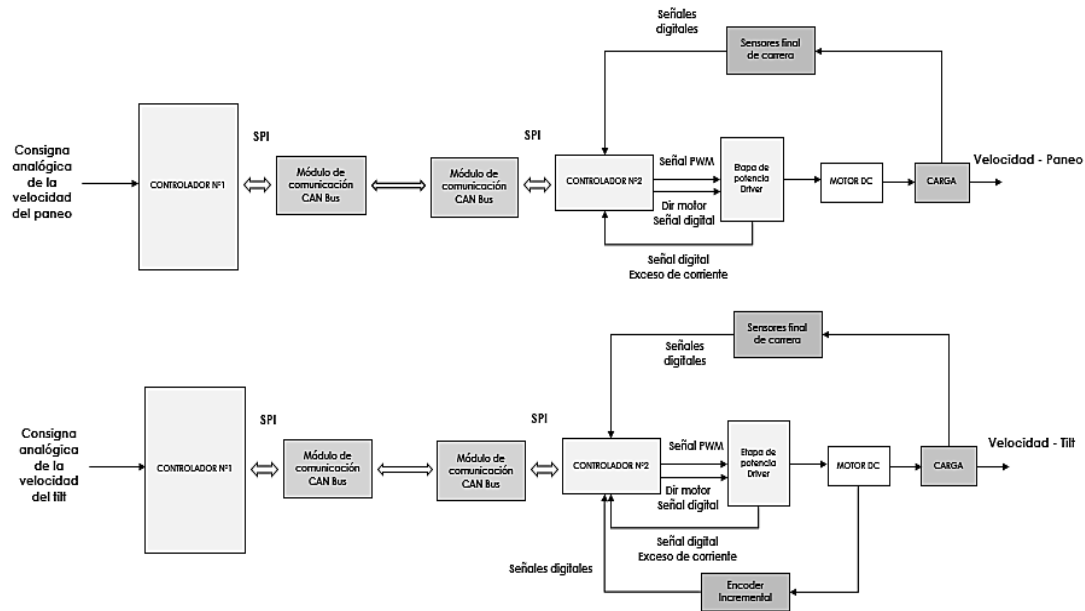


Figura 79. Diagrama de bloques para el control de velocidad y posicionamiento de la cámara

4.5.6. Diagramas de flujo para el control de los motores del cabezal

De igual forma, se presentan en las figuras Figura 80, Figura 81, Figura 82, Figura 83, Figura 84 y Figura 85, los diagramas de flujo que será usado para escribir el código del control de velocidad de los motores del cabezal (*paneo* y *tilt*), la velocidad variará conforme lo indique el operador a través de un potenciómetro, el valor deseado será alcanzado en un cierto tiempo determinado gracias al desarrollo del filtro digital por medio de la ecuación en diferencias (ecuación (32)) el tiempo de establecimiento se puede ajustar con los potenciómetros que se encuentra en la electrónica que se ubicará en la base del *dolly*, tal ajuste deberá ser realizado momentos antes de la grabación. Cuando el controlador detecte la activación de uno de los sensores detendrá el movimiento del motor asociado por un cierto tiempo, dependiendo del sensor detectado se evitará el movimiento en esa dirección para

evitar daños. Si hay un exceso de corriente pasando por el devanado del motor se informará de tal evento al operador e inmediatamente se detendrá el movimiento por un tiempo determinado hasta que tal condición de riesgo haya desaparecido. Hay que recordar que la lógica de giro de los motores se puede cambiar a través del *switch* disponible en el mando de control, sin embargo, se recomienda indicar la lógica de giro deseada previo a la utilización del equipo y no durante la filmación.

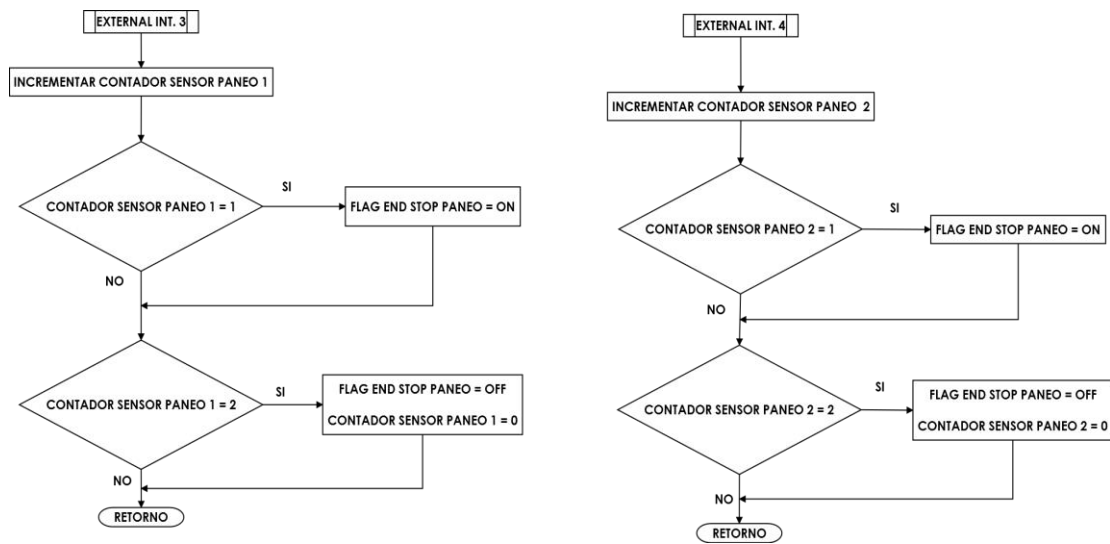


Figura 80. Diagrama de flujo para la discriminación de detección de final de carrera de los motores del cabezal

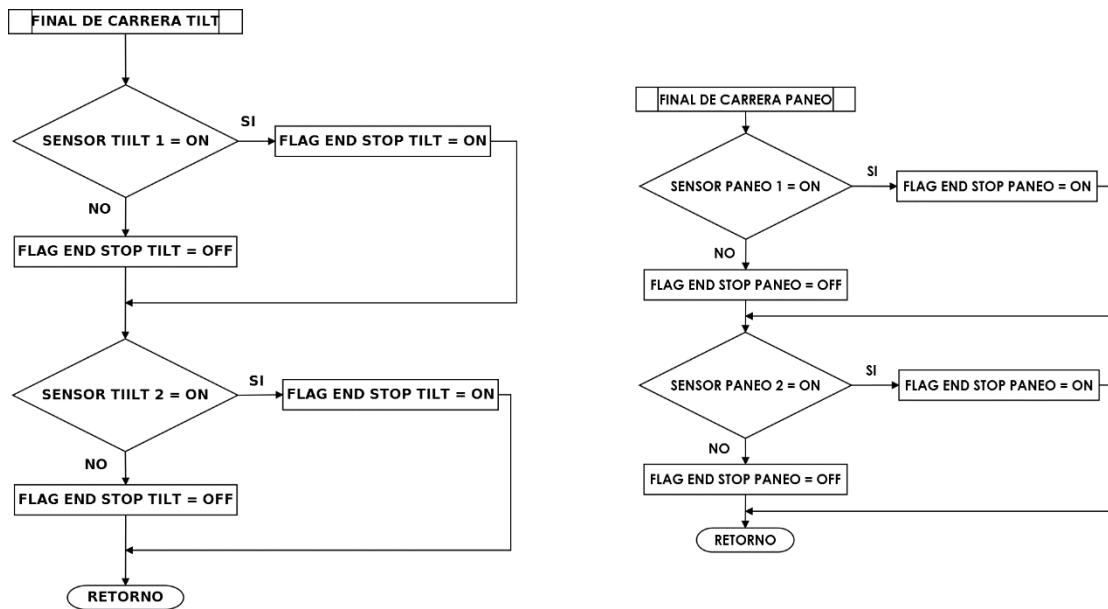


Figura 81. Rutina complementaria para la detección de final de carrera de los motores del cabezal

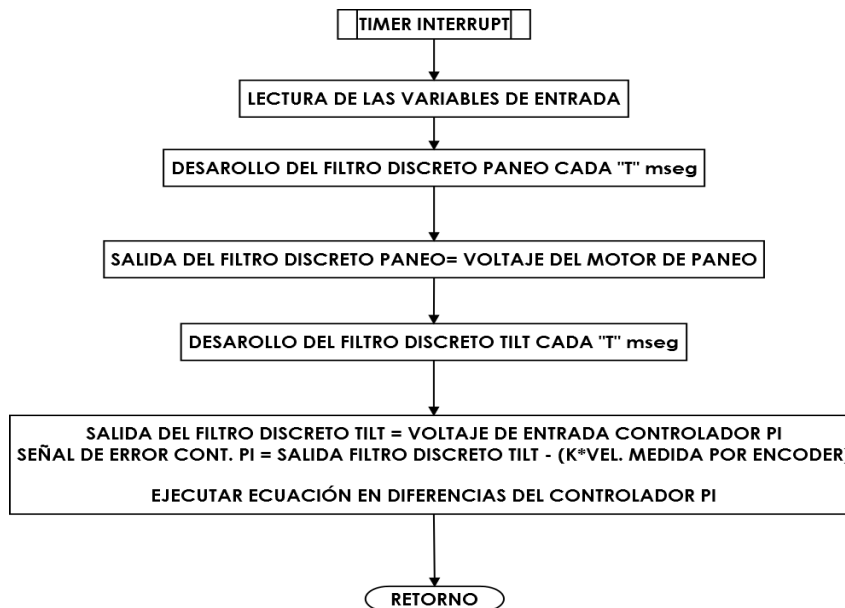


Figura 82. Diagrama de int. por *timer* para el desarrollo de la señal de control de ambos motores

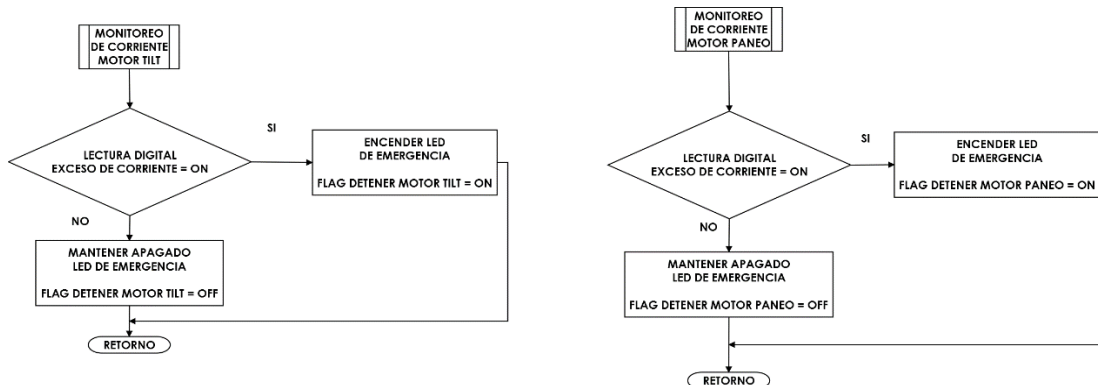


Figura 83. Diagrama de flujo para detección por exceso de carga de motores del cabezal

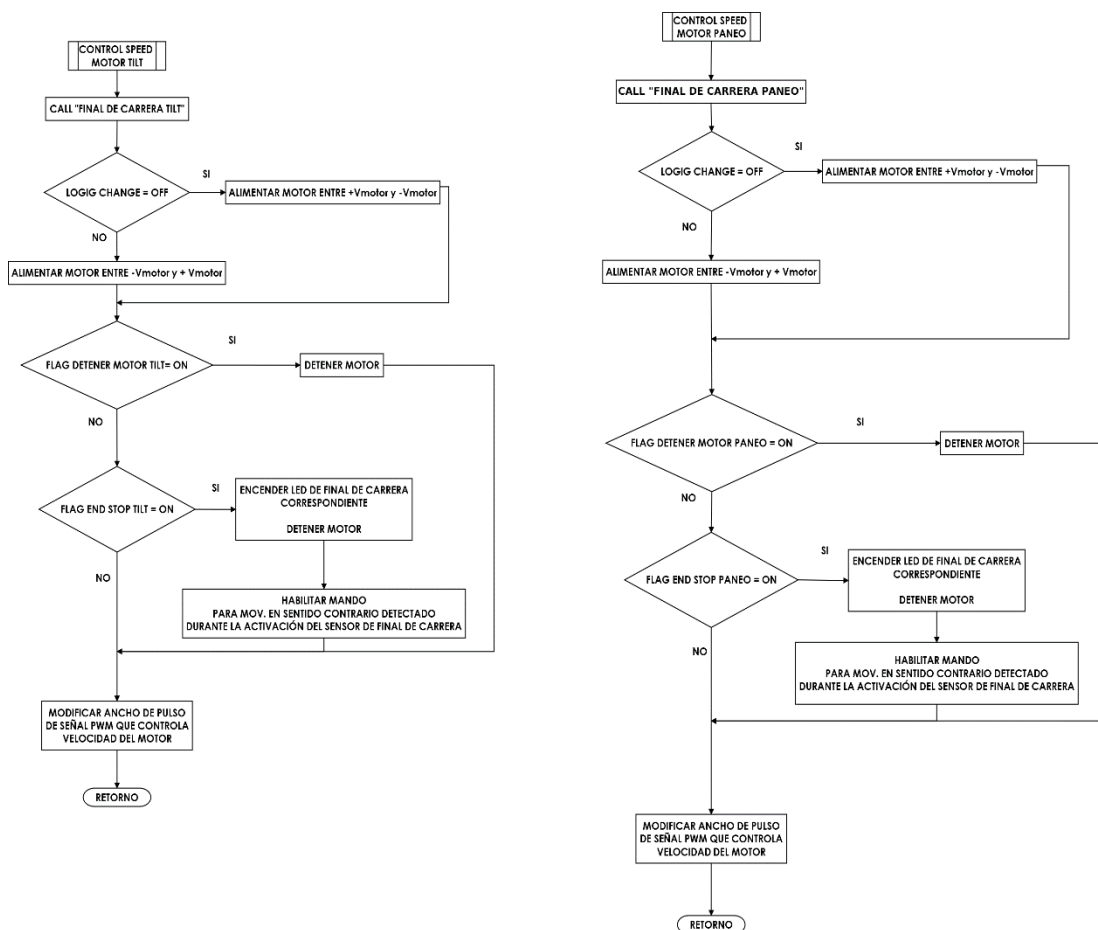


Figura 84. Diagrama para el control de velocidad de los motores del cabezal

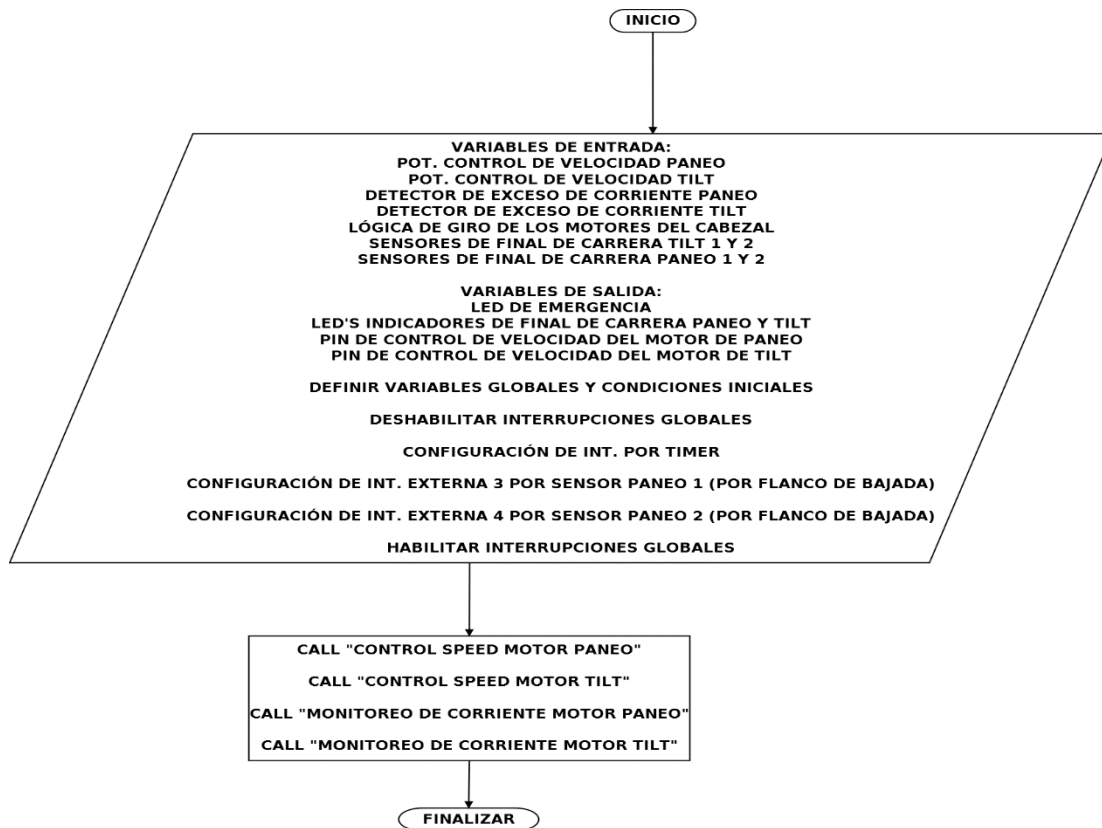


Figura 85. Diagrama de configuración y llamada de rutinas para el monitoreo y control de los motores del cabezal

4.6. Foco

4.6.1. Control de la variable foco

Como es evidente, el servomotor será el encargado de realizar el movimiento del anillo, por lo que es necesario conocer sus características eléctricas como por ejemplo, el voltaje de operación y el rango de operación de la señal *PWM* que controla la posición del servo. Estos datos están reflejados en la Tabla 20.

Teniendo el mecanismo definido se planteará el modo de controlar la variable de enfoque. La Figura 86 presenta un diagrama de bloques que muestra los elementos involucrados para tal fin:

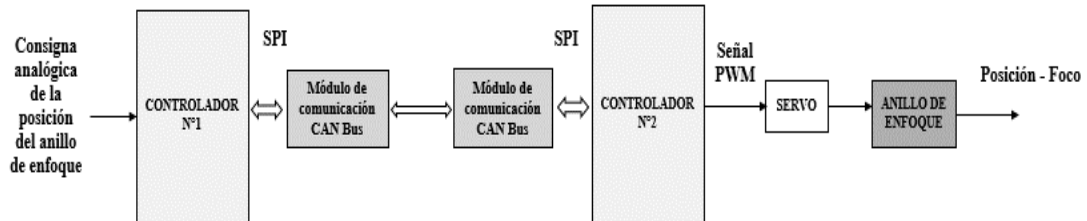


Figura 86. Diagrama de bloques para el control del anillo de enfoque.

Explicando brevemente el diagrama de bloques, para controlar el enfoque del lente se propone un control de posición a lazo abierto. El operador de cámara otorgará una consigna analógica a través un potenciómetro ubicado en el mando de control, el controlador recibirá la señal a través de uno de sus pines analógicos y enviará el dato al módulo de comunicación *CAN Bus* por medio de comunicación *SPI*. Luego, la trama viajará a través del cable del par trenzado hacia el lugar de ubicación del módulo de comunicación del otro controlador, se recibe la trama y la información es enviada al sistema embebido vía *SPI*, esta información será procesada y se ejecutará una acción determinada de acuerdo al dato recibido, en este caso, otorgar un ancho de pulso a la señal *PWM* acorde a la posición deseada del anillo de foco.

4.6.2. Diagramas de flujo para el control del enfoque del lente

Para el control del servo de enfoque se seguirá el desarrollo de los diagramas de flujo mostrados en las siguientes figuras: Figura 87, Figura 88, Figura 89 y Figura 90. En ellos se incluye el proceso de calibración del servo y que consiste en lo siguiente: previamente a usar el equipo se deberá calibrar el rango de operación del servo de manera que coincida con el rango de movimiento del anillo de enfoque del lente, esto es necesario por dos razones, una es que se pueda cubrir todo el movimiento del anillo y la otra para evitar daños al lente cuando el tope del anillo se haya alcanzado. Tras un proceso de ajuste del mecanismo que se explica con más detalle en el manual de operación, el operador podrá apreciar en el *display* del mando de control a través de la variable correspondiente la posición del servo sobre el lente, recordando que la posición se podrá ajustar a través de un potenciómetro de precisión; en el momento en que el servo llegue al tope de movimiento del lente se presionará el pulsador de calibración ubicado igualmente en el mando de control, realizando el ajuste automáticamente y haciendo coincidir el rango de operación del servo con el rango de movimiento del anillo.

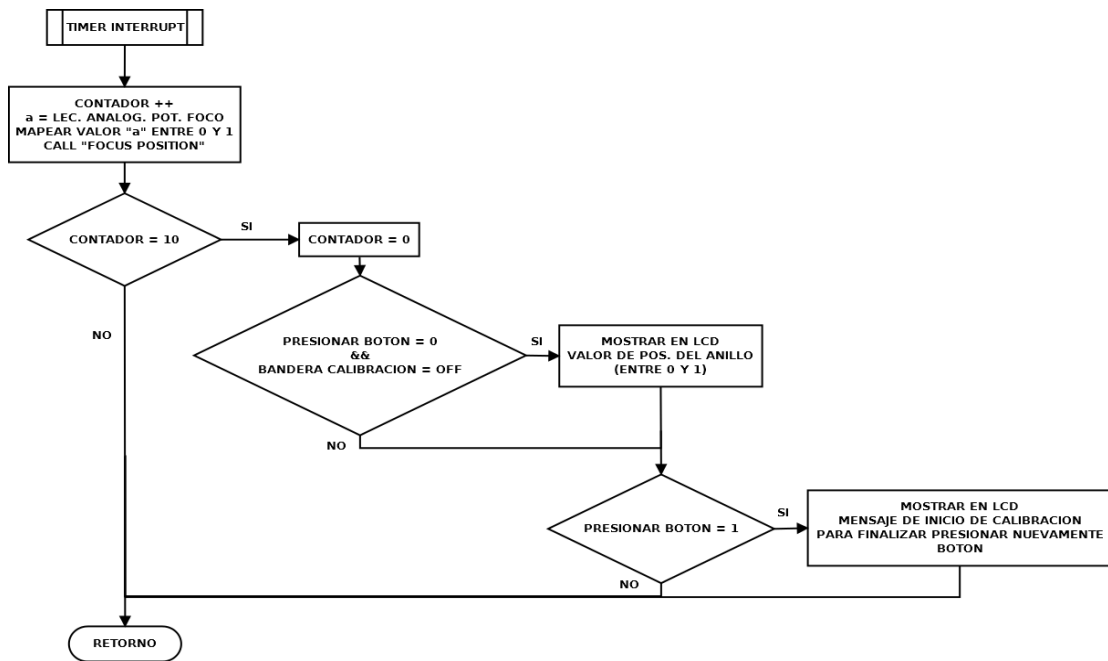


Figura 87. Diagrama de muestra de mensaje de calibración del mecanismo

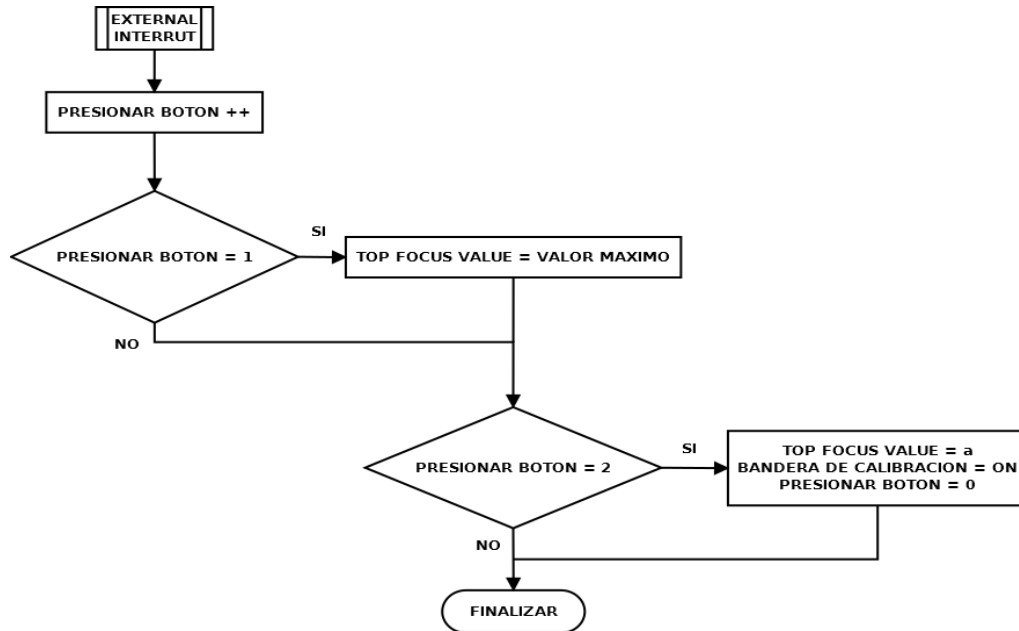


Figura 88. Calibración del servo

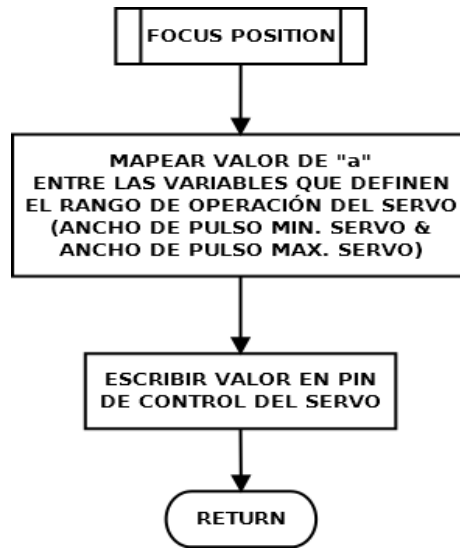


Figura 89. Diagrama para el control de posición del servo

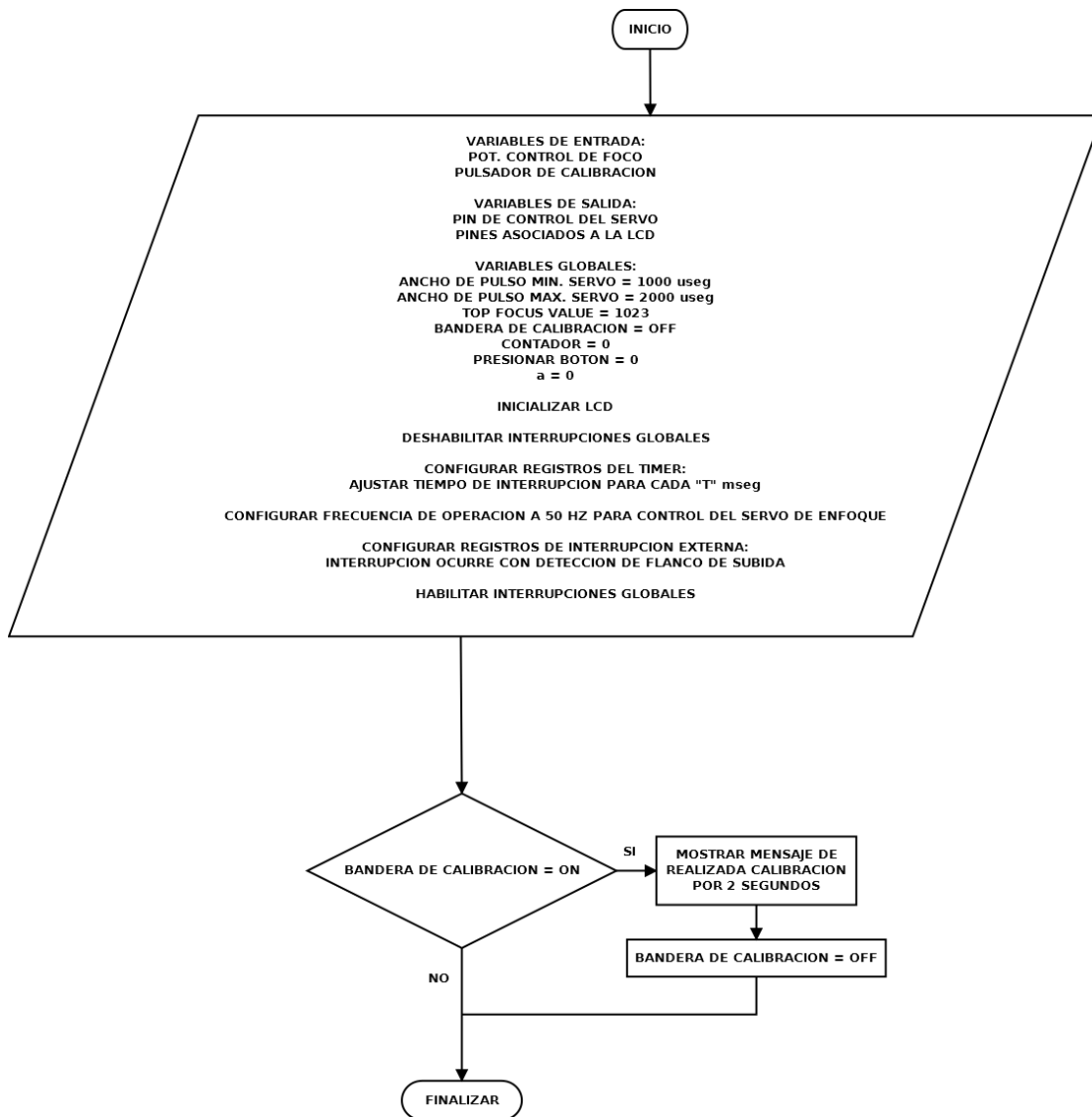


Figura 90. Configuración de parámetros y mostrar mensaje de realizada calibración

4.7. Zoom

4.7.1. Determinación del control de la variable *zoom*

Para determinar cómo se puede controlar esta variable es necesario conocer el modo de operación del dispositivo que permite manipular el anillo de *zoom* de manera remota. Por tal motivo es importante leer detalladamente el manual de especificaciones y de operación del “servo – *zoom*” que se encuentra ajustado al lente. Durante el estudio se pudo observar que los modelos de servos usados para el control del *zoom* tienen un funcionamiento similar, tanto para los lentes de marca *Fujinon* como para los de marca *Canon*. Describiendo brevemente el dispositivo, el “servo – *zoom*” posee internamente un par de motores de corriente continua y una electrónica asociada al movimiento de dichos motores, estos permiten el control remoto de los anillos de *zoom* e iris. La alimentación de la parte electrónica así como las señales de control son proporcionadas por la cámara a través de un cable que se conecta a un terminal del servo destinado para tal fin. De este modo, el operador de video podrá controlar remotamente el iris del lente siempre y cuando la cámara es alimentada por el *CCU* (por medio de un cable triax o de fibra) y que a su vez el *RCP* esté conectado a dicha unidad.

El *zoom* puede ser controlado de manera manual o automática. Normalmente, los camarógrafos manipulan esta variable por medio de un mando que se conecta al cuerpo del servo (ver Figura 91). Este mando es un potenciómetro maniobrado por el operador de cámara y permite variar la longitud focal del lente.



Figura 91. Mando de *zoom* con conector de 8 pines. [103]

Sin embargo, las distancias contempladas en el diseño no permiten al camarógrafo ajustar la longitud focal con el mecanismo presentado anteriormente, por lo que es necesario idear un modo de control del anillo de *zoom* que logre emular el funcionamiento del mando de *zoom*.

Realizando una investigación en los manuales de especificaciones y de operación del servo del lente, se obtuvo como resultado que para modificar la posición del anillo de *zoom* dentro del rango de movimiento permitido por el mecanismo es necesario proporcionar una señal de tensión analógica entre +2V y +8V, por lo que se deberá diseñar un circuito que conceda este rango de valores.

Para este caso se plantea la misma solución impuesta en la sección 4.2 de este trabajo de grado.

4.7.2. Control de posición del anillo de *zoom*

La Figura 92 muestra un diagrama de bloques para el control de posicionamiento de la longitud focal. En él, se plantea un control de posición a lazo abierto del anillo de *zoom*. Con este sistema de control, el operador de cámara proporcionará una consigna analógica con el potenciómetro asignado a la variable, ese valor determinará a fin de cuentas el ancho de pulso de la señal *PWM*. El dato será enviado hacia el otro controlador usando el protocolo de comunicación *CAN Bus*. Una vez recibida la información, es procesada y se ejecuta la acción para el control del servo del lente, la señal *PWM* generada por el “controlador n°2” es modificada por el bloque denominado “Filtro pasabajo RC y acondicionamiento de la señal” para otorgar los niveles de tensión adecuados para controlar el servomotor y ubicar el anillo en la posición deseada. Las variaciones de *zoom* se podrán visualizar a través de un monitor que muestra la señal de video de la cámara, esto permitirá realizar los ajustes adecuados.

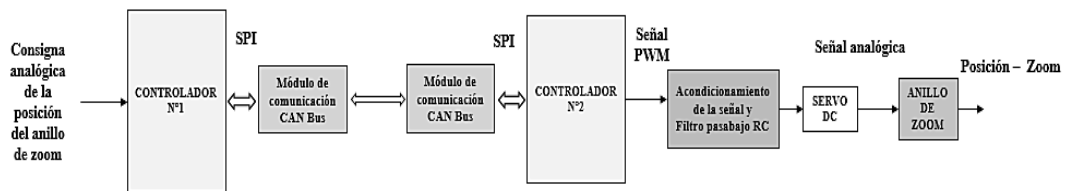


Figura 92. Diagrama de bloques para el control de posición del *zoom*

4.7.3. Diagrama de flujo para posicionamiento del anillo de *zoom*

El diagrama de flujo de la Figura 93 muestra los pasos a seguir para elaborar el código que controlará la variable de *zoom*, el control de la posición se realizará modificando el ancho de pulso de la señal *PWM*, el controlador tomará el nivel de tensión analógica de la salida del filtro pasabajo para indicar el porcentaje de acercamiento de la imagen.

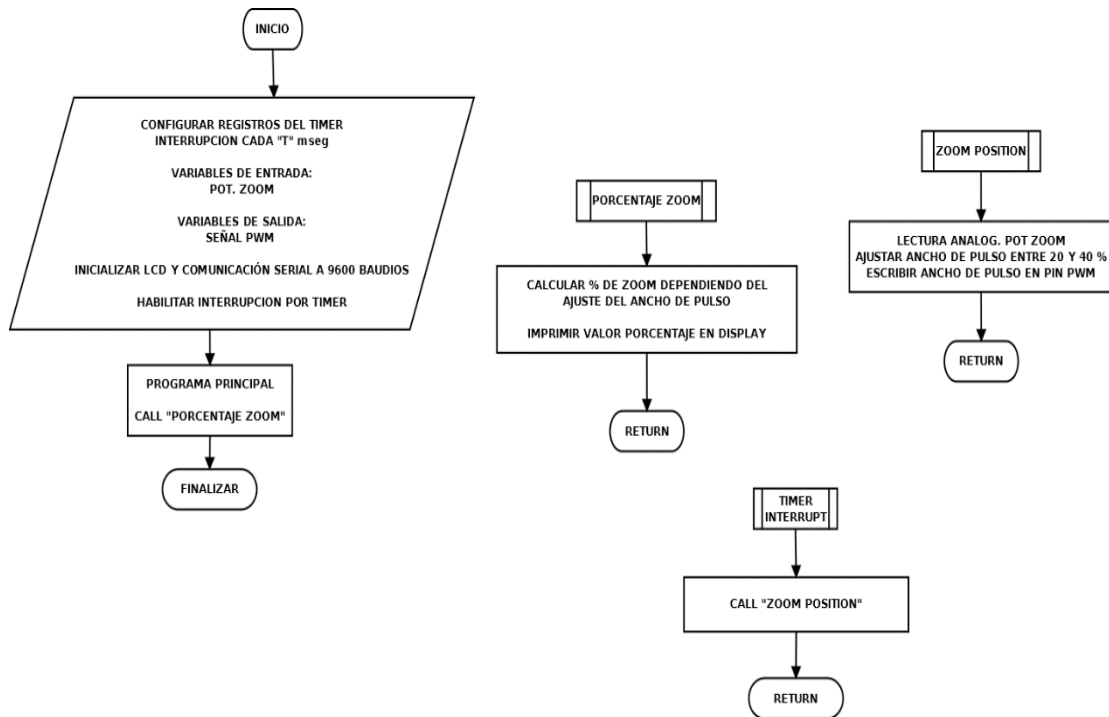


Figura 93. Diagrama de flujo para controlar el *zoom* del lente

4.8. Mando de control

4.8.1. Descripción del mando de control

El mando de control tendrá a disposición una serie de elementos de los cuales cada uno de ellos tendrá una función específica para el control y monitoreo del equipo. Algo que hay que tener como prioridad en el diseño del mando es que debe ser lo más sencillo e intuitivo posible de maniobrar para la persona encargada de manipular el equipo. Para tener una referencia de cómo puede ser manejado el equipo se ha realizado una investigación de modelos comerciales similares al planteado en este trabajo de grado, de allí se decidió que la manera más sencilla sería usando perillas y *joysticks*, lo que implica que todas las variables de entradas serán de naturaleza analógica. También es importante que el operador tenga un medio por el cual sea informado de algún evento especial, como por ejemplo, proximidad del final de carrera del *dolly*, exceso de corriente de los motores, monitoreo de la posición del *dolly*, entre otros. Lo más conveniente para cumplir con los ejemplos anteriores es añadiendo en el diseño una pantalla *LCD* y unos *LED's* para la indicación de tales eventos. Adicionalmente, se agregó un par de *switches* que permiten invertir la lógica de giro de los motores del cabezal y del *dolly*, ya que dependiendo de la ubicación del operador, quizás el sentido de movimiento no sea el esperado.

A continuación se enumerarán los elementos que conformarán el mando de control del sistema:

- (a) Un *joystick* de dos (2) grados de libertad y cuya finalidad será controlar las variables del cabezal (paneo y *tilt*). El *joystick* será sensible al tacto, es decir, a mayor variación de la palanca a su posición inicial, mayor será la velocidad de los motores a controlar.
- (b) Otro *joystick* que tendrá la función de controlar la velocidad y dirección del movimiento del *dolly* (un grado de libertad).
- (c) Una perilla (potenciómetro) que limitará la velocidad tope del *dolly*.
- (d) Un potenciómetro de tres (3) vueltas con un disco acoplado a su eje para facilitar el control del foco. Este elemento proporcionará una mayor precisión en el control de posición del anillo de enfoque.
- (e) Un pulsador para guardar datos de calibración de posición del mecanismo de enfoque.
- (f) Contará con dos (2) *switches* que permitirán invertir la lógica de trabajo de los motores del cabezal y del *dolly* (entradas digitales), esto con la finalidad de ayudar al operador de cámara de manejar el sistema cómodamente independientemente de su ubicación.
- (g) Tres leds indicadores de eventos de final de carrera, tanto para el *dolly*, paneo y *tilt*. Adicionalmente, un led indicador de emergencia que se activará en el momento de la sobrecarga de alguno de los motores del sistema.
- (h) Una pantalla *LCD* que indique al operador de cámara ciertos parámetros como: posición del carro sobre el riel, porcentaje de *zoom*, enfoque y advertencias detectadas por el sistema de control.
- (i) Un estuche para colocar la batería de 12V y poder alimentar la electrónica del mando de control.
- (j) Un conector *DB – 9* para la comunicación serial entre las tarjetas de control implicadas en el diseño (incluido en el módulo de comunicación seleccionado).
- (k) Un interruptor de encendido y apagado del mando de control.

Las siguientes imágenes (Figura 94 y Figura 95) mostrarán el bosquejo tentativo del mando de control:

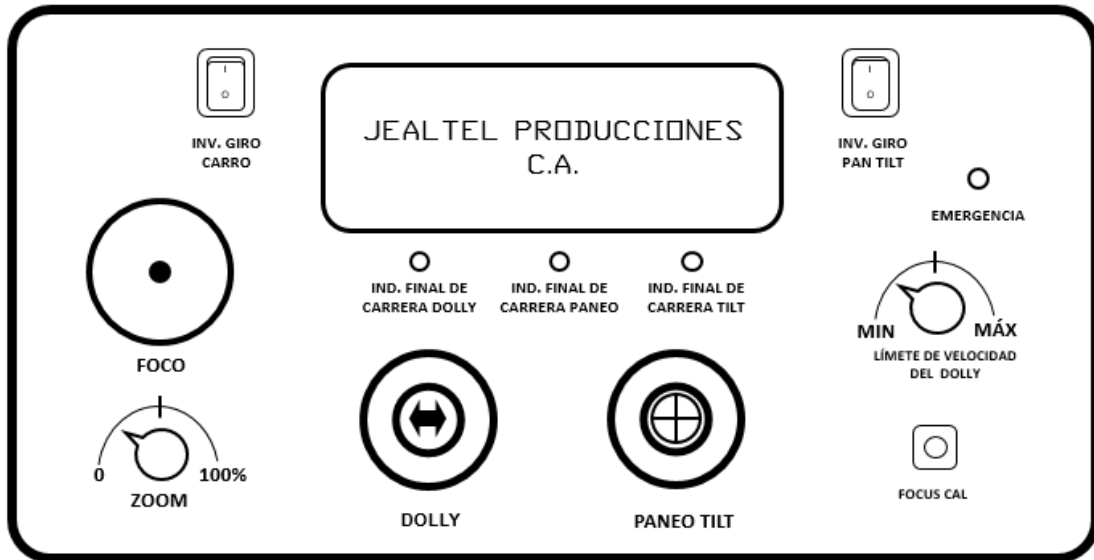


Figura 94. Mando de control



Figura 95. Parte posterior del mando de control

La Figura 96 muestra el diseño de un circuito que obtiene en la salida un pulso con un ancho de pulso determinado y que tiene la función depurar los rebotes

del pulsador al momento de ser presionado, esto es posible a través de un temporizador 555 en configuración monoestable.

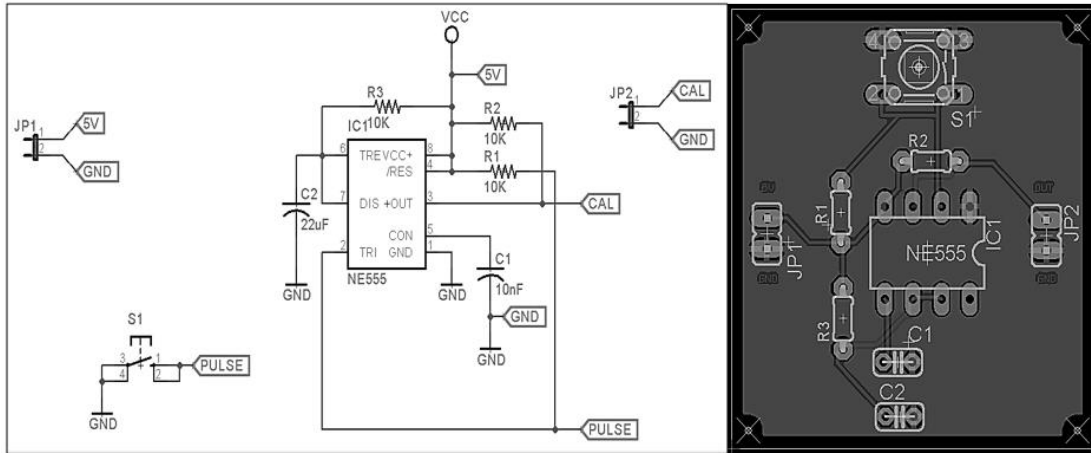


Figura 96. Circuito anti - rebotes al momento de presionar el pulsador. Dimensiones de la placa: 32,9 x 37 mm

4.8.2. Estimación de costos de algunos elementos del mando de control

La presente tabla (Tabla 35) mostrará el costo de los elementos principales que formarán parte del mando de control:

Tabla 35. Costo de algunos elementos que formarán parte del diseño del mando de control

Material	Cantidad	Precio por unidad	Precio por cantidad	Características
		US \$	US \$	
<i>Joystick</i> de 2 ejes	2	19.99	40.98	Resistencias de 5 K Ω , \pm 20% tolerancia, torque de operación: 90 gf (X), 250 gf (Y)
<i>LCD</i>	1	10.99	10.99	Pantalla de cristal líquido <i>LCD</i> azul de 20 columnas x 4 filas
Interruptor <i>SPST</i>	1	2.2	2.2	<i>Switch Rocker Mini on / off SPST</i> . Incluye 5 interruptores
Potenciómetro de precisión	1	7.03	7.03	Potenciómetro de 5 vueltas 10 K Ω , 5% tol
Potenciómetro	1	4.16	4.16	Incluye 5 unidades. Potenciómetro de 10 K Ω lineal
Perilla para potenciómetro	1	3.15	3.15	Contiene 10 perillas. Perillas de potenciómetro de 6 mm de diámetro

4.9. Elección de los controladores involucrados en el sistema

Actualmente existen numerosos sistemas embebidos con la capacidad de interactuar con el mundo exterior gracias a los módulos que conforman su

arquitectura básica, entre esos módulos se pueden nombrar los de comunicación serial, convertidores analógicos – digitales, salidas analógicas (*PWM*), entre otros.

A continuación se determinarán los controladores más adecuados para controlar las variables involucradas en el diseño. Para ello se estudiaron las numerosas posibilidades presentes en el mercado, tanto microcontroladores como tarjetas de desarrollo. Para facilitar la búsqueda, se ha comparado las características de los microcontroladores y las tarjetas de desarrollo *Arduino* con la intención de determinar cual resulta ser más conveniente para el proyecto. La Tabla 36 presenta la comparación.

Tabla 36. Tabla comparativa entre los microcontroladores y los modelos Arduino.

Microcontroladores		Arduino	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Mayor flexibilidad a la hora de diseñar.	Requieren de elementos adicionales para interactuar con el mundo.	No se necesita invertir en el diseño de la tarjeta.	Puede presentar inconvenientes en algunas aplicaciones debido al retraso en la ejecución de algunas instrucciones.
Optimización del código.	Compiladores y programadores costosos.	Curva de aprendizaje más rápida.	Tienen una estructura delimitada de difíciles de modificar.
Mucha más variedad en el mercado.	Es más complejo grabar el programa en el <i>chip</i> .	Numerosas librerías, programas y ejemplos para una acción en específico, aprovechando la mentalidad “Open Source”.	Los “ <i>shields</i> ” de Arduino suelen ser tan costosos como la misma tarjeta.
Ideal para proyectos que requieren espacios reducidos.	Se debe invertir dinero y tiempo en el diseño de una tarjeta.	Compatibilidad con otros módulos.	
Amplia especificación técnica.	Pocas librerías para ser usadas en un diseño específico.	Entorno de programación gratuito.	
Dispositivos económicos.		Programador incorporado.	
		Un lenguaje de programación más amigable.	

Con la comparación elaborada en la Tabla 36 se ha tomado la decisión de utilizar los sistemas embebidos *Arduino* debido a que presentan numerosas ventajas a la hora de desarrollar proyectos, entre ellas está que poseen un entorno de

programación gratuito y que además permite cargar el código al microcontrolador con suma facilidad, también hay que mencionar la característica más llamativa de arduino, y es que se define como una plataforma *hardware* de código abierto, por lo que se puede conseguir en la *web* una extensa documentación del producto (foros, librerías gratuitas, etc).

En base a lo comentado anteriormente, se tomarán en consideración únicamente los modelos de *Arduino* para ser usados como los controladores del sistema propuesto en el diseño. El procedimiento de selección parte desde la concepción de las exigencias del proyecto, es decir, enumerar la cantidad de controladores que interactúan, especificando protocolos de comunicación, entradas y salidas digitales, entradas y salidas analógicas. Posteriormente, se realizará un análisis a través de un diagrama de arañas para facilitar la elección de los controladores.

Luego de haber determinado el modo de operación de los dispositivos implicados en el diseño se elaboró un diagrama circuital que indica la naturaleza de las señales de control de manera que se pudiera facilitar la enumeración de las entradas y salidas, así como el modo de comunicación que deberá satisfacer cada controlador del sistema, el diagrama se puede visualizar en la Figura 97.

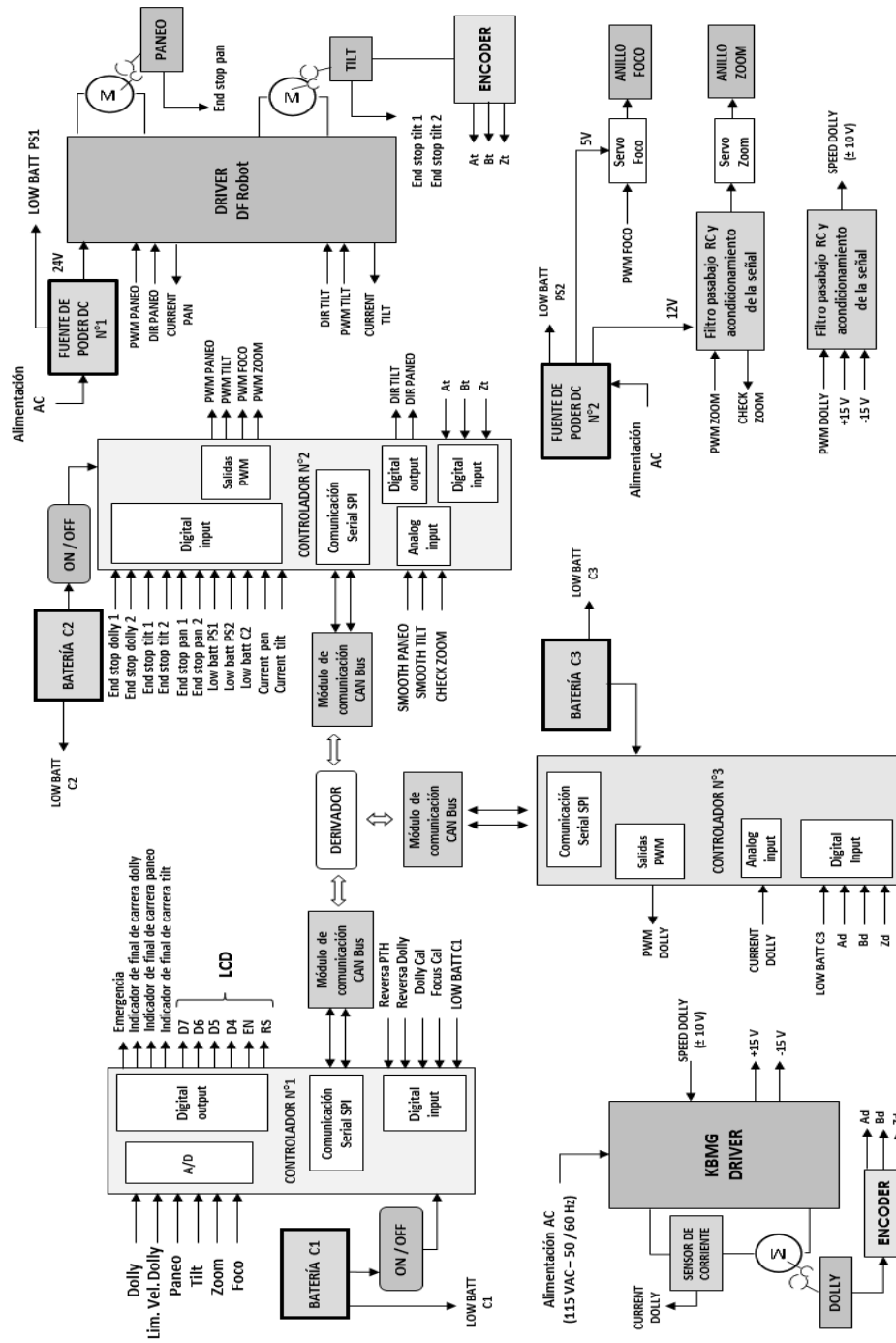


Figura 97. Bosquejo del diagrama circuital del sistema de control

En los datos mostrados en la Tabla 37 se enumera todo lo necesario para el control de cada sensor, actuador y módulo de comunicación, con ello se elaborará una comparación entre los diferentes modelos *Arduino* disponible actualmente y se escogerá el que mejor se adapte a tales condiciones.

Tabla 37. Requerimientos de los controladores implicados en el diseño.

Características	Controlador n°1 (Mando de control)	Controlador n°2 (Cabezal – lente de la cámara)	Controlador n°3 (Control del motor del <i>dolly</i>)
Entradas analógicas	6	3	1
Salidas <i>PWM</i>	0	4	1
E / S digitales	15	10	2
Comunicación serial	<i>CAN Bus</i>	<i>CAN Bus</i>	<i>CAN Bus</i>
Número de temporizadores	2	5	1
Interrupciones externas	2	6	2

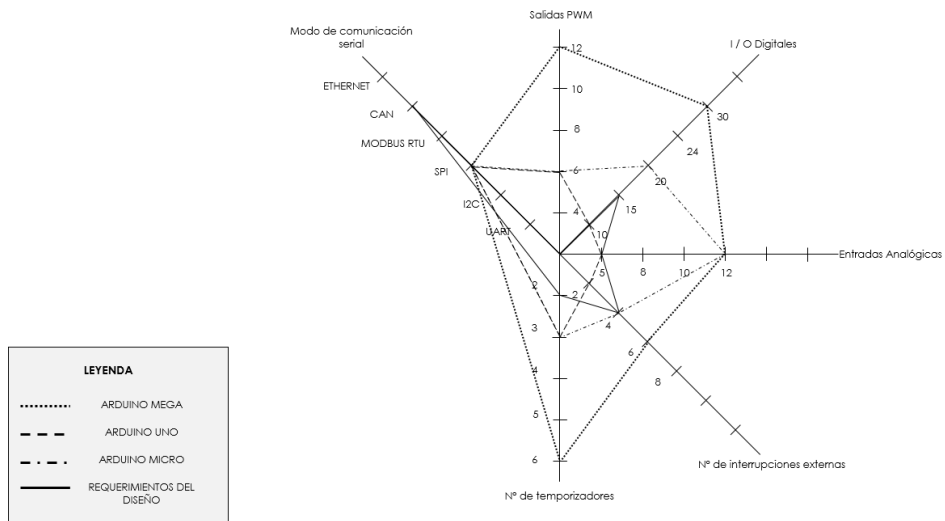


Figura 98. Diagrama de araña para seleccionar el controlador del mando de control [104] - [105] - [106]

Para el mando de control lo recomendable es usar un *Arduino Mega 2560* ya que supera notablemente la cantidad de pines digitales requeridos, lo cual es bueno porque se pueden agregar más dispositivos o más entradas de control.

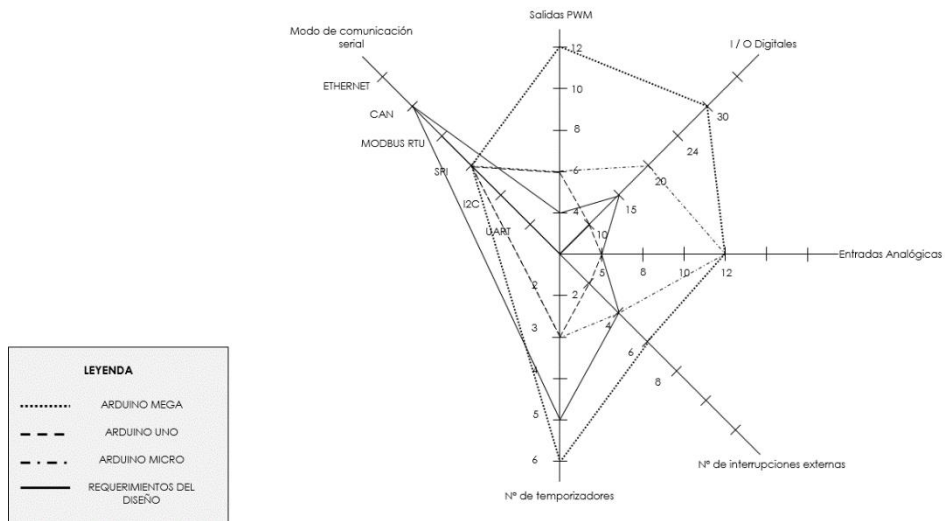


Figura 99. Diagrama de araña para seleccionar el controlador del cabezal y del lente
 [104] - [105] - [106]

Debido a las exigencias de cálculo, de monitoreo de eventos, entradas y salidas que exige el diseño para este controlador, se ha optado por escoger nuevamente el *Arduino Mega 2560*.

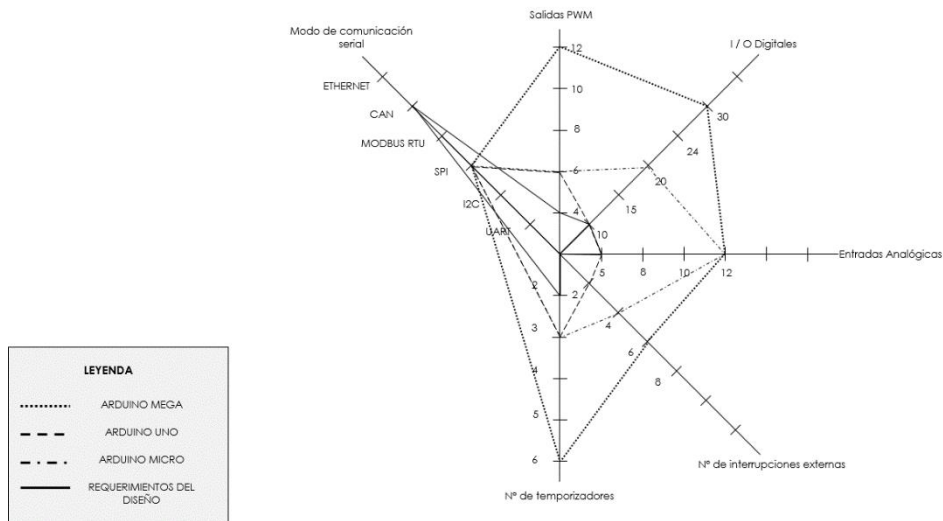


Figura 100. Diagrama de araña para seleccionar el controlador del motor del *dolly*
[104] - [105] - [106]

Este controlador es el de menor exigencia, pues solo se encarga de controlar la velocidad del motor y de monitorear la corriente que pasa por el devanado de armadura de la máquina. Cualquiera de las opciones planteadas cumple con las expectativas del diseño (excepto por el protocolo de comunicación). Se ha decidido usar el *Arduino Uno* ya que la tarjeta del módulo de comunicación *CAN Bus* es compatible con la arquitectura del modelo del controlador.

Ninguno de los modelos propuestos incluye el transceptor *CAN Bus*, sin embargo, lo interesante de arduino es que ya existen librerías gratuitas que facilitan la comunicación entre los sistemas embebidos, por lo tanto, se utilizará la comunicación *SPI* para enviar y recibir datos al módulo de comunicación *CAN* para que éste se encargue de transmitir la información al resto de los controladores del sistema.

Los diagramas circuitales del mando de control, del control del lente de la cámara y del cabezal, así como el encargado de controlar el motor del dolly se pueden observar en los anexos en las siguientes figuras: Figura 2, Figura 3 y Figura 4.

4.10. Diagrama esquemático para el control del equipo

En este punto ya se tiene definido el sistema por lo que es conveniente mostrar un diagrama de todos los elementos que estarán involucrados en el funcionamiento del mismo, tal diagrama se puede apreciar en la Figura 101.

El sistema es alimentado por una red trifásica que proporcionará suministro eléctrico a todos los equipos electrónicos. Un grupo de *UPS* es usado para otorgar autonomía por un tiempo aproximado a los 10 minutos (dependiendo del consumo).

En el bloque donde se ubica el operador de video se pueden detallar algunos elementos importantes para el control de la cámara y el monitoreo de la señal de video. El primer elemento es el *CCU*, este equipo se comunica con la cámara de televisión a través de un cable triaxial o de fibra dependiendo del caso, esta unidad posee numerosas funciones, como por ejemplo, enviar la potencia exigida por la cámara para que los circuitos electrónicos de la misma puedan operar, posee salidas de señal de video que serán utilizadas en el sistema para varias aplicaciones, una de ellas es otorgar una señal de retorno hacia el lugar donde se ubica el operador de cámara, de manera que esta persona pueda observar lo que se está grabando mientras el equipo es manipulado, por lo general, se usa un cable coaxial *RG – 59* para tal fin y este es conectado en su otro extremo a un monitor de video. También es conectado

vía cable coaxial hacia los instrumentos de medición que dispone el operador de video, estos instrumentos, denominados monitor forma de onda y vectorscopio, obtienen la señal de video de la cámara por medio de una de las salidas del *CCU* y permiten realizar mediciones de colorimetría y luminancia de la señal de video obtenida para hacer los ajustes adecuados a la señal, estos ajustes son visualizados además por un monitor el cual el operador de video dispone dentro de su lugar de trabajo. El técnico de video dispone además de un panel de control remoto (*RCP*), esta unidad está conectada directamente al *CCU* y tiene distintas funciones, entre todas ellas, la más importante para el control del equipo es la de manipular remotamente la abertura del diafragma de la cámara (iris).

Para poder mantener una comunicación constante entre los protagonistas dentro de la red de control y monitoreo de cámaras es importante tener a disposición un personal técnico de audio que pueda canalizar todas las señales de audio de ambiente, de las cámaras y de comunicación a través de una estación central de comunicación de audio, de esta manera el camarógrafo podrá recibir las indicaciones dadas por el director y el operador de video y comunicar algún inconveniente durante el manejo del equipo.

El indicado para maniobrar el equipo es el operador de cámara, esta persona contará con su mando de control con ciertos elementos para otorgar órdenes al sistema como por ejemplo, movimientos del cabezal, de los anillos del lente de la cámara y del *dolly*, sin embargo, el diseño contempla distancias superiores a los 50 metros, y por lo tanto, se dificulta enviar las señales de control desde su ubicación, por lo que es necesario el uso de una comunicación a distancia, que en este caso se ha optado por usar el protocolo *CAN Bus* para el envío y recepción de datos entre los controladores del sistema.

Como el motor encargado del movimiento del *dolly* no se ubica en el equipo como tal sino más bien en uno de los extremos del riel, el control del mismo se dificulta si el operador se sitúa a una distancia alejada del lugar del motor, para solucionar esto se agrega al diseño un controlador adicional que tendrá la finalidad de recibir los mandos dados por el camarógrafo y, por supuesto, realizar las respectivas acciones en ese instante. Evidentemente, la razón del derivador es que se contempla tres (3) controladores en el diseño (nodos), uno ubicado en el mando de control, otro ubicado en el *dolly* y el último, en el lugar donde se ubica el *driver* del motor de la plataforma de rodaje. La topología física de comunicación es la de tipo bus, de manera que la transmisión de datos será por medio de un par de cables trenzados que conectarán entre sí a los nodos.

En el *dolly* se contará con todo lo necesario para controlar las variables relacionadas con el movimiento del lente y del cabezal, tal es el caso de los motores, los *drivers*, la fuente de alimentación, el módulo de comunicación serial y el controlador seleccionado durante el desarrollo del trabajo de grado.

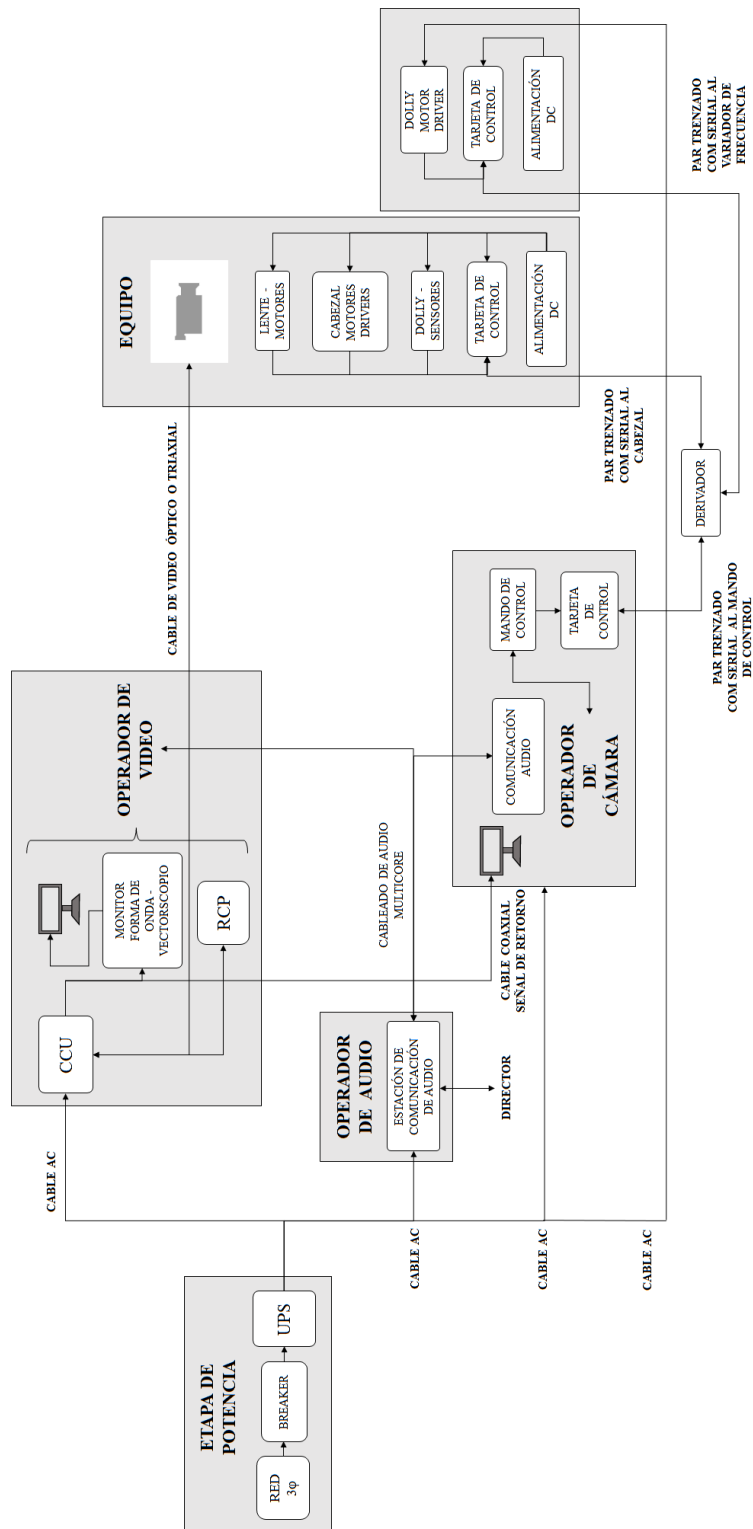


Figura 101. Diagrama esquemático del sistema a controlar y los elementos que lo conforman

4.11. Estimación del presupuesto de los elementos seleccionados

Tabla 38. Costo estimado de los elementos principales que formarán parte del equipo

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO POR UNIDAD	PRECIO POR CANTIDAD
		US \$	US \$
<i>Arduino Mega 2560</i>	2	38,83	77,66
<i>Arduino Uno R3</i>	1	22,19	22,19
Fuente de poder para motores del cabezal	1	28,08	28,08
Módulos de comunicación <i>CAN Bus</i>	3	21,87	65,61
Mecanismo de enfoque	1	1.000	1.000
Rieles + accesorios	1	19.259,33	19.259,33
Columna	1	7.261,98	7.261,98
Motor <i>dolly</i>	1	356	356
<i>Driver dolly</i>	1	228	228
Sensor de corriente	1	8,77	8,77
Motor paneo + caja reductora	1	300	300
Motor <i>tilt</i> + caja reductora + encoder	1	350	350
<i>Driver</i> motores del cabezal	1	43,15	43,15
Sensor magnético	6	3,45	20,7
Imán para final de carrera de paneo y <i>tilt</i>	6	1,39	8,34

Tabla 39. Costo estimado de los elementos principales que formarán parte del equipo

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO POR UNIDAD	PRECIO POR CANTIDAD
		US \$	US \$
Base del <i>dolly</i> + accesorios	1	46.750,00	46.750,00
Encoder motor <i>dolly</i>	1	148	148
Fuente de poder para motores del lente	1	10,95	10,95
Sensor de voltaje	3	6,16	18,48
Elementos del mando de control	1	100	100
TOTAL (US \$):			76.057,24

CAPÍTULO V

Resultados y análisis de resultados

5. Presentación de las simulaciones

A continuación se mostrarán las pruebas realizadas para mostrar el comportamiento de las variables a controlar y los resultados obtenidos bajo simulación.

5.1. Simulación de control motor *dolly*

El circuito mostrado en la Figura 102 se usará para exponer el comportamiento del control de velocidad del motor, visualizar la medición de la velocidad del motor y la posición de la plataforma de rodaje, observar la respuesta del sistema ante advertencias de final de carrera del recorrido del *dolly* y emergencia por exceso de corriente en el motor. El circuito lo conforma el controlador *Arduino Mega 2560*, cuenta además con una serie de elementos de visualización que indican el sentido de giro del motor, advertencias de final de carrera y emergencia por exceso de corriente. El comportamiento dinámico de los sensores de final de carrera es similar al cambio de estado que puede provocar, por ejemplo, un pulsador, y su lógica de activación es inversa (nivel bajo – lógica activa “0”). También se dispone de un switch (*change dir*) que permitirá invertir el sentido de giro del motor de manera que sea más conveniente para el operador manipular el equipo. La consigna de velocidad será dada por un potenciómetro (*joystick*) y éste tendrá la capacidad de indicar la

velocidad deseada para ambas direcciones de giro. El potenciómetro “*speed lim dolly*” indicará la velocidad máxima que podrá alcanzar el motor para ambos sentidos de giro. En cuanto a la detección de exceso de corriente se debe recordar que se ha seleccionado un sensor de corriente que arroja valores de tensión analógica entre 0,5V y 4,5V; de manera que su comportamiento dinámico es similar a la lectura de tensión de un potenciómetro, y que en este caso será el denominado “*current sensor*”. El bloque llamado “*circuit speed motor*” contiene internamente el diagrama circuital representado en la Figura 60 y permitirá enviar los niveles de tensión adecuados al *driver* del motor.

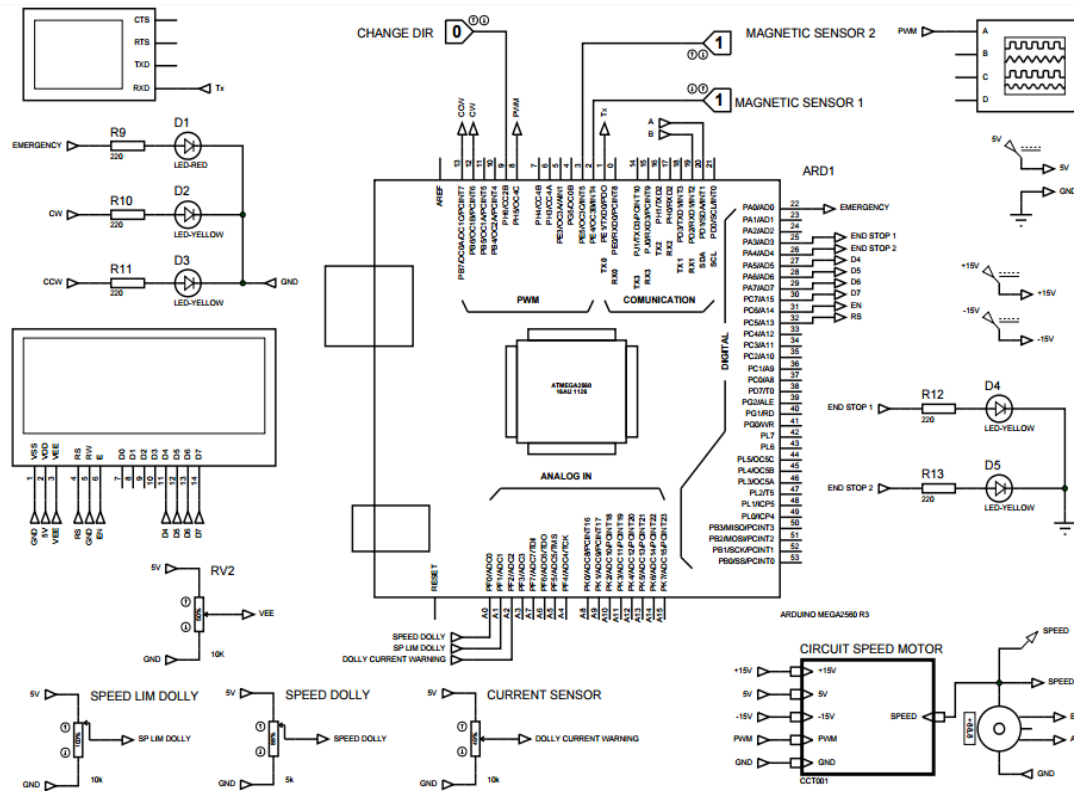


Figura 102. Circuito de prueba para mostrar funcionamiento de control de motor *dolly*

5.1.1. Control de velocidad del motor *dolly*

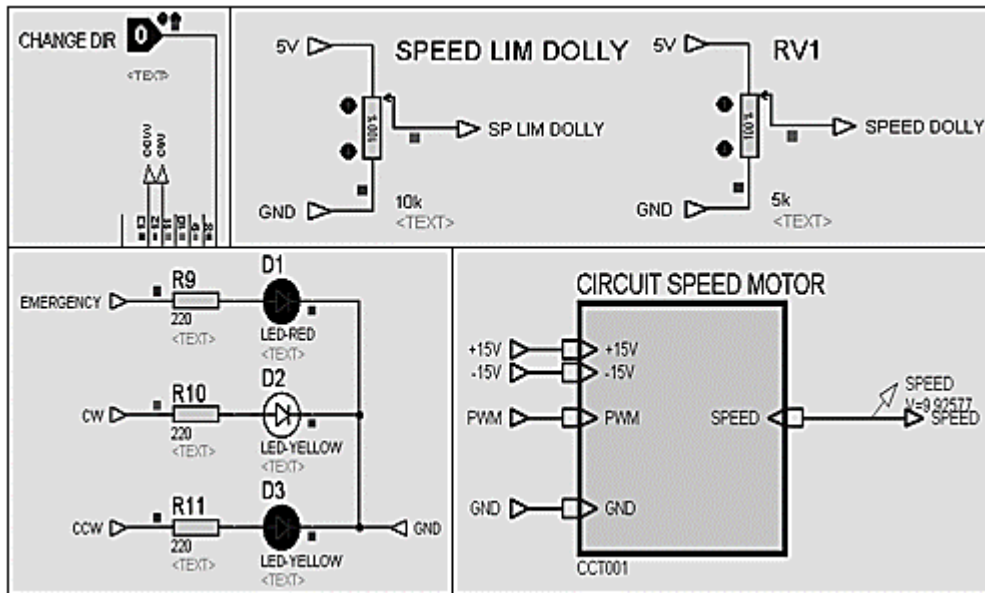


Figura 103. Máxima tensión entregada al *driver* para que el motor gire en un sentido a su máxima velocidad. *Change dir* = 0

La Figura 103 permite visualizar la entrega de tensión al *driver* del motor para indicar que opere a su máxima velocidad, para ello, el potenciómetro que limita la velocidad del motor será colocado a su máximo valor, de manera que cuando el *joystick* otorgue un valor máximo o mínimo se logre tal condición para ambos sentidos de giro del motor. La imagen muestra que el led “*cw*” se enciende, indicando una dirección de movimiento del *dolly*.

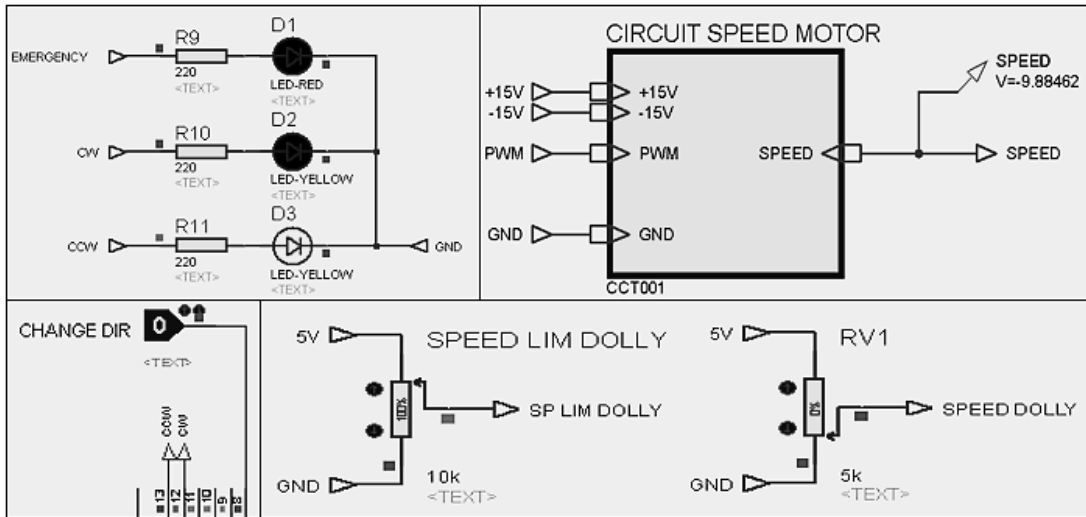


Figura 104. Máxima tensión entregada al *driver* para que el motor gire en sentido contrario a su máxima velocidad. *Change dir* = 0

Cuando el *joystick* se ubica al otro extremo, el led “*ccw*” se encenderá indicando que el motor girará en el sentido contrario, además se puede apreciar que en este caso la tensión que será otorgada al *driver* será negativa.

Si el estado lógico del pin de entrada denominado “*change dir*” cambia a “1” lógico o nivel alto, el control de velocidad del motor será similar, sólo que para tal caso el sentido de giro del motor será al contrario al presentado anteriormente para las mismas posiciones del *joystick*, las siguientes imágenes (Figura 105 y Figura 106) darán a entender el comportamiento deseado:

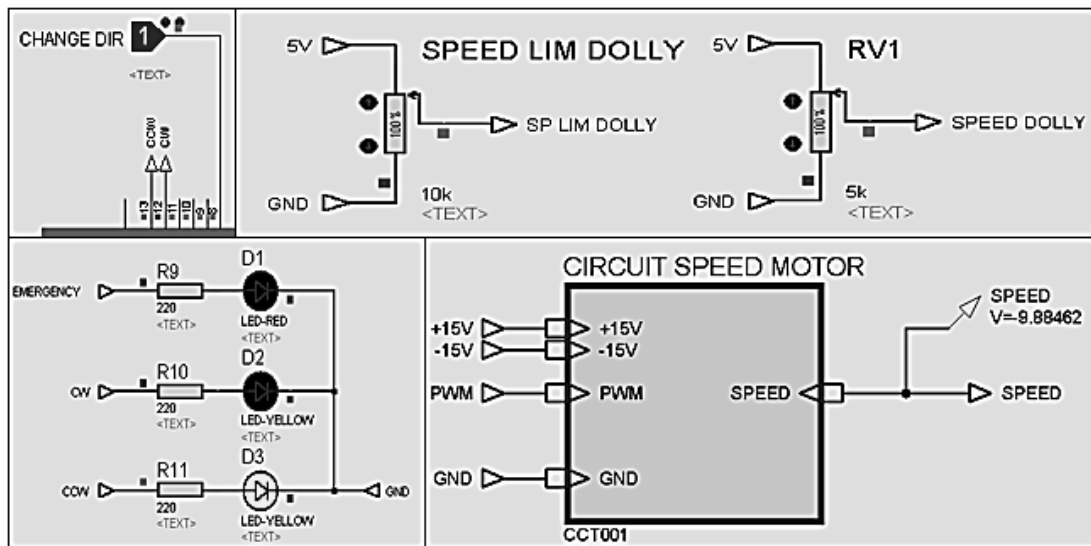


Figura 105. Máxima tensión entregada al *driver* para que el motor gire en un sentido a su máxima velocidad. *Change dir* = 1

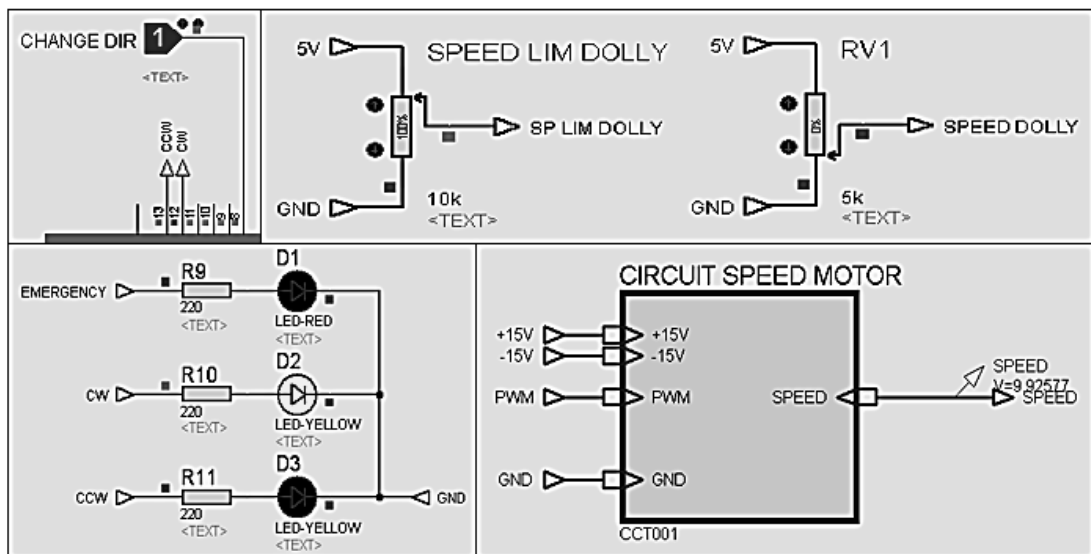


Figura 106. Máxima tensión entregada al *driver* para que el motor gire en sentido contrario a su máxima velocidad. *Change dir* = 1

5.1.2. Limitador de velocidad del motor *dolly*

Si la aplicación requiere de una menor velocidad en el movimiento del *dolly*, el mando de control dispondrá de un potenciómetro que permitirá limitar la velocidad de giro del motor. Las siguientes figuras (Figura 107 y Figura 108) mostrarán los niveles de tensión entregados al *driver* cuando se trabaja únicamente con el 50% de la velocidad máxima del motor:

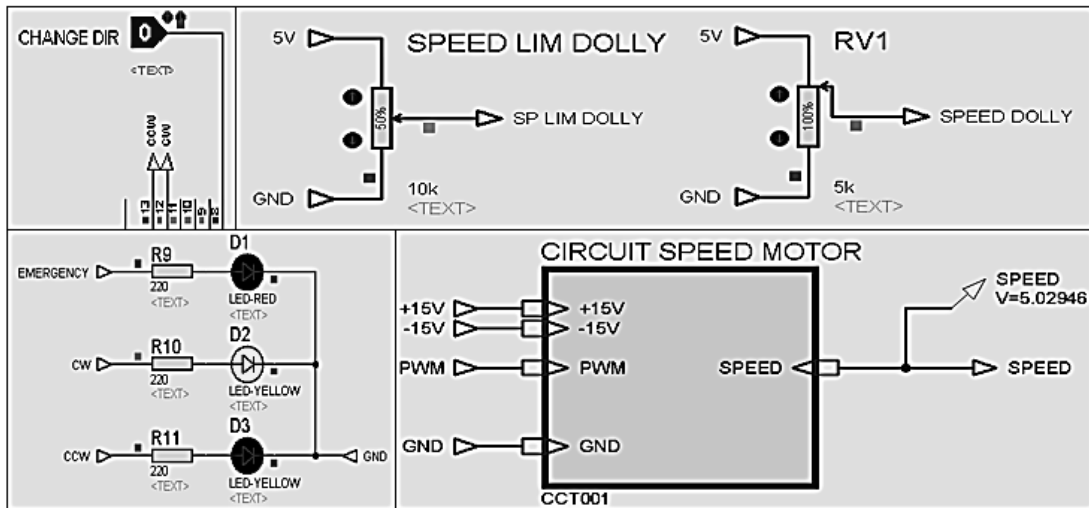


Figura 107. Velocidad limitada en un 50%. Motor gira en un sentido, “*cw*” = ON, “*change dir*” = 0

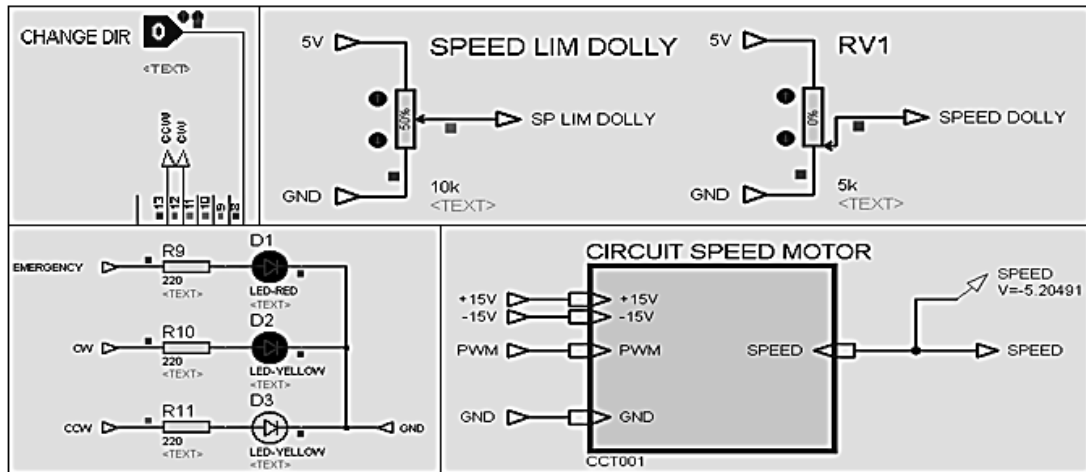


Figura 108. Velocidad limitada en un 50%. Motor gira en sentido contrario, “*ccw*” = ON, “*change dir*” = 0

Como se puede apreciar, la tensión entregada al *driver* se redujo a la mitad, lo que quiere decir que el motor podrá desarrollar una velocidad máxima cercana al 50% de su capacidad.

5.1.3. Caso de exceso de corriente en el motor del *dolly*

Si se detecta un exceso de corriente en los devanados del motor se deberá detener el movimiento y se encenderá el led de emergencia ubicado en el mando de control. El sensor de corriente será emulado por el potenciómetro denominado “*current sensor*” en el cual para niveles menores a los 2,5V indicará valores de corriente negativos y para niveles de tensión superiores a dicha referencia indicará valores de corriente positivos. Las siguientes imágenes (Figura 109 y Figura 110) muestran los resultados obtenidos en caso de que se detecte el evento para ambos sentidos de giro del motor:

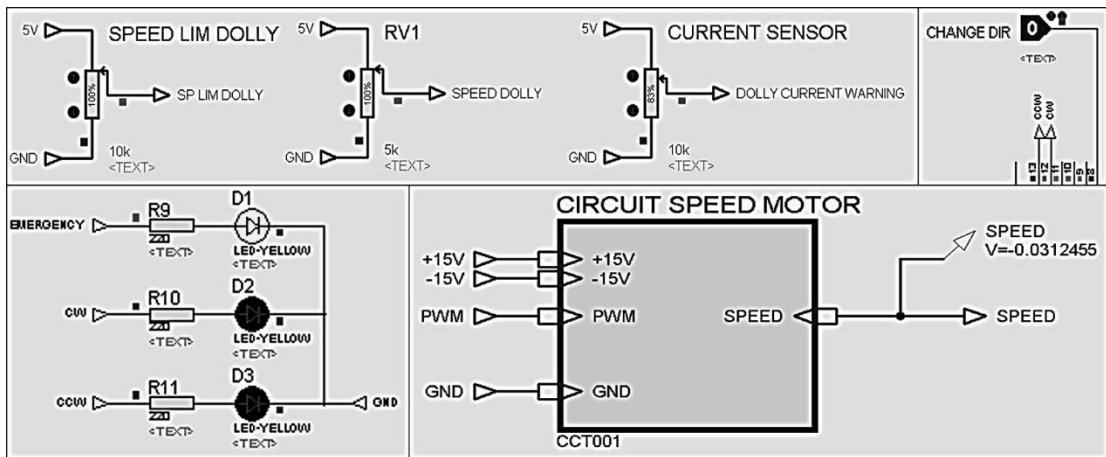


Figura 109. Exceso de corriente para cuando motor gira en un sentido. Sistema detiene el giro del motor, *emergency led = ON*

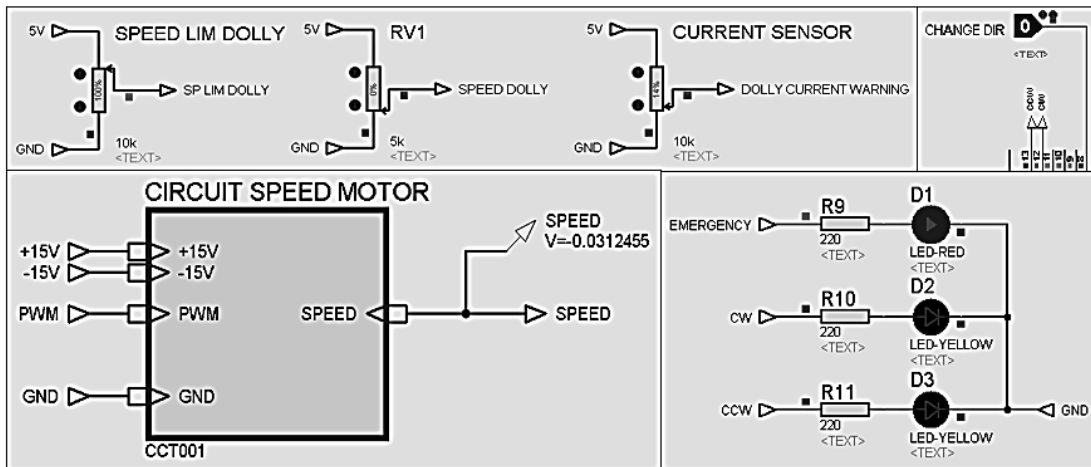


Figura 110. Exceso de corriente para cuando motor gira en sentido contrario. Sistema detiene el giro del motor, *emergency led = ON*

Se puede apreciar que para ambos casos la tensión del motor es cero (0), esta condición se mantendrá mientras el sensor de corriente detecte un caso perjudicial para el funcionamiento del motor.

5.1.4. Casos de activación de finales de carrera

Esta prueba se realizará con el fin de mostrar el comportamiento del sistema cuando se detecta la presencia del final de carrera, en este caso, la plataforma de rodaje. Si un sensor se activa, la tensión del motor será nula y después de haber transcurrido un cierto tiempo se habilitará el movimiento del motor pero únicamente en el sentido contrario al momento de la activación del sensor de final de carrera. Una vez que el sistema reconozca que el *dolly* se ha alejado del final de carrera podrá habilitar el movimiento en ambos sentidos. Hay que recordar que la presencia de un nivel lógico “0” indica que el sensor está activado. Las siguientes figuras (Figura 111 y Figura 112) mostrarán lo explicado anteriormente para ambos sensores:

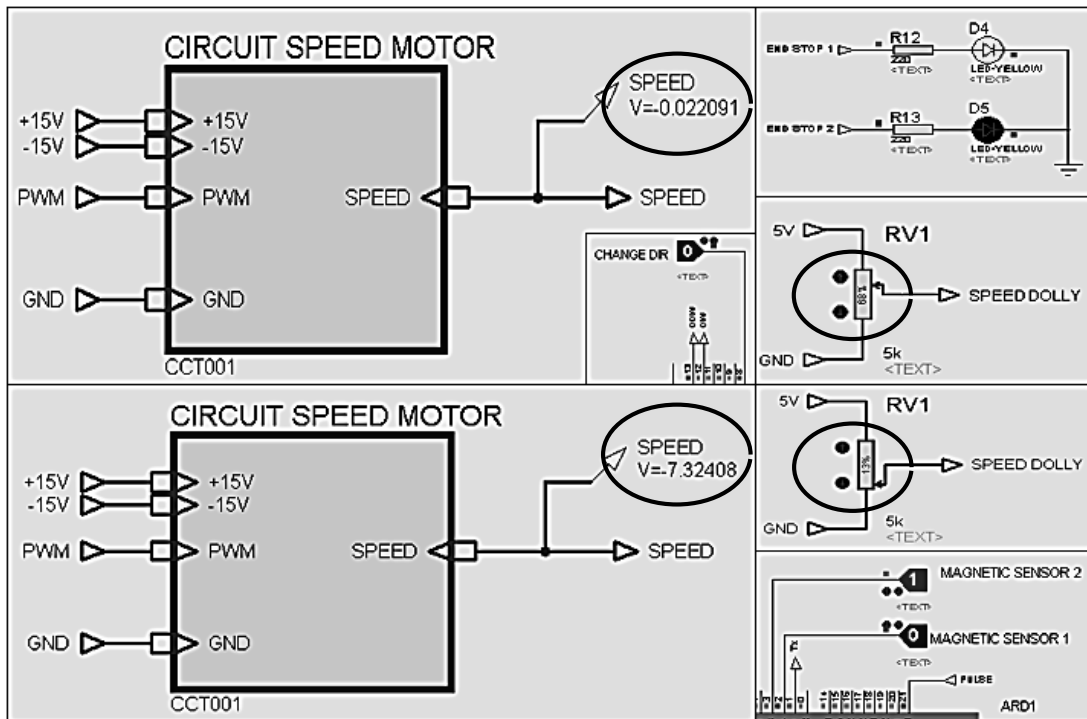


Figura 111. Activación sensor 1, detención del motor, sistema sólo permite movimiento en sentido contrario hasta alejarse del final de carrera

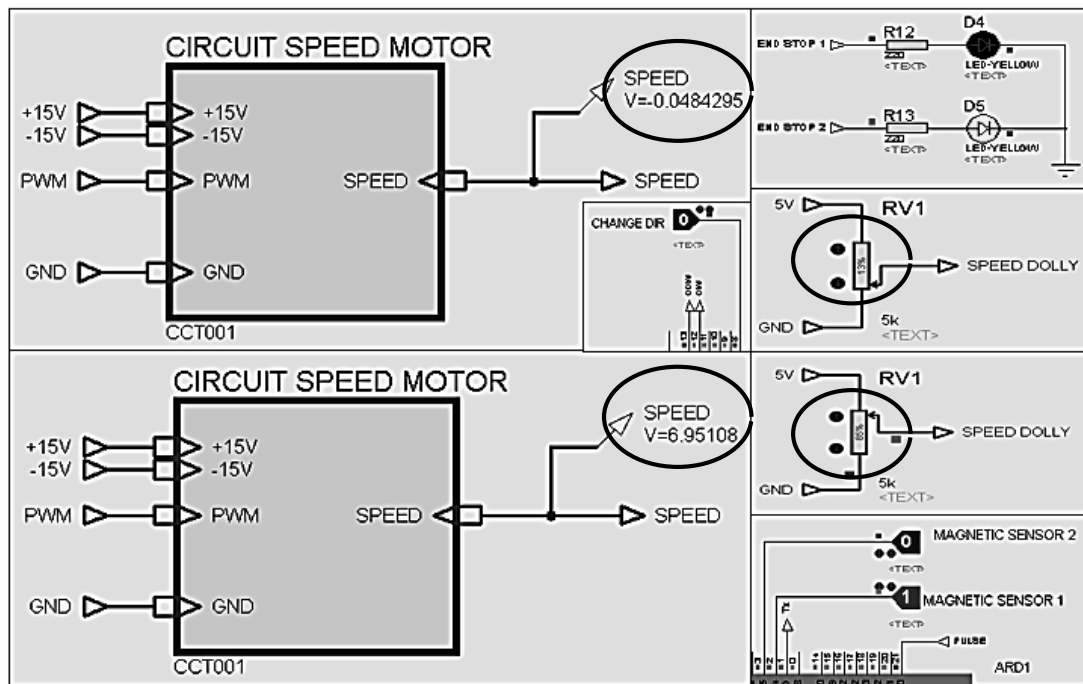


Figura 112. Activación sensor 2, detención del motor, sistema sólo permite movimiento en sentido contrario hasta que se aleje lo suficiente del final de carrera

5.1.5. Mostrar medición de la posición del *dolly*

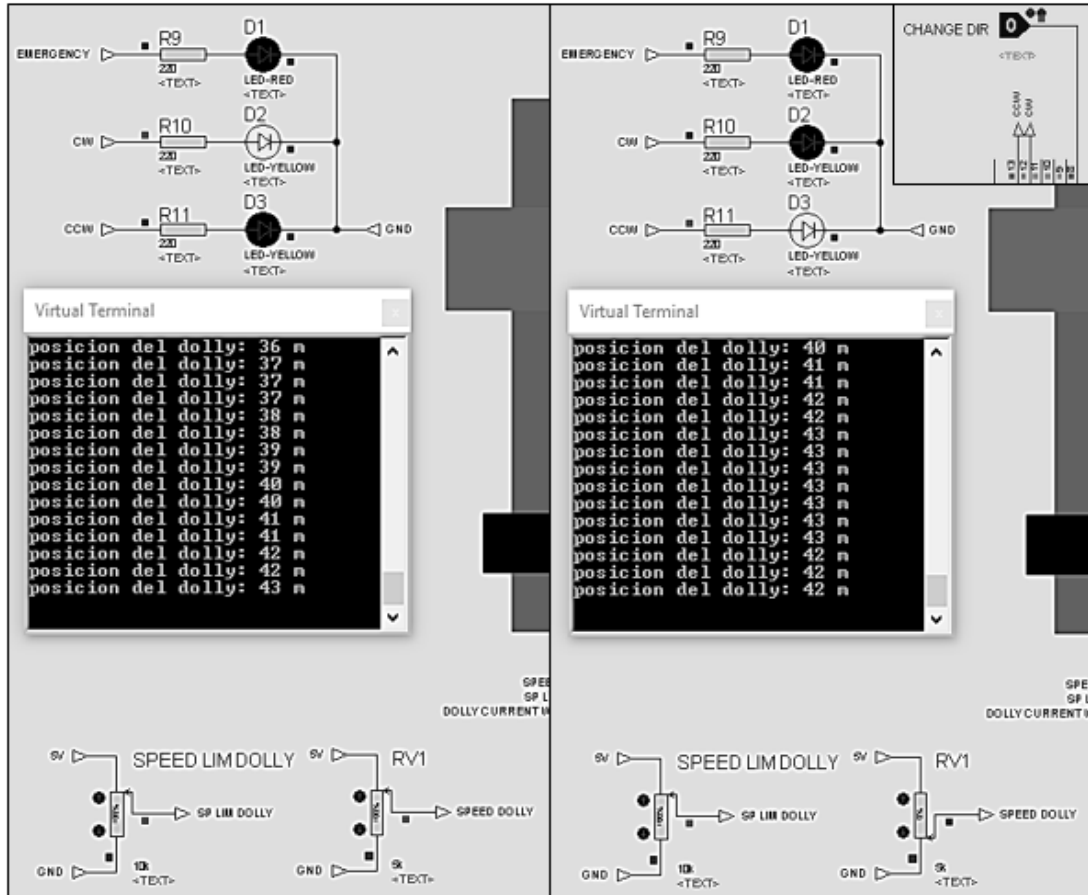


Figura 113. Estimación de la posición del *dolly* cuando el motor gira en un sentido y luego invierte su sentido de giro

La Figura 113 muestra un ejemplo del resultado de la estimación de la posición del *dolly*, allí se puede ver que cuando el potenciómetro “*speed dolly*” otorga una tensión mayor a 2,5V el valor de la posición aumenta, cuando dicho potenciómetro se ubica a un valor menor a los 2,5V el sentido de giro del motor cambiará y, por lo tanto, el valor de la posición disminuye.

5.2. Cabezal

Para demostrar el comportamiento de los motores durante el funcionamiento, se ha realizado una serie de simulaciones en *Simulink*, además, se ha realizado una simulación en *ISIS Proteus* para mostrar el desarrollo de la tensión del motor a través del filtro digital cuando se otorga un determinado valor de referencia.

5.2.1. Análisis del comportamiento de los motores del cabezal

Para demostrar el funcionamiento de control de velocidad de los motores del cabezal se procedió a realizar una simulación en *Simulink*. En principio, se modela el motor de corriente continua, luego se agrega la caja reductora seleccionada, la etapa reductora del cabezal y la carga (todo el conjunto está referenciado al eje del motor). Luego se indica el rango de tensión de alimentación de los motores para cumplir con la condición de diseño de velocidad del movimiento. Además se muestran los resultados de la simulación de la estimación del comportamiento de la velocidad, la corriente, el torque de los motores y la posición de la cámara cuando son alimentados con una tensión determinada.

Para la simulación se consideran los datos mostrados en la Tabla 40:

Tabla 40. Datos a considerar para las simulaciones de control de los motores

Especificaciones	Motor <i>Pan</i>	Motor <i>Tilt</i>
Voltaje Nominal	36V	48V
Velocidad sin carga	5400 rpm	
Inductancia	240 μ H	430 μ H
Resistencia	0,78 Ω	1,38 Ω
Inercia del rotor	171 g.cm ²	
Constante contraelectromotriz	63,65 mN.m/A	84,86 mN.m/A
Velocidad máx. entrada caja reductora	4500 rpm	
Eficiencia de la caja reductora	90 %	
Máximo torque permitido por la caja reductora	32 N.m	
Relación de velocidad caja reductora	45:1	100:1
Relación de caja reductora del cabezal	5:1	2,5:1
Inercia de la carga	0,625 Kg.m ²	1,51 Kg.m ²
Velocidad angular máxima del movimiento	60 rpm	25 rpm
Tiempo mínimo en obtener la tensión deseada en los bornes del motor	1 s	

5.2.1.1. Simulaciones motor de paneo

Los resultados a mostrar a continuación corresponderán con las simulaciones hechas para un determinado perfil de la señal de control (voltaje del motor) que permite el giro del motor en ambos sentidos y que además logre desarrollar su velocidad máxima. Los parámetros del filtro discreto se han ajustado para que la señal de control tenga un tiempo de establecimiento de un segundo.

Las variables que definen el filtro discreto son el período de muestreo (T), el cual es fijado a un valor de 10 mseg, así como la posición de los polos a lazo abierto del filtro (denominados “a” y “b”). La distancia entre ambos polos viene dada por la relación $b / a = 2$. Como condición de diseño se fijó el tiempo de establecimiento para

alcanzar la velocidad deseada en el motor entre uno y tres segundos. Mediante pruebas se ha determinado que para cumplir tales condiciones, los polos deben estar ubicados en un valor entre $a = 6$, $b = 12$ (1 s). Hay que recordar que la posición de los polos del filtro discreto puede modificarse con un potenciómetro.

La tensión necesaria para que el motor desarrolle su velocidad máxima se calcula conociendo el valor de la constante contra - electromotriz. En base a los datos de la Tabla 40, el voltaje del motor debe ser de 18V para lograr tal condición.

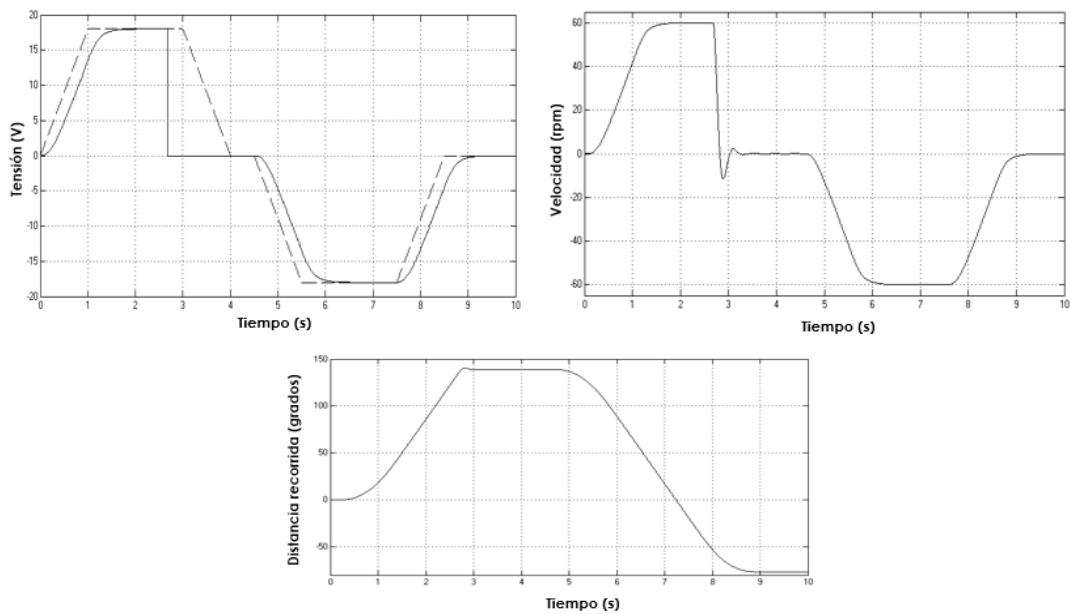


Figura 114. Alimentación del motor paneo, velocidad y recorrido realizado

En la Figura 114 se puede apreciar que el motor deja de ser alimentado en un tiempo aproximado de 2,75 segundos, esto se debe a que la cámara ha sido detectada por uno de los sensores magnéticos (ubicado a 135° de la posición de reposo de la cámara), por lo que el sistema de control interpreta que es momento de detener el

movimiento. También se puede notar que el motor alcanza el valor de velocidad máxima (60 rpm) exigida en las condiciones de diseño. Debido al repentino cambio en la señal de referencia una vez activado el final de carrera, el motor se ve obligado a detener el movimiento lo más pronto posible, lo que ocasiona una dinámica oscilatoria. Se puede observar además que la carga (cámara) se detiene unos grados después de la posición de uno de los sensores puesto que no cuenta con un tope mecánico para detener el movimiento justo en la posición del final de carrera.

La Figura 115 muestra de mejor manera qué ocurre con la posición del paneo de la cámara durante el frenado de final de carrera. El comportamiento mostrado no es el deseado para este tipo de aplicación, sin embargo, hay que considerar que se presenta en un caso particular donde el motor gira a 60 rpm y debe frenar drásticamente. Las oscilaciones en este caso no representan un inconveniente debido que el porcentaje de sobrepico es bajo y el tiempo de establecimiento es pequeño.

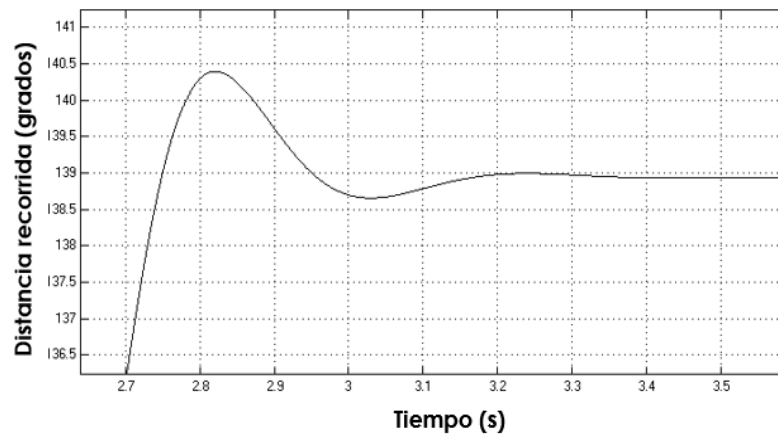


Figura 115. Oscilación presentada durante el frenado de final de carrera

La Figura 116 muestra el comportamiento de la corriente y el torque del motor, el sobrepico y la oscilación de la señal de corriente es producto del esfuerzo para frenar el motor instantáneamente al momento de ser detectado por el sensor de final de carrera. Sin embargo, la caja reductora está en la capacidad de soportar estos esfuerzos mecánicos ya que puede aguantar un torque en régimen intermitente de hasta 32 N.m.

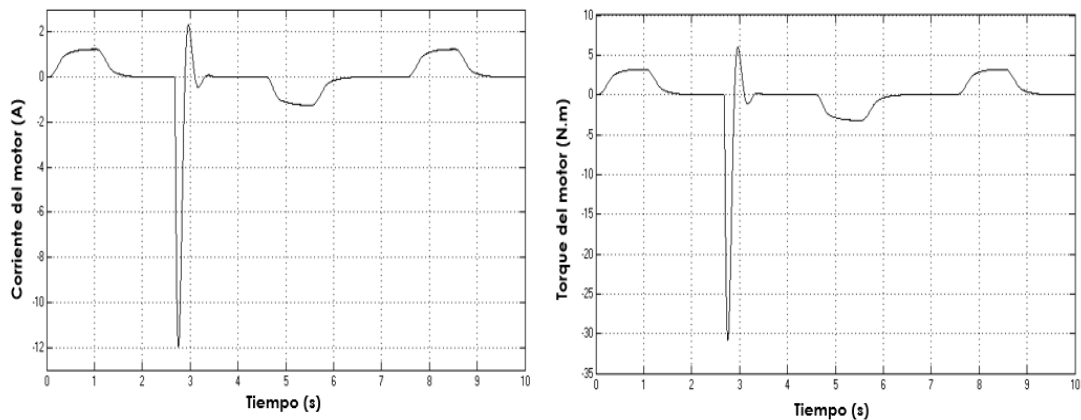


Figura 116. Corriente y torque del motor paneo

5.2.1.2. Simulaciones motor *tilt*

La Figura 117 presenta el posicionamiento de la cámara luego de haber sido alimentado el motor con una tensión de 6V. La simulación es realizada a través de un control de velocidad a lazo abierto. El problema que surge es que el efecto de la gravedad no permite que la posición de inclinación de la cámara permanezca fija en su lugar cuando el motor ha dejado de ser alimentado, por esta razón es necesario el uso de un controlador PI, de manera que la posición permanezca fija

independientemente del efecto de la gravedad sobre la carga como se presenta en la Figura 118.

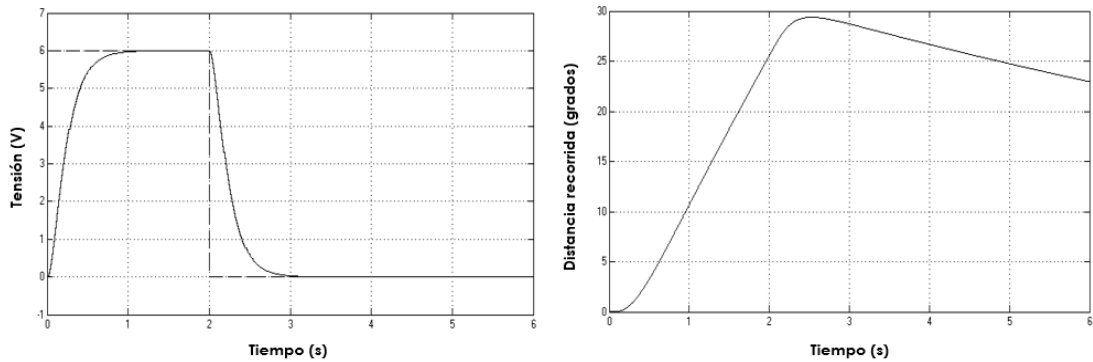


Figura 117. Tensión de entrada del motor, posición de inclinación de la cámara

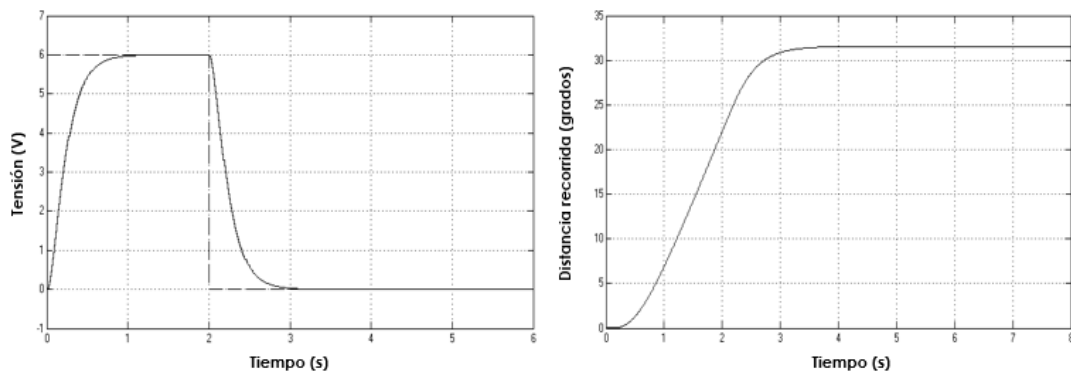


Figura 118. Tensión de entrada del motor, posición de inclinación de la cámara con el controlador PI

Los resultados a mostrar a continuación corresponderán con las simulaciones hechas para un determinado perfil de la señal de referencia que permite el giro del motor en ambos sentidos y que además logre desarrollar su velocidad máxima. Los

parámetros del filtro discreto se han ajustado para que la señal de referencia tenga un tiempo de establecimiento de un segundo.

La tensión necesaria para que el motor desarrolle su velocidad máxima se calcula conociendo el valor de la constante contra - electromotriz. En base a los datos de la Tabla 40, el voltaje del motor debe ser de 22,25V para lograr tal condición.

Se ajustaron los valores de K_p y K_i del controlador PI de manera tal que la respuesta de velocidad sea la más apropiada para la aplicación. Los valores obtenidos durante la sintonización realizada por ensayo y error fueron los siguientes: $K_p = 0,1$ y $K_i = 2,7.E-4$.

La Figura 119 muestra el comportamiento de la velocidad del motor y el recorrido hecho por la cámara durante el movimiento de inclinación. Nótese como se deshabilita la alimentación del motor una vez detectado el final de carrera y la posición de la cámara permanece fija.

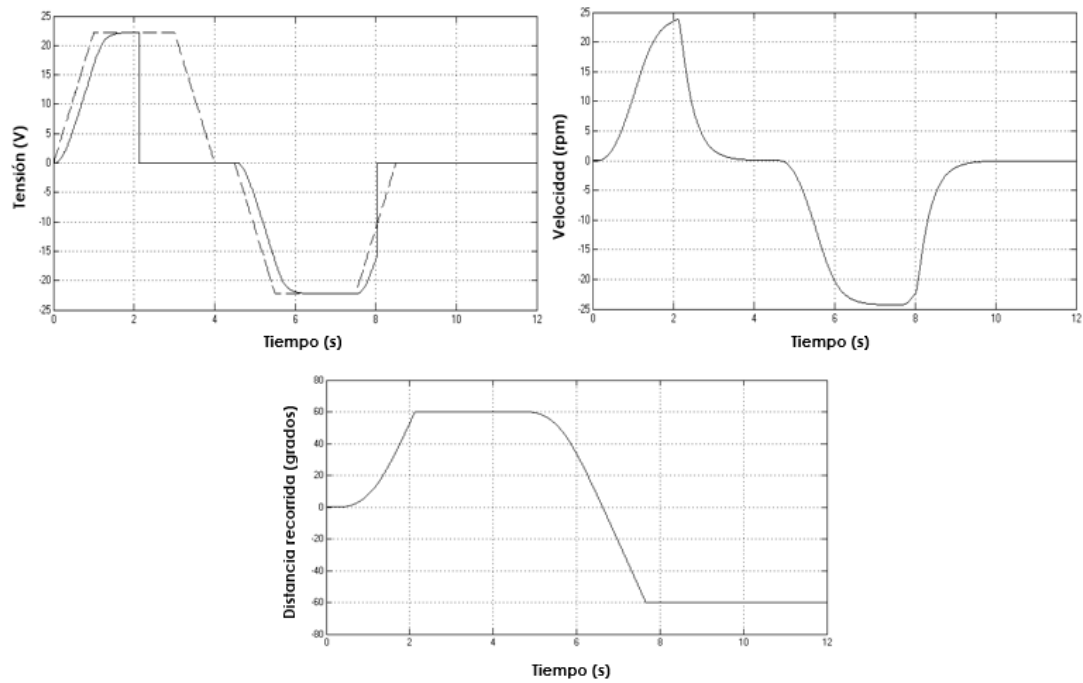


Figura 119. Señal de referencia, de velocidad y recorrido del movimiento

En la Figura 120 se observa el comportamiento de la corriente del motor, los cambios bruscos se deben a que el motor se ve obligado a detener su movimiento repentinamente debido a que ha llegado al final de carrera, se puede apreciar además que el valor de la corriente se estabiliza a un valor determinado, característica que permite mantener la cámara en una posición fija, contrarrestando el efecto de la perturbación.

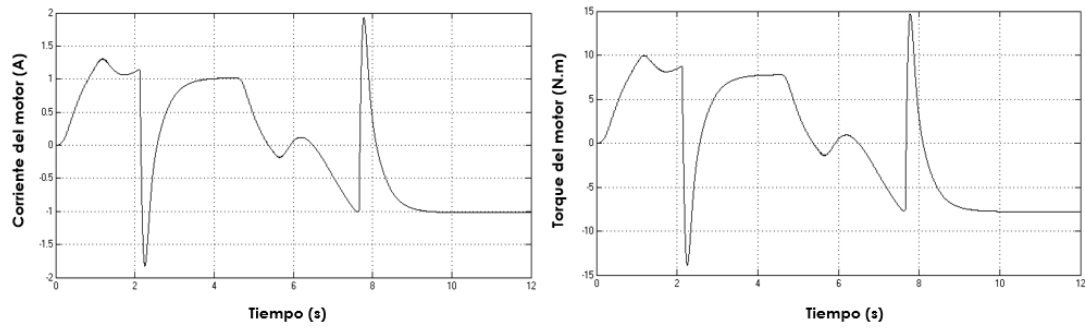


Figura 120. Corriente y torque del motor *tilt*

5.2.2. Simulación del voltaje de entrada de los motores del cabezal

El circuito mostrado en la Figura 121 permitirá visualizar cómo la tensión de los motores varía con la ayuda del filtro discreto desarrollado por *software*. Se cuenta con un *Arduino Mega 2560* y un par de potenciómetros. El potenciómetro “*speed*” realiza la función de un *joystick*, el cual permite indicar la velocidad y el sentido de giro del motor. El potenciómetro “*smooth*” determinará la dinámica del filtro discreto. Los resultados se observan en la Figura 122, en donde la referencia es un voltaje de 12V. La pantalla “*virtual terminal*” arroja los valores cada 250 ms.

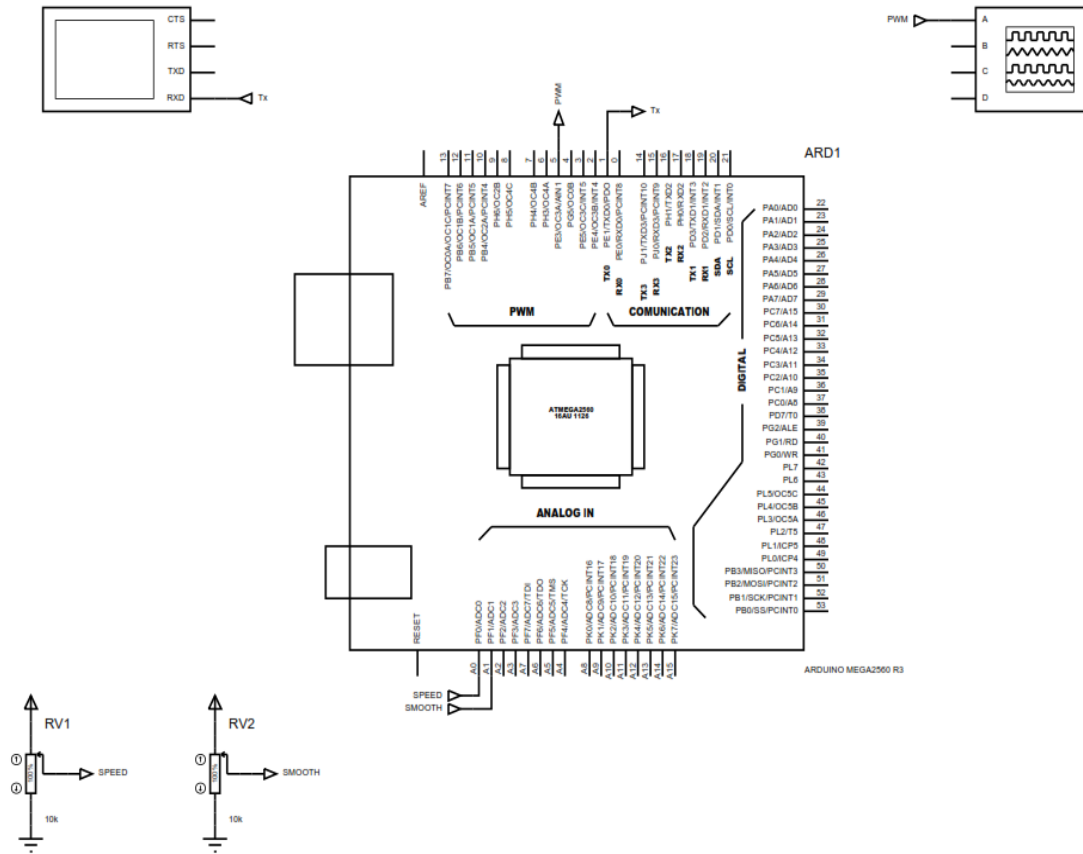
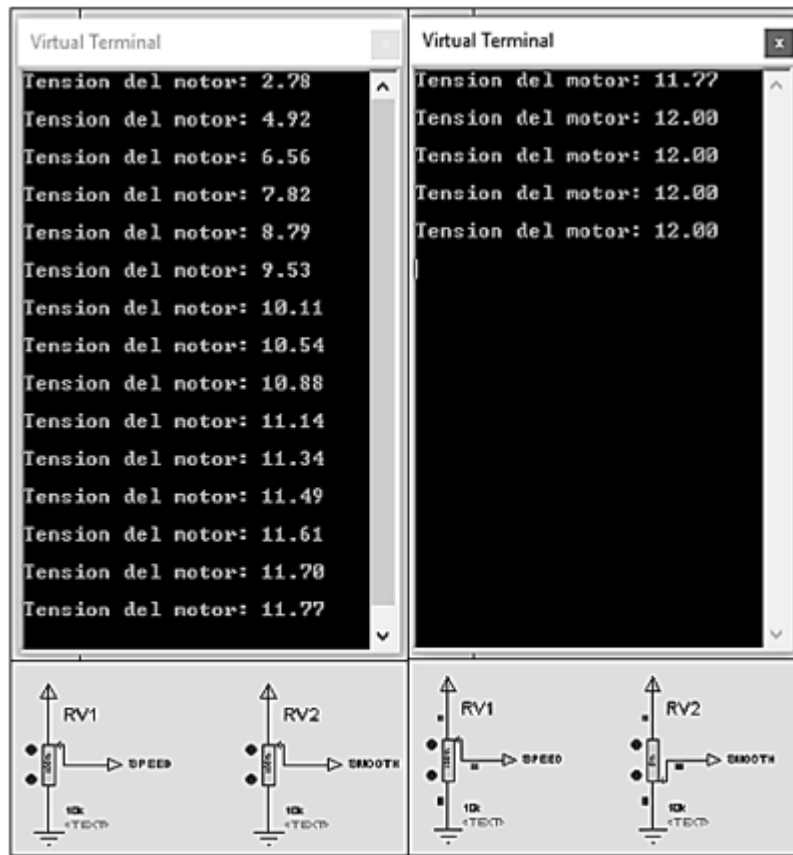


Figura 121. Circuito de prueba para desarrollo del filtro discreto



Tiempo de muestra de resultados: 250 ms

Figura 122. Desarrollo de la tensión de los motores del cabezal para $a = 1$, $b = 2$ (izq) y $a = 10$, $b = 20$ (der)

En cuanto al funcionamiento del sistema de advertencias de final de carrera y de emergencia por exceso de corriente, el proceso es muy similar al explicado en las pruebas de simulación del control del motor del *dolly*, la diferencia radica en que el *driver* seleccionado para el control de los motores del cabezal posee un par de salidas digitales para indicar un exceso de corriente en el motor, sin embargo, la respuesta del sistema ante la presencia de este evento es la misma, de igual forma sucederá para cuando se detecta el final de carrera de los movimientos del *paneo* y *tilt* de la cámara, recordando además que la señal de control que se deberá otorgar al

driver de los motores del cabezal será directamente la señal *PWM* proveniente del *Arduino Mega 2560*.

5.3. Foco

La Figura 123 muestra el circuito para realizar las simulaciones de control del servo. El circuito está conformado por el sistema embebido *Arduino Mega 2560*, un *display* que muestra los mensajes correspondientes a la calibración y la variable a controlar (posición del servo), un potenciómetro que permite ajustar la posición del servomotor y un pulsador el cual será utilizado para definir el rango de operación del servo.

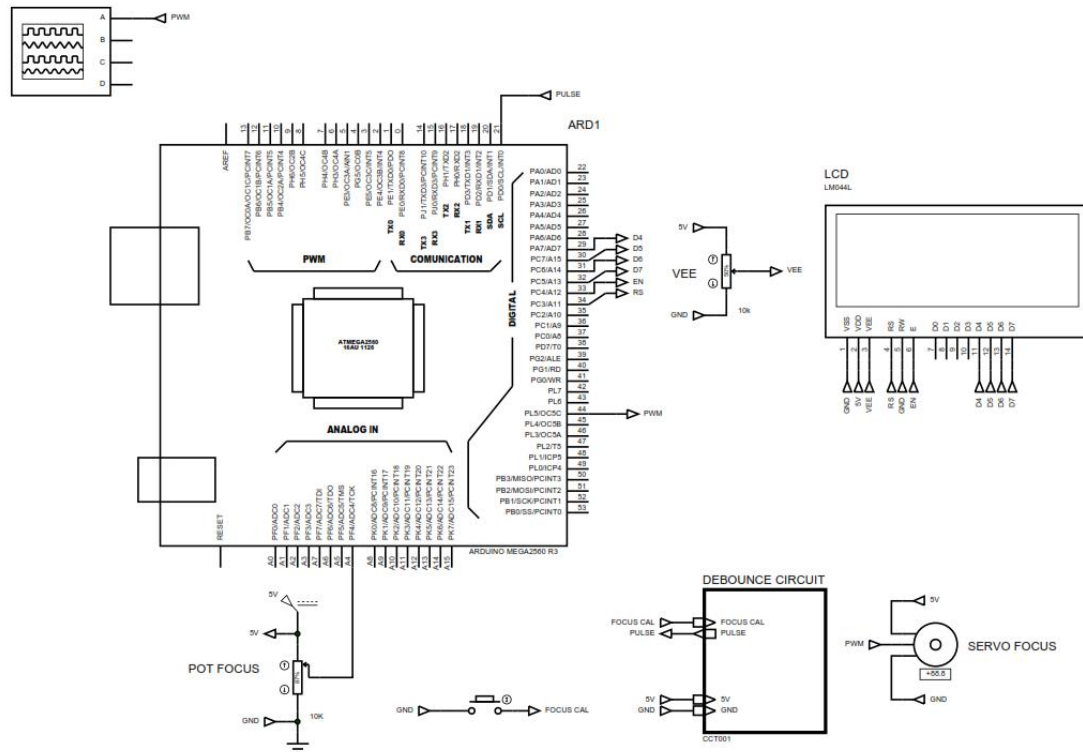


Figura 123. Circuito de prueba para mostrar funcionamiento del servo de enfoque

5.3.1. Simulación de calibración del servo motor de enfoque

Previo al uso del equipo, el personal técnico debe calibrar el rango de operación del servomotor para que coincida con el rango del movimiento del anillo de enfoque. Para ello, el servomotor deberá estar ubicado en uno de los extremos del rango de movimiento del anillo de enfoque (posición inicial). El sistema de control indicará que se ejecute la calibración del rango de operación del servo de enfoque, en el que el usuario hará uso del potenciómetro ubicado en el mando de control para controlar la posición del servo. En el ejemplo de esta prueba, el final de carrera del lente corresponde con un ángulo de desvío de 122 grados en el servo como lo indica la Figura 124, cuando el servo logre operar en todo el rango de movimiento del anillo de enfoque se presionará el botón de calibración.

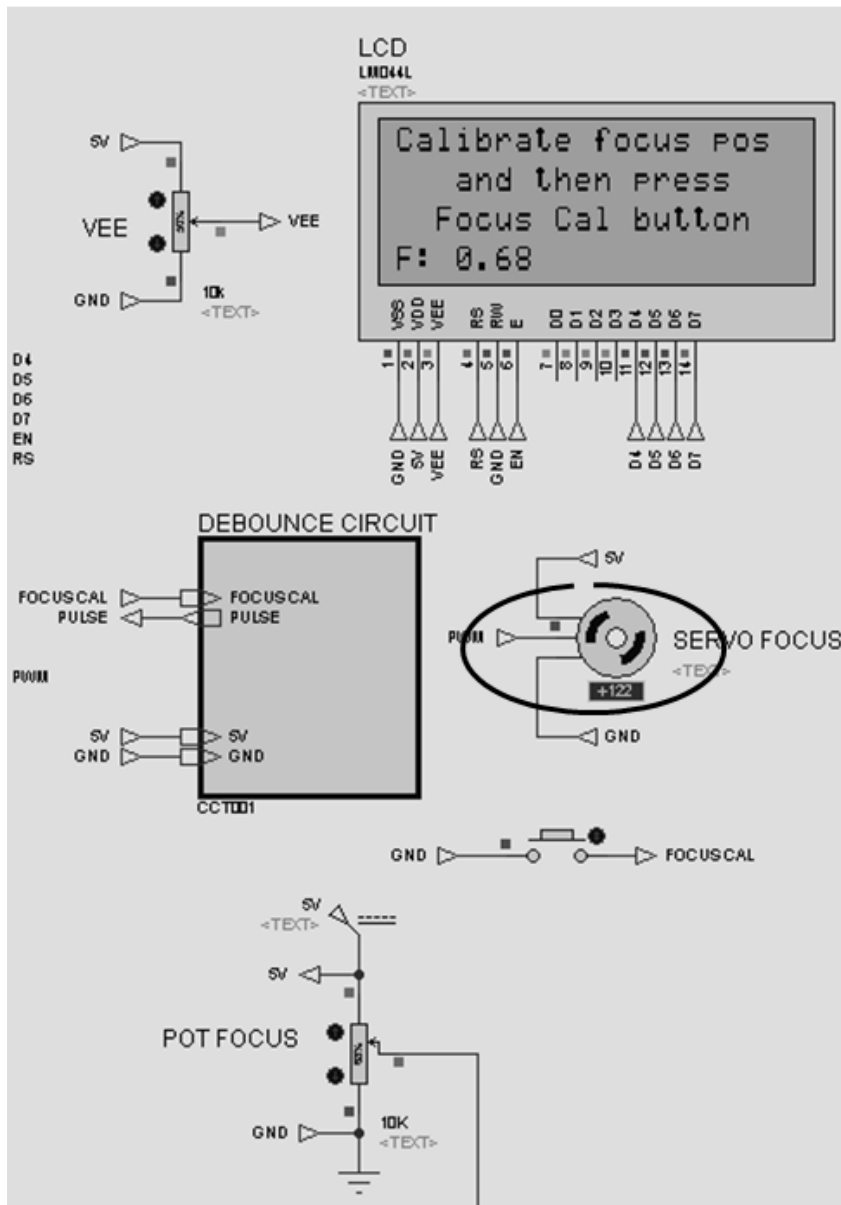


Figura 124. Paso previo al uso del mecanismo de enfoque. Ajuste de rango de movimiento

En el instante en que se presiona el botón de calibración, el servomotor ajustará su rango de operación y se mostrará en el *display* un mensaje indicando que la calibración se ha realizado, nótese cómo el servo modifica su posición de 122° a

83,2°, esto sin realizar ajuste alguno en la posición del potenciómetro (ver Figura 125).

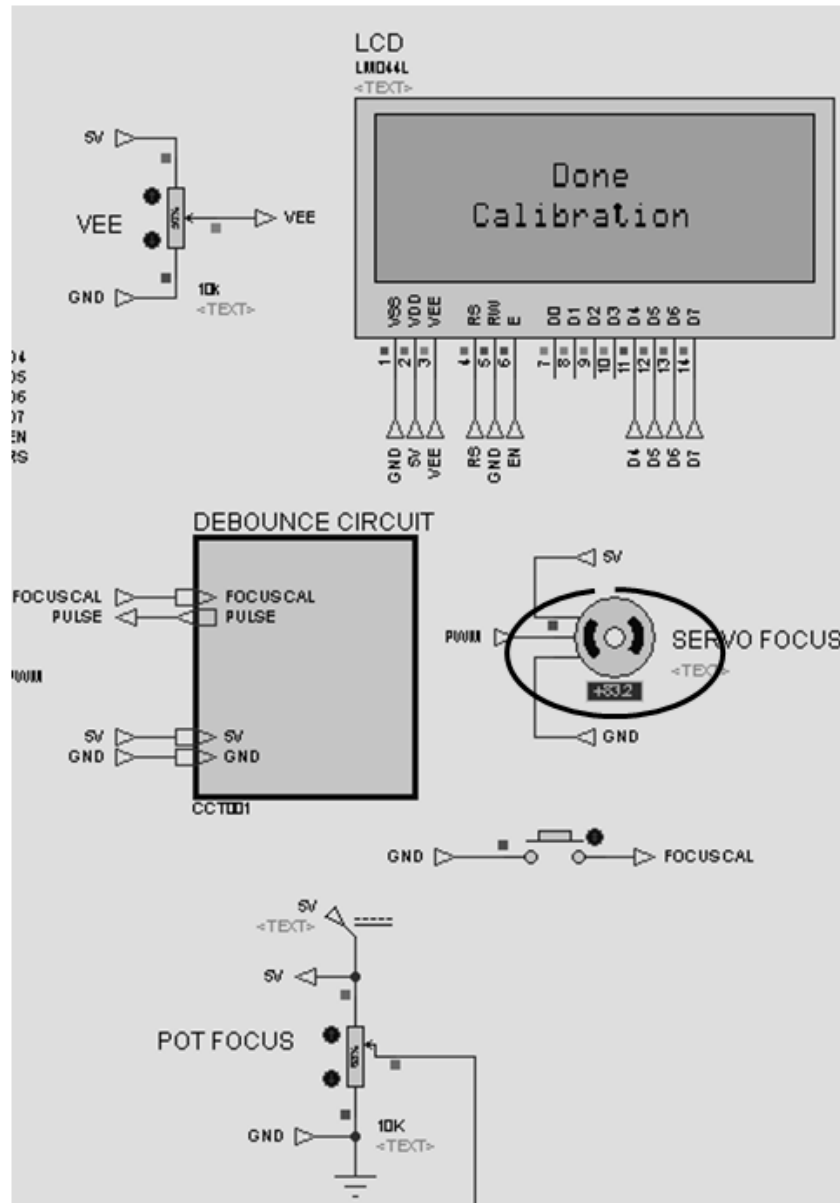


Figura 125. Presionado botón de calibración. Mensaje y ajuste automático del rango de operación

Ahora se podrá manipular el servo en el rango ajustado anteriormente como lo muestra la Figura 126, entre cero y 122° que coincide con los finales de carrera del movimiento del anillo de enfoque. El *display* tiene la función de indicar al operador de cámara la posición relativa del anillo a través de la variable “F” cuyos valores están limitados entre cero (0) y uno (1).

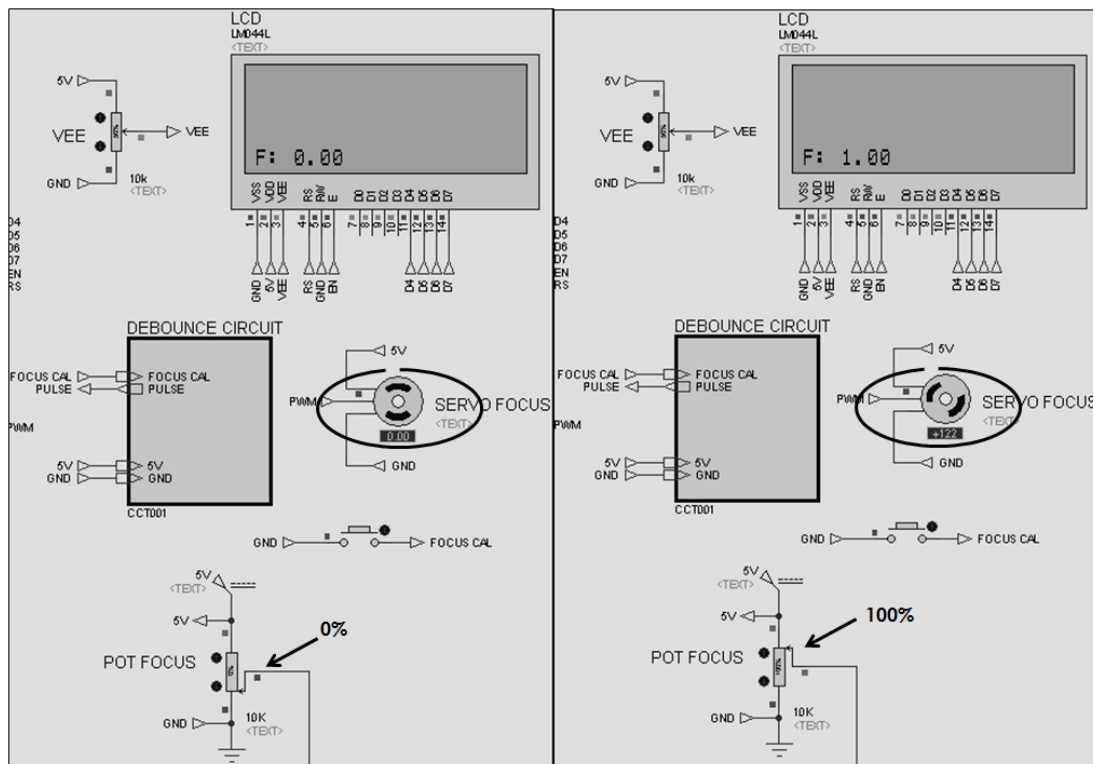


Figura 126. Casos para el cual el servo llega a su tope de movimiento

De esta manera se controla la posición del anillo de enfoque de manera remota.

5.4. Zoom

El circuito mostrado en la Figura 127 será usado para simular el funcionamiento de control de posición del servo del *zoom*. El sistema embebido a utilizar es el *Arduino Mega 2560*. El control se realiza gracias a un potenciómetro que se conecta a una de las entradas analógicas del *Arduino*, el bloque “*zoom circuit*” contiene internamente el circuito explicado anteriormente para lograr el nivel de tensión necesario para el control del servo (para detallar circuito observar Figura 60). El nivel de voltaje es modificado gracias a la señal *PWM* proveniente de uno de los pines del *Arduino*. El porcentaje de acercamiento de la imagen se visualiza en el display del mando de control.

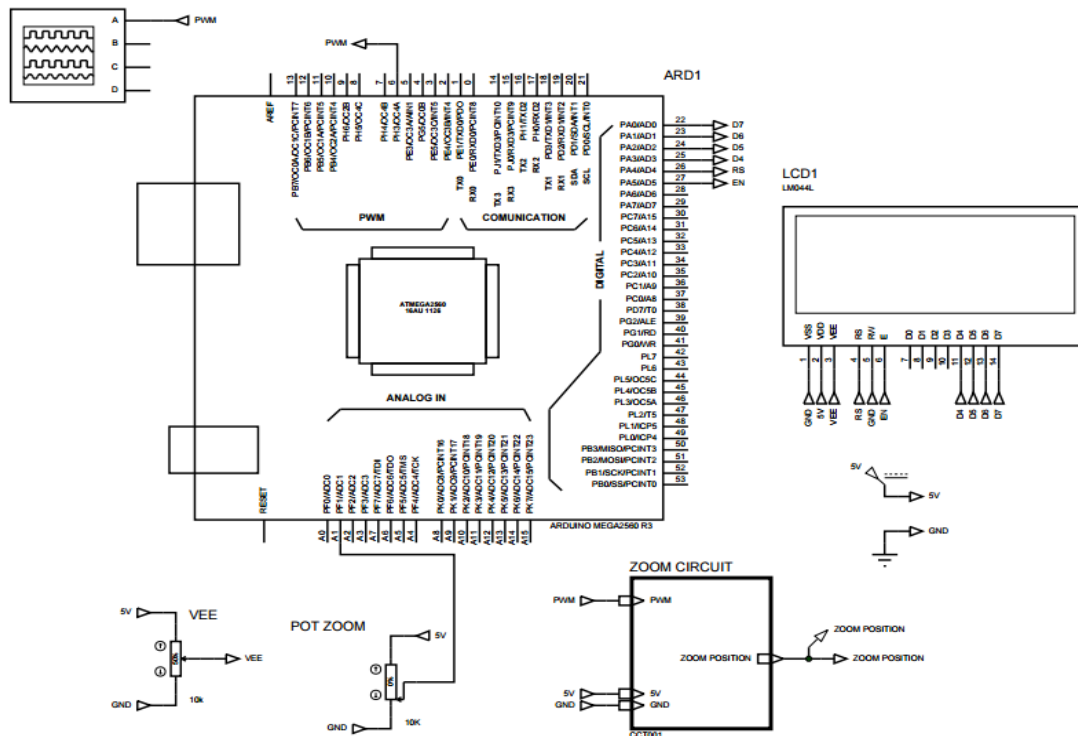


Figura 127. Circuito de prueba de funcionamiento para el control de *zoom*

5.4.1. Simulación de control de *zoom*

A continuación se presentarán los resultados:

Cuando el potenciómetro está en su valor mínimo la imagen estará lo más alejada posible, este caso se relaciona con un nivel de tensión de 2V, en la Figura 128 se muestra que efectivamente se cumple tal condición.

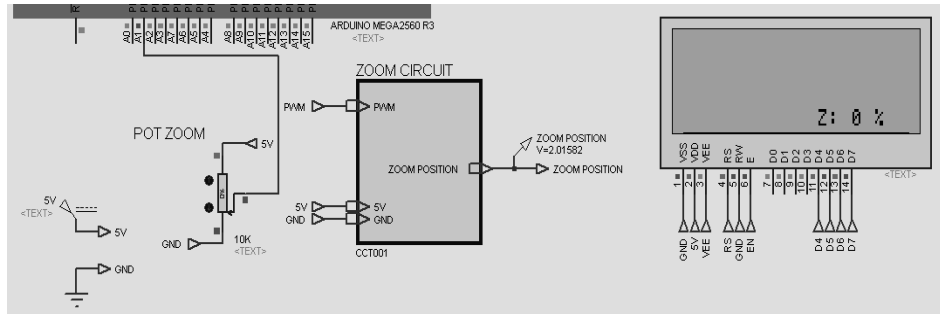


Figura 128. Caso para obtener una imagen alejada

La posición central del potenciómetro corresponde a un nivel de tensión de 5V en el servo, esto implica que la imagen tiene un acercamiento aproximado al 50% (ver Figura 129).

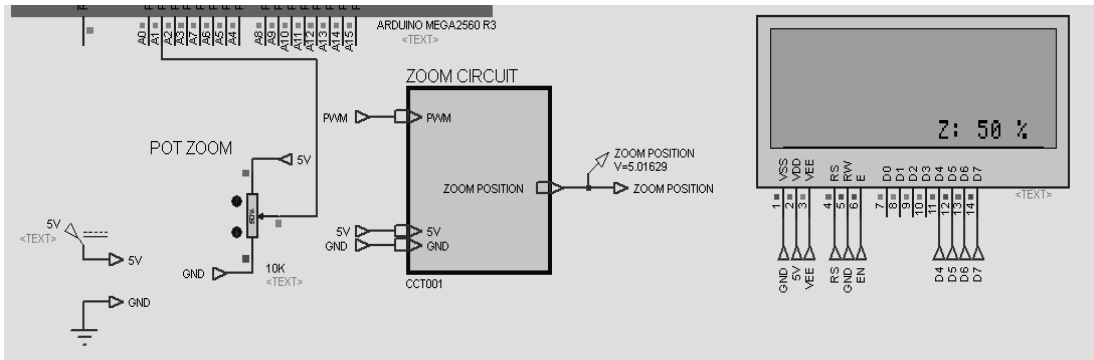


Figura 129. Caso para obtener la imagen con un 50% de acercamiento

En cuanto al acercamiento de la imagen se puede apreciar en la Figura 130 que en el instante en que el potenciómetro indica un valor máximo, el valor de tensión será de 8V, lo que corresponde al caso de máximo *zoom* de la imagen.

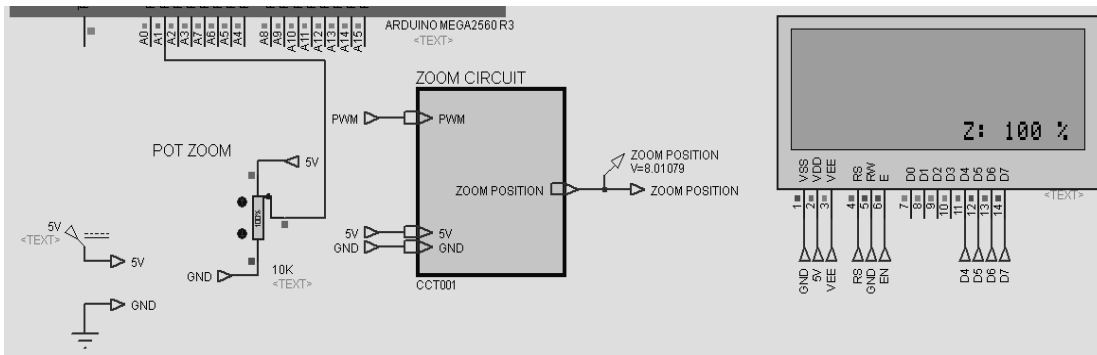


Figura 130. Caso para obtener la imagen con acercamiento máximo

CONCLUSIONES

Para obtener tomas que llamen la atención del televidente es importante ubicar en la posición más conveniente y asegurar en todo momento el control adecuado de la cámara de televisión, aún más si todo se realiza de forma remota. Por este motivo se definieron las condiciones de operación de cada una de las variables a controlar en el sistema, esto de acuerdo a las exigencias dadas por la empresa interesada en contar con este tipo de sistema.

Se definió la estructura mecánica del equipo, del riel y el modo de desplazamiento de la plataforma de rodaje que contiene a la cámara. Para ello se compararon algunos modelos comerciales y se seleccionó el más apropiado conforme a las recomendaciones hechas por especialistas en el área de la ingeniería mecánica. Se contactó al fabricante del modelo para obtener las dimensiones físicas necesarias de cada uno de los elementos involucrados en el diseño para posteriormente seleccionar los elementos de accionamiento adecuados.

Se ha decidido usar sensores magnéticos para determinar el final de carrera de los movimientos del cabezal y del *dolly* debido a su facilidad de uso, insensibilidad al polvo y la humedad y por su bajo costo.

Se realizó un estudio para dimensionar el motor del *dolly*. Entre los diferentes tipos de motores disponibles en el mercado se seleccionó el motor *DC* debido a la facilidad que presenta controlar su velocidad. El *driver* seleccionado para la etapa de potencia soporta las exigencias de la carga y tiene la característica de

configurar la rampa de aceleración y frenado del motor, lo que es ideal para esta aplicación. Se diseñó una placa para otorgar el nivel de tensión analógica al *driver* para controlar la velocidad del motor. Se escogió un sensor de corriente de efecto *Hall* para ejecutar una rutina de detención del equipo en caso de un evento no deseado. Para facilitar la medición de la velocidad y la posición del *dolly* se decidió usar un encoder incremental, estos parámetros serán mostrados en el *display* ubicado en el mando de control del equipo. El control de la velocidad del *dolly* es a lazo abierto debido a que se considera como suficiente para el uso que se dará al equipo. El control de posición es posible a través del monitoreo de la señal de retorno video tomada de la Unidad de Control de Cámara. Para mostrar el funcionamiento de control se ha realizado una simulación en *ISIS Proteus* en donde se plantea los eventos de calibración de posición del *dolly*, de advertencia, así como el monitoreo de la velocidad y la posición del *dolly*.

El cabezal seleccionado se encuentra a disposición en la empresa, sin embargo, es necesario la modificación en su estructura para que pueda ser ajustada a la columna. Se determinó que debido a su facilidad en el control de velocidad, eficiencia y costo, el motorreductor *DC* es la opción más recomendable para los movimientos del cabezal. El *driver* seleccionado es el que mejor se ajusta a las exigencias del diseño. Se logró proporcionar un efecto de una aceleración y un frenado paulatino del motor con un algoritmo desarrollado por *software*. Es necesario el uso de un controlador proporcional – integral para eliminar el efecto de la acción gravitatoria durante el movimiento de inclinación angular de la cámara. El control de posición es posible a través del monitoreo de la señal de retorno video tomada de la Unidad de Control de Cámara.

Una comparación entre algunos protocolos y estándares de comunicación serial a distancia disponibles en el mercado permitió seleccionar al protocolo *CAN*

Bus como el más apropiado debido a su robustez, alta eficiencia de transmisión y por su característica de que el mensaje prioritario consigue el acceso al medio, lo que es importante en circunstancias de emergencia.

Con respecto al control del enfoque del lente, se tomó la decisión de proponer un modelo comercial que involucra a un servomotor en el accionamiento del movimiento del anillo, por lo que se diseñó el control de dicho elemento así como la calibración de su rango de operación.

Se diseñó un circuito capaz de otorgar el nivel de tensión analógica necesario para controlar el servomotor del *zoom* del lente de la cámara, elemento encargado de accionar el movimiento del anillo de *zoom*.

El diseño del mando de control recoge las sugerencias dadas por los operadores de cámara para realizar un diseño que facilite el control de las variables del diseño.

Con la información recopilada durante el trabajo se elaboró un manual de operación que indica los pasos a seguir para el montaje, desarme, manejo del equipo y qué hacer en presencia de un evento de emergencia detectada por el sistema, de ser implementado. También cuenta con una tabla que indica el estimado de la inversión inicial, de manera que la empresa tenga documentado todo lo necesario ante una posible implementación del diseño propuesto.

RECOMENDACIONES

Es recomendable incluir a un ingeniero mecánico en el refinado del diseño de la base del *dolly*, la columna y en la definición completa de la parte mecánica del equipo, tomando en consideración las condiciones de diseño expuestas en el texto, esto con la intención de proponer un presupuesto más ajustado a la realidad del costo del prototipo.

Se recomienda contactar compañías nacionales para diseñar un riel similar al propuesto en este estudio, esto podría significar un ahorro considerable en la inversión inicial.

Para una mayor comodidad en el control del equipo se propone el uso de un pedal bidireccional para controlar el *dolly* con los pies, esta opción es más costosa pero permitirá una mayor facilidad en el control del cabezal y el lente de la cámara.

Es recomendable modificar la ubicación de los sensores de final de carrera del paneo de la cámara de tal manera que se reduzca el esfuerzo realizado por el motor durante el frenado de emergencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Ávila Ponce, 24 Febrero 2016. [En línea]. Available: http://fotografia.about.com/od/Camaras_video/a/Clasificacion-De-cmaras-De-Video.htm. [Último acceso: 20 Marzo 2016].
- [2] A. Gutierrez Ortega, «SlideShare,» 5 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <http://es.slideshare.net/armandogutierrezortega/camaras-tipos-caractersticas-y-componentes>. [Último acceso: 14 Febrero 2016].
- [3] P. L. Arteaga B., «Análisis de las características y del funcionamiento de una cámara profesional de televisión con procesamiento digital,» Caracas, 1999, pp. 39-58.
- [4] A. Castillo, «Panorama Audiovisual,» 18 Febrero 2015. [En línea]. Available: <http://www.panoramaaudiovisual.com/2015/02/18/hj24ex7-5b-la-nueva-optica-de-canon-con-diseno-ligero-para-producciones-hd/>. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [5] P. L. Arteaga B., «Análisis de las características y del funcionamiento de una cámara profesional de televisión con procesamiento digital,» Caracas, 1999, p. 40.
- [6] «Global Quality,» 29 Abril 2014. [En línea]. Available: <http://www.globalquality.com.ve/2014/04/29/sensores-tecnologia-ccd-cmos/>. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [7] Canon Broadcast, «Ópticas de TV,» *El Libro Guía CANON de Ópticas para Sistemas de Televisión*, vol. II, p. 11, 1993.
- [8] A. Patanaik, «Blog aptnk.in,» 07 02 2011. [En línea]. Available: <http://aptnk.in/2011/02/understanding-depth-of-field/>. [Último acceso: 16 03 2016].
- [9] L. García Osorio, «Óptica para Televisión. Teoría Básica de los Lentes de

- Cámaras para Televisión,» Caracas, 2015, pp. 19-22.
- [10] Sony Corporation, «The Basics of Camera Technology,» p. 6, 2003.
- [11] J. Baurecht Nilsen y M. Baurecht Nilsen, «Slow Travel Tours,» 19 Junio 2014. [En línea]. Available: <http://slowtraveltours.com/blog/understanding-depth-of-field-f-stops-and-where-to-focus/>. [Último acceso: 20 Marzo 2016].
- [12] [En línea]. [Último acceso: 27 Mayo 2015].
- [13] Sony Corporation, de *The Basics of Camera Technology*, 2003, pp. 40-44.
- [14] «Electrolab,» 28 Septiembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.electrolab.com.ec/noticias-tecnologa/>. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [15] W. Heich, «Belden,» Belden, 5 Marzo 2013. [En línea]. Available: <http://www.blog.beldensolutions.com/triax-or-hybrid-cable-for-hd-digital-tv-signals/>. [Último acceso: 4 Mayo 2016].
- [16] «Canford,» [En línea]. Available: <http://www.canford.co.uk/VTS-VIDEO-TRIAX-CABLE-Standard-BBC-PSF1-9M>. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [17] «Belden,» 11 Noviembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.beldencables-emea.com/en/products/pro-broadcast-products/video-cables/camera-fiber/index.phtml>. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [18] «Belden,» [En línea]. Available: <http://www.beldencables-emea.com/en/products/pro-broadcast-products/video-cables/camera-fiber/index.phtml>. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [19] P. L. Arteaga B., de *Análisis de las características y del funcionamiento de una cámara profesional de televisión con procesamiento digital*, Caracas, 1999, p. 54.
- [20] Sony Corporation, «Sony. Remote Control Unit,» *Manual de instrucciones RM-B170*, vol. I, p. 4, 2012.
- [21] «Hi Tech House,» 14 Mayo 2015. [En línea]. Available: <http://www.broadcast-alternative.com/gb/1142-sony-rcp-3720-remote-control-panel-.html>. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [22] M. Pineda, «Lenguaje cinematográfico,» 08 02 2010. [En línea]. Available:

- <http://pineda2003lenguaje2.blogspot.com/>. [Último acceso: 22 02 2016].
- [23] «Premier Studio Equipment,» [En línea]. Available: <http://www.premierstudioequipment.com/Products/Cameleon/Cameleon.html>. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [24] «Cinema Technologies Group,» [En línea]. Available: http://cinetechno.com/index_en.php?section=all. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [25] «Egripment Support Systems,» [En línea]. Available: <http://egripment.com/products/remote-heads/301-remote-head/>. [Último acceso: 15 Mayo 2016].
- [26] «DJPRO,» [En línea]. Available: http://www.djpro.tv/product.php?id_product=35. [Último acceso: 12 Marzo 2016].
- [27] «camera motion systems,» [En línea]. Available: <http://www.mo-sys.com/product/viarail-dolly>. [Último acceso: 25 Marzo 2016].
- [28] Z. Bruzual H., «Planta Estudio de Televisión».
- [29] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [30] «Wikipedia RS 485,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/RS-485>. [Último acceso: 14 Octubre 2015].
- [31] J. Calva C., «Biblioteca digital de la Escuela Politécnica Nacional,» Mayo 2010. [En línea]. Available: <bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2055/1/CD-2871.pdf>. [Último acceso: 22 Mayo 2016].
- [32] A. García O., «Universidad Pública de Navarra,» 24 Junio 2015. [En línea]. Available: <http://academica-e.unavarra.es/handle/2454/19115>. [Último acceso: 22 Mayo 2016].
- [33] G. G. Castillo, de *Ethernet y Protocolos IPv4 / TCP*, Huajuapán de León, 2005, pp. 1-2.
- [34] «Arduino UTFSM,» 21 Mayo 2014. [En línea]. Available:

- <http://www.arduino.utfsm.cl/modulacion-por-ancho-de-pulso-pwm/>. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [35] «Nomadas Electrónicos,» 1 Septiembre 2012. [En línea]. Available: <https://nomadaselectronicos.wordpress.com/tag/puente-h/>. [Último acceso: 14 Septiembre 2015].
- [36] «EZFX,» [En línea]. Available: <http://ezfx.com/product/ez-head-rpt-25/>. [Último acceso: 12 Marzo 2016].
- [37] «compracompras.com,» [En línea]. Available: <http://www.compracompras.com/ar/producto/625818439/tripode-profesional-manfrotto-cabecal-video-superior-a-benro>. [Último acceso: 22 Enero 2016].
- [38] «Ross Video,» [En línea]. Available: <http://www.rossvideo.com/robotic-camera-systems/furio-rc/index.html>. [Último acceso: 12 Julio 2015].
- [39] «MRMC,» [En línea]. Available: <http://www.mrmoco.com/cranes-rigs/products/rigs/modula-rig/>. [Último acceso: 2 Agosto 2015].
- [40] «Egripment Support Systems,» [En línea]. Available: <http://egripment.com/products/robotic/generic-track-system/>. [Último acceso: 15 Mayo 2016].
- [41] R. Villhaber, Interviewee, *Egripment's Sales Director*. [Entrevista]. 19 Mayo 2016.
- [42] E. B.V., «GTS Curved». Holanda Patente 225/GTS-C-0, 27 Octubre 2014.
- [43] J. L. González Viñas. [En línea]. Available: <http://almez.pntic.mec.es/jgonza86/Sistemas%20de%20poleas%20y%20correas.htm>. [Último acceso: 25 Mayo 2016].
- [44] O. S. Lobosco y J. L. P.C. Dias, Selección y aplicación de motores eléctricos, Barcelona: Boixareu Editores, 1989, pp. 152-156.
- [45] M. Pushek, «EDN Network,» Cypress Semiconductor, 11 Febrero 2013. [En línea]. Available: <http://www.edn.com/design/sensors/4406682/2/Brushless-DC-Motors---Part-I--Construction-and-Operating-Principles>. [Último acceso: 20 Mayo 2016].
- [46] «Wikipedia,» [En línea]. Available:

- https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper_motor. [Último acceso: 18 Noviembre 2015].
- [47] J. Zhao y Y. Yu, «MonolithicPower,» 5 Julio 2014. [En línea]. Available: <http://www.MonolithicPower.com>. [Último acceso: 12 Enero 2016].
- [48] «Selección y aplicación de motores eléctricos,» Río Cuarto, 2001.
- [49] «Anaheim Automation,» [En línea]. Available: <http://www.anaheimautomation.com/products/brush/brush-motor-item.php?sID=336&pt=i&tID=912&cID=24>. [Último acceso: 25 Septiembre 2016].
- [50] «Electric Wholesale Motor,» [En línea]. Available: <http://www.electricmotorwholesale.com/8831-KBMG-212D.html>. [Último acceso: 27 Septiembre 2016].
- [51] «KB Electronics,» [En línea]. Available: http://www.kbelectronics.com/Variable_Speed_DC_Drives.html. [Último acceso: 22 Septiembre 2016].
- [52] J. Lepkowski, «Microchip,» 11 Noviembre 2003. [En línea]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00894a.pdf>. [Último acceso: 12 Septiembre 2015].
- [53] «DX,» 10 Octubre 2012. [En línea]. Available: http://www.dx.com/p/acs712-current-sensor-module-for-arduino-blue-158863#.V_HJjXiuv8. [Último acceso: 11 Enero 2016].
- [54] Scancon, «Scancon Industrial Encoders,» 24 Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://www.scancon.dk/products/incremental.aspx>. [Último acceso: 9 Noviembre 2016].
- [55] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Engranaje#Caracter.C3.ADsticas_que_definen_un_engranaje_de_dientes_rectos. [Último acceso: 23 Noviembre 2016].
- [56] «Slideshare,» 23 Junio 2012. [En línea]. Available: <http://es.slideshare.net/luxeto/cap10-13431269>. [Último acceso: 15 Marzo 2016].

- [57] «Cross-Morse,» [En línea]. Available: <http://www.cross-morse.co.uk/Spanish/index2.html?gears.html&0>. [Último acceso: 11 Noviembre 2016].
- [58] «Hyperphysics,» [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/tdisc.html>. [Último acceso: 20 Septiembre 2016].
- [59] R. Nave, «Hyperphysics,» Agosto 2000. [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pencom.html>. [Último acceso: 11 Octubre 2016].
- [60] «Faulhaber,» [En línea]. Available: https://fmcc.faulhaber.com/details/overview/PGR_8406_13838/PGR_13838_13804/en/GLOBAL/. [Último acceso: 15 Junio 2016].
- [61] F. Faulhaber, «Faulhaber,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.faulhaber.com/en/GLOBAL/>. [Último acceso: 15 Marzo 2016].
- [62] «Faulhaber,» [En línea]. Available: https://fmcc.faulhaber.com/details/overview/PGR_3907_13818/PGR_13818_13813/en/GLOBAL/. [Último acceso: 15 Junio 2016].
- [63] M. Borgonovi, Interviewee, *Costumer Service International Faulhaber*. [Entrevista]. 25 Febrero 2016.
- [64] «Faulhaber,» [En línea]. Available: https://fmcc.faulhaber.com/resources/img/EN_IE3-1024_DFF.PDF. [Último acceso: 12 Noviembre 2016].
- [65] «DimensionEngineering,» [En línea]. Available: <https://www.dimensionengineering.com/products/syren10>. [Último acceso: 20 Julio 2016].
- [66] «Dimension Engineering,» [En línea]. Available: <https://www.dimensionengineering.com/warranty>. [Último acceso: 22 Agosto 2016].
- [67] «Electromen,» [En línea]. Available: <http://electromen.com/en/products/item/motor-controllers/dc-motor-below-10A/em-176A/>. [Último acceso: 20 Septiembre 2016].

- [68] «DFRobot,» 28 Agosto 2015. [En línea]. Available: [https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/DC_Motor_Driver_2x15A_Lite_\(SKU:_DRI0018\)](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php/DC_Motor_Driver_2x15A_Lite_(SKU:_DRI0018)). [Último acceso: 22 Septiembre 2016].
- [69] «Robotshop,» [En línea]. Available: <http://www.robotshop.com/en/dc-motor-driver-2-15a.html>. [Último acceso: 22 Septiembre 2016].
- [70] «DigiBroadcast,» [En línea]. Available: <http://www.digibroadcast.com/used-equipment-c211/lenses-c214/canon-used-complete-canon-ffc-15-focus-controller-with-focus-outlet-fm-12-p16994>. [Último acceso: 12 Abril 2016].
- [71] «EZ FX,» [En línea]. Available: <http://ezfx.com/product/broadcast-focus-control/>. [Último acceso: 20 Marzo 2016].
- [72] «JonyJib Get Moving!,» [En línea]. Available: http://www.jonyjib.com/motion_control.html. [Último acceso: 12 Marzo 2016].
- [73] «Fullcompass,» [En línea]. Available: <http://www.fullcompass.com/prod/236898-Jony-Jib-ZR3000F>. [Último acceso: 12 Abril 2016].
- [74] «Ebay,» [En línea]. Available: <http://www.ebay.com/itm/JonyJib-ZR3000-ENG-Zoom-Motorized-Focus-Control-/220314596494>. [Último acceso: 12 Abril 2016].
- [75] «ServoCity,» [En línea]. Available: <https://www.servocity.com/s3010-servo>. [Último acceso: 12 abril 2016].
- [76] «StepperOnline,» [En línea]. Available: <http://www.omc-stepperonline.com/switching-power-supply-400w-12v-33a-for-3d-printer-kits-115v230v-s40012-p-179.html>. [Último acceso: 12 Septiembre 2016].
- [77] «Jameco Electronics,» [En línea]. Available: http://www.jameco.com/z/NLP40-7629J-Artesyn-Technologies-5V-12V-Dual-Output-Open-Frame-Switching-Power-Supply_2215697.html. [Último acceso: 15 Mayo 2016].
- [78] «Icstation,» [En línea]. Available: <http://www.icstation.com/power-voltage-detection-sensor-module-arduino-compatible-p-3563.html>. [Último acceso: 12 Junio 2016].
- [79] «Deal Extreme,» [En línea]. Available: <http://www.dx.com/p/battery-voltage->

over-voltage-under-voltage-detection-sensor-module-for-arduino-152322.

[Último acceso: 12 Junio 2016].

- [80] G. Fernández Amador, Octubre 2005. [En línea]. Available: [http://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/Sensores %20magneticos.pdf](http://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/Sensores%20magneticos.pdf). [Último acceso: 18 Abril 2016].
- [81] I. Olvera, «Reportero Industrial,» Agosto 2015. [En línea]. Available: <http://www.microautomacion.com/files/RIDIGITAL8342.pdf>. [Último acceso: 18 Abril 2016].
- [82] [En línea]. Available: <http://cmapspublic2.ihmc.us/rid=1H2B63T5G-1SLKJ1L-J52/Sensores%20fundamentos,%20tipos%20y%20caracter%C3%ADsticas.pdf>. [Último acceso: 18 Abril 2016].
- [83] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_de_proximidad. [Último acceso: 18 Abril 2016].
- [84] «DX,» [En línea]. Available: <http://www.dx.com/es/p/reed-switch-sensor-module-for-arduino-blue-150795#.V2b2avnhDIU>. [Último acceso: 22 Marzo 2016].
- [85] «CMS Magnetics,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.magnet4sale.com/n45-1-1-4x1-16-neodymium-rare-earth-disc-magnet/>. [Último acceso: 15 Mayo 2016].
- [86] Microchip Technology, «Microchip,» Febrero 2007. [En línea]. Available: http://www.microchip.com/stellent/groups/sitecomm_sg/documents/training_tutorials/en532259.pdf. [Último acceso: 15 Noviembre 2015].
- [87] M. Aranda Elcuaz, «Redes CAN».
- [88] «Deal Extreme,» 7 Julio 2012. [En línea]. Available: <http://www.dx.com/es/p/pcb-arduino-enc28j60-ethernet-module-blue-140971#.Vupn7tDy2Ag>. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [89] «Aliexpress,» [En línea]. Available: <http://es.aliexpress.com/store/product/MCP2515-CAN-Bus-Module-TJA1050-receiver-SPI-For-51-MCU-ARM->

- controller/1941955_32497594028.html?storeId=1941955. [Último acceso: 15 Noviembre 2016].
- [90] «Aliexpress,» [En línea]. Available: http://www.aliexpress.com/arduino-rs485_reviews.html. [Último acceso: 20 Noviembre 2015].
- [91] «Prometec,» [En línea]. Available: <http://www.prometec.net/shield-ethernet/>. [Último acceso: 1 Diciembre 2015].
- [92] «Amazon - SenMod,» [En línea]. Available: https://www.amazon.com/MAX485-Module-RS-485-Instrument-Interface/dp/B01FDD52Y2/ref=lp_14634750011_1_13?srs=14634750011&ie=UTF8&qid=1467392067&sr=8-13. [Último acceso: 1 Junio 2016].
- [93] «Tindie,» [En línea]. Available: <https://www.tindie.com/products/Conceptinetics/rs485-rs422-shield-for-arduino/>. [Último acceso: 2 Diciembre 2015].
- [94] «Wikipedia,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/RS-485>. [Último acceso: 15 Noviembre 2015].
- [95] «Wikipedia,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Ethernet>. [Último acceso: 20 Noviembre 2015].
- [96] «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Bus_CAN. [Último acceso: 27 Septiembre 2015].
- [97] S. Nilsson, «Controller Area NETwork - CAN Information,» 1 Junio 1997. [En línea]. Available: <http://hem.bredband.net/stafni/developer/CAN.htm>. [Último acceso: 12 Noviembre 2015].
- [98] Modbus Organization, «MODBUS.ORG,» 2 Febrero 2002. [En línea]. Available: <http://www.modbus.org/>. [Último acceso: 10 Noviembre 2015].
- [99] «Arduino Playground Forum,» [En línea]. Available: <http://playground.arduino.cc/>. [Último acceso: 22 Noviembre 2015].
- [100] «Arduino,» [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/product/E000094>. [Último acceso: 1 Diciembre 2015].
- [101] «KB Electronics,» [En línea]. Available: http://www.kbelectronics.com/Variable_Speed_DC_Drives.html. [Último

- acceso: 23 Septiembre 2016].
- [102] R. Paz, «YouTube,» 19 Mayo 2014. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=S1Jc8YAJqQ>. [Último acceso: 25 Marzo 2016].
- [103] «Image Media Farm,» [En línea]. Available: <http://www.imagemediafarm.com/product/fujinon-zoom-focus-control/>. [Último acceso: 12 Abril 2016].
- [104] «Arduino,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMicro>. [Último acceso: 15 Agosto 2016].
- [105] «Arduino,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. [Último acceso: 15 Agosto 2016].
- [106] «Arduino,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>. [Último acceso: 16 Marzo 2016].
- [107] «CamMy TV,» [En línea]. Available: <http://www.cammy-tv.com/product.php?id=82>. [Último acceso: 12 Marzo 2016].
- [108] E. S. Systems.Holanda 2013.
- [109] «Ebay,» [En línea]. Available: <http://www.ebay.com/itm/NEW-Proaim-Gold-Pan-Tilt-Motorized-Head-for-DSLR-Video-movie-camera-crane-Jib-/111795389844>. [Último acceso: 12 Marzo 2016].
- [110] «christopherhood,» [En línea]. Available: <http://www.christopherhood.com/#camera-services>. [Último acceso: 12 Marzo 2016].
- [111] «Magnet4Sale,» [En línea]. Available: <http://www.magnet4sale.com/n45-1-1-2-x-1-1-2-neodymium-rare-earth-cylindrical-magnet/>. [Último acceso: 15 Mayo 2016].
- [112] J. Linares Flores, A. García A. y O. Molina A., «SciELO,» Junio 2011. [En línea]. Available:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432011000200003. [Último acceso: 25 Junio 2016].

[113] S. S. Osuna Peraza, «Profe Saul Página Personal,» 29 Julio 2016. [En línea].

Available:

<http://www.profesaulosuna.com/index.php?files/ELECTRONICA/PWM/>.

[Último acceso: 12 Agosto 2016].

[114] S. Waner y S. R. Costenoble, «zweigmedia,» Junio 2013. [En línea]. Available:

<http://www.zweigmedia.com/MundoReal/integral/numint.html>. [Último acceso:

15 Septiembre 2016].

[115] «RobotShop,» [En línea]. Available: [http://www.robotshop.com/en/10a-5-30v-](http://www.robotshop.com/en/10a-5-30v-dual-channel-dc-motor-driver.html)

[dual-channel-dc-motor-driver.html](http://www.robotshop.com/en/10a-5-30v-dual-channel-dc-motor-driver.html). [Último acceso: 23 Marzo 2016].

BIBLIOGRAFÍA

Datasheet Atmega2560, Atmel [en línea]. <http://www.atmel.com> [Consulta: 2015]

Lobosco, Orlando S., Dias, José Luiz P.C.. Selección y aplicación de motores eléctricos. Siemens Motores, 1era. Ed. España: Marcombo S.A., 1989.

Manual de referencia: Publicación n° B - IM - 2531E. Broadcasting TV Zoom Lens Canon J15ax8B / Canon, Inc. Japón, 1997._150p.

Manual de referencia: Vol. 1, 1era. Ed., serial n° 1000. Manual de Mantenimiento / Sony HD Color Camera HDC – 750, Japón 1999._15p.

Manual de referencia: Guía de productos / Brochure Fujinon. USA, 2008._50p.

Ogata, Katsuhiko. Dinámica de sistemas, 1era. Ed. México: Prentice Hall, 1987.

Ogata, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna, 3era. Ed. México: Prentice Hall, 1998.

Ogata, Katsuhiko. Sistemas de control en tiempo discreto, 2da. Ed. México: Prentice Hall, 1996.

Pontificia Universidad Católica de Chile, Biblioteca U.C. [en línea]. < <http://www.fis.puc.cl/~jalfaro/fiz0121/clases/solido.pdf> > [Consulta: 2016]

ANEXOS

Los anexos del trabajo de grado se pueden apreciar en el tomo en formato digital.

Tabla de anexos

Figura 1. Tarjeta para otorgar el nivel *DC* al *driver* del motor del *dolly* y al *servo - zoom*. Dimensiones de la placa: 40 x 40 mm

Figura 2. Diagrama circuital para el mando de control del equipo

Figura 3. Diagrama circuital para el control del paneo, *tilt*, foco y *zoom* del equipo

Figura 4. Diagrama circuital para el control del motor del *dolly*

Manual de operación