



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
MECATRÓNICA**

**AUTOR: JONATHAN ENRÍQUEZ, RONALD CUMBAL**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE  
POSICIONAMIENTO LINEAL MULTIEJE CONTROLADO POR VISIÓN  
ARTIFICIAL PARA CÁMARA DE ANÁLISIS COMPUTARIZADO DEL  
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE MOVIMIENTO (LAM) QUITO**

**DIRECTOR: ING. AGUILAR, EDWIN**

**CODIRECTOR: ING. SALAZAR, ANGELITA MSc**

**SANGOLQUÍ, FEBRERO 2014**

## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

EL PROYECTO “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LINEAL MULTIEJE CONTROLADO POR VISIÓN ARTIFICIAL PARA CÁMARA DE ANÁLISIS COMPUTARIZADO DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE MOVIMIENTO (LAM) QUITO” FUE REALIZADO EN SU TOTALIDAD POR JONATHAN ANDRÉS ENRÍQUEZ LÓPEZ Y RONALD DAVID CUMBAL GUERRÓN, COMO REQUERIMIENTO PARCIAL A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA.

---

**ING. EDWIN AGUILAR**

**DIRECTOR**

---

**ING. ANGELITA SALAZAR MSc**

**CODIRECTOR**

**SANGOLQUÍ, 2014-02**

## **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE  
POSICIONAMIENTO LINEAL MULTIEJE CONTROLADO POR  
VISIÓN ARTIFICIAL PARA CÁMARA DE ANÁLISIS  
COMPUTARIZADO DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE  
MOVIMIENTO (LAM) QUITO”**

**ELABORADO POR:**

---

**JONATHAN ANDRÉS ENRÍQUEZ LÓPEZ**  
CI: 1714197348

---

**RONALD DAVID CUMBAL GUERRÓN**  
CI: 1717920092

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

---

**Ing. Francisco Terneus**

**DIRECTOR**

**SANGOLQUÍ, 2014-02**

## **AUTORIZACIÓN**

Nosotros: Jonathan Andrés Enríquez López y Ronald David Cumbal Guerrón.

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LINEAL MULTIEJE CONTROLADO POR VISIÓN ARTIFICIAL PARA CÁMARA DE ANÁLISIS COMPUTARIZADO DEL LABORATORIO DE ANÁLISIS DE MOVIMIENTO (LAM) QUITO", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

---

**JONATHAN ANDRÉS ENRÍQUEZ LÓPEZ**  
CI: 1714197348

---

**RONALD DAVIS CUMBAL GUERRÓN**  
CI: 1717920092

**SANGOLQUÍ, 2014-02**

## DEDICATORIA

Con todo el cariño y amor del mundo dedico esta etapa de mi vida a mis abuelitos Charito y Fausto que son mi vida, a mi madre que es un ángel, a mi padre que es el mejor padre del mundo, y a toda mi familia Melanie, Taty, Inesita y Jenifer.

Jonathan Enríquez

El esfuerzo de largos años de estudio se plasma en un corto proyecto de graduación. Dedicar solo este documento a las personas que han forjado una huella durante todo este tiempo no sería más que simplificar su valor en mi vida. A mis padres, hermana, tía, abuelos y amigos va más que una dedicatoria, sino mi corazón.

Ronald Cumbal

## AGRADECIMIENTO

A mis Padres por ser como son, por el cariño, apoyo y amor en cada segundo de mi vida, por el ejemplo de siempre sobresalir con una sonrisa en el rostro, por darme la vida y guiarme en ella. A mis abuelitos y tías por su apoyo incondicional. A mi hermana por su alegría compartida. A ti amor por la paciencia, el cariño y locuras. A la vida y a Dios por permitirme tener la mejor familia del mundo, y a mis amigos por disfrutar cada momento de nuestras vidas, muchas gracias de corazón.

Jonathan Enríquez

Por la calma, paciencia y amor, a mis padres, gracias por serlo todo y  
más que eso.  
Por la fuerza y garra de una mente ilusionada, a vos hermana gracias  
por la motivación.  
Por cada risa y carcajeada, tía y abuelo, gracias por tanta emoción.  
En fin, por cada experiencia en la vida, amigos, compañeros y amor,  
gracias a todos, gracias totales.

Ronald Cumbal

## ÍNDICES DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO .....	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO .....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICES DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	i
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
RESUMEN .....	xiii
1.    CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO .....	1
1.1.    Antecedentes.....	1
1.1.1.    Análisis de marcha .....	2
1.1.2.    Sistemas de Análisis Biomecánicos .....	3
1.2.    La biomecánica.....	4
1.3.    Visión artificial en la Biomecánica.....	6
1.4.    Características del Laboratorio LAM en Quito .....	8
1.5.    Justificación e Importancia.....	9
1.6.    Objetivos.....	13
1.6.1.    General .....	13

1.6.2.	Específicos.....	13
1.7.	Alcance del proyecto.....	14
1.7.1.	Sistema mecánico.....	14
1.7.2.	Sistema electrónico/eléctrico.....	17
1.7.3.	Sistemas de control.....	19
2.	CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.....	23
2.1.	Introducción.....	23
2.2.	Visión artificial.....	23
2.2.1.	Concepto General.....	24
2.2.2.	Características de un Sistemas de Visión Artificial.....	24
2.2.3.	Componentes de un sistema de visión artificial.....	25
2.2.3.2.	Sistema de captura de imagen.....	27
2.2.3.3.	Computadora/Ordenador.....	27
2.2.4.	Procesamiento/reconocimiento de imágenes.....	27
2.2.5.	Etapas para el procesamiento de imágenes.....	29
2.2.6.	Reconocimientos de imágenes con patrones.....	30
2.3.	Software utilizado en visión artificial.....	31
2.3.1.	Max – Measurement and Automation Explorer.....	32
2.3.2.	Labview.....	33
2.4.	Hardware utilizado en visión artificial.....	37
2.4.1.	Tarjeta de adquisición DAQ - USB 6009.....	38

2.4.2.	Sistema de control Fuzzy en labview .....	39
2.4.2.1.	Funciones de pertenencia .....	40
2.4.2.2.	Función Triangular .....	41
2.5.	Sistemas de desplazamiento lineal mecánicos.....	42
2.5.1.	Mecanismos .....	42
2.5.2.	Transmisión por Engranajes .....	44
2.5.3.	Nomenclatura de Engranajes.....	47
2.5.4.	Diseño de Engranajes .....	50
2.5.5.	Transmisión por Correa.....	51
2.5.5.1.	Relación de Transmisión.....	51
2.5.5.2.	Características y tipos de correas .....	52
2.5.5.3.	Correas dentadas o síncronas .....	53
2.5.5.4.	Selección y Estandarización de Correas.....	54
2.5.5.5.	Distancia entre ejes.....	56
2.5.5.6.	Cálculo de la longitud de correa .....	56
2.5.5.7.	Poleas dentadas .....	57
2.6.	Motores de corriente continua y servomotores .....	58
2.6.1.	Motores DC .....	58
2.6.2.	Servomotores.....	61
2.6.2.1.	Principio de Funcionamiento .....	62
2.6.2.2.	Transformación de un servomotor en motor DC .....	64

2.6.3.	Selección del motor eléctrico .....	65
2.6.3.1.	Determinación de la potencia requerida del motor .....	65
2.6.3.2.	Determinación de la potencia requerida del motor por análisis gráfico	66
2.7.	Selección del material por el Método Ashby .....	69
2.7.1.	Metodología Ashby.....	70
2.7.2.	Mapas Ashby .....	72
2.7.3.	Método Ashby con la ayuda de bases de datos .....	73
3.	CAPITULO 3: DISEÑO CONCEPTUAL .....	74
3.1	Características funcionales del proyecto .....	74
3.1.1	Elementos de diseño.....	74
3.2.	Selección de Alternativas.....	76
3.2.1.	Método de Selección de Alternativas .....	76
3.3.	Alternativas de Estructura Guía del Eje X.....	79
3.2.1	Selección de Estructura Guía del Eje X .....	79
3.4.	Alternativas de sistema de deslizamiento .....	81
3.4.1.	Selección de Estructura de desplazamiento .....	82
3.5.	Alternativas de sistemas de tracción.....	85
3.5.1.	Selección de sistema de tracción .....	87
3.6.	Alternativas de sistema de elevación manual.....	91
3.7.	Alternativas de Motores .....	92
3.7.1.	Selección de Actuadores.....	93

3.8.	Selección de opciones .....	95
4.	CAPITULO 4: DISEÑO MECÁNICO .....	96
4.1	Selección del material con el Método Ashby .....	96
4.2.	Selección de materiales a partir del índice de rendimiento. ....	96
4.2.1.	Método Ashby con la ayuda de bases de datos .....	98
4.2.1.1.	Selección del material para cada componente.....	99
4.2.1.2.	Resumen del material escogido para el Sistema de Desplazamiento.	106
4.3.	Modelado 3D de los componentes del sistema .....	107
4.3.1.	Soporte principal .....	107
4.3.2.	Perfil Guía X.....	112
4.3.3.	Soporte Cámara.....	116
4.3.4.	Carro eje X.....	120
4.4.	Diseño de Mecanismos.....	124
4.4.1.	Estructura Guía Eje X.....	124
4.4.1.1.	Determinación de Potencia Requerida.....	124
4.4.1.2.	Selección de correa.....	128
4.4.1.3.	Diseño de Pole Dentada .....	130
4.4.1.4.	Determinación de Longitud de Correa.....	132
4.4.2.	Estructura Guía Eje Y.....	132
4.4.2.1.	Determinación de Potencia Requerida.....	132
4.4.2.2.	Selección de correa.....	134

4.4.2.3. Diseño de Polea Dentada .....	136
4.4.2.4. Determinación de Longitud de Correa.....	137
5. CAPITULO 5: DISEÑO ELECTRÓNICO.....	138
5.1 Especificaciones de funcionamiento eléctricas y electrónicas .....	138
5.1.1 Especificaciones sobre ejes de movimiento.....	138
5.1.2 Consideraciones de desplazamiento.....	139
5.2 Determinación de la potencia requerida del motor .....	140
5.2.1 Motor conductor de movimiento sobre el eje X .....	140
5.2.2 Motor conductor de movimiento sobre el eje Y .....	142
5.3 Diseño de circuito de control.....	144
5.3.1 Fuente de Energía.....	145
5.3.2 Circuito para controlar el Giro de los motores .....	147
5.3.2.1 Control de Velocidad por Modulación de Pulsos.....	149
5.4 Diseño de Placa Electrónica .....	150
5.4.1 Definición de espesor de conductores .....	152
5.5 Diseño de Gabinete de control .....	154
5.5.1 Ubicación de la placa electrónica.....	155
6. CAPITULO 6: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	157
6.1. Sistema de adquisición de datos. ....	157
6.2. Instrumentación virtual – Daq Assistant.....	159
6.2.1. Configuración de puertos digitales de entrada.....	160

6.2.2.	Configuración de puertos digitales de salida.....	161
6.2.3.	Configuración del Puerto Analógico .....	163
6.3.	Procesamiento de imágenes. ....	163
6.4.	Adquisición de imágenes.....	169
6.5.	Control Fuzzy.....	172
6.5.1.	Lazo de control.....	173
6.5.2.	Lógica Fuzzy en labview .....	176
6.5.3.	Variables del sistema .....	176
6.5.4.	Variable de Entrada.....	177
6.5.5.	Variables de Salidas.....	178
6.5.6.	Reglas de Configuración Lógica Difusa .....	179
6.6.	PMW .....	181
6.7.	Interfaz.....	183
6.7.1.	Controles.....	184
6.8.	Seguridad del sistema .....	187
6.9.	Programa de Labview .....	187
7.	CAPÍTULO 7: PRUEBAS DE ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	188
7.1.	Introducción .....	188
7.2.	Prueba del sistema mecánico.....	188
7.2.1.	Sistemas Correa dentada.....	189
7.3.	Prueba del sistema electrónico.....	189

7.3.1.	Prueba del sistema de control y adquisición de datos.....	190
7.3.2.	Fin de carrera Posterior y Frontal.....	190
7.3.3.	Fines de carrera laterales.....	191
7.3.4.	Ubicación del gabinete de control .....	191
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	193
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	197

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Fotografía del LAM con la descripción de ubicación de las cámaras. ....	10
Figura 1.2 Esquema del laboratorio. ....	10
Figura 1.3 Instalaciones del Laboratorio – LAM. ....	13
Figura 1.4 Esquema mecánico de la estructura. ....	14
Figura 1.5 Fotos tomadas a 15 cm de diferencia en distancia. ....	15
Figura 1.6 Sistema de desplazamiento en el eje x simulado en CAD. ....	16
Figura 1.7 Dimensiones de la Cámara descritas por el fabricante. ....	17
Figura 1.8 MyDAQ de National Instruments. ....	17
Figura 1.9 SERVO MOTOR Hk15338. ....	18
Figura 1.10 Identificación de un patrón por visión artificial. ....	20
Figura 1.11 Medidas de control para la cámara. ....	21
Figura 1.12 Esquema de Control del sistema. ....	21
Figura 1.13 Lazo de Control con los parámetros del sistema. ....	21
Figura 2.1 Ramas de la Inteligencia Artificial. ....	25
Figura 2.2 Componentes fundamentales de un sistema de visión artificial. .	26
Figura 2.3 Configuración básica de un sistema de procesamiento digital de imágenes. ....	28
Figura 2.4 Captura de un evento en 3D con una imagen 2D. ....	28
Figura 2.5 Procesamiento de imágenes comunes: (a) imagen original, (b) aumento de contraste, (c) cambio de tono, (d) "posterized" (colores cuantificados), (e) borrosa, (f) girada. ....	29
Figura 2.6 Pantalla de Inicio – MAX (Labview). ....	32

Figura 2.7 Funciones de procesamiento de imágenes-Labview. ....	36
Figura 2.8 DAQ NI-6008/6009. ....	38
Figura 2.9 Pines/Canales de NI USB-6008/6009-Datasheet. ....	39
Figura 2.10 Lógica Difusa. ....	39
Figura 2.11 Fuzzy Control Design-Laview. ....	40
Figura 2.12 Universo-Lógica Difusa. ....	40
Figura 2.13 Parámetros de la función Triangular. ....	41
Figura 2.14 Parámetros de la función trapezoide. ....	41
Figura 2.15 Parámetros de la función pseudo-exponencial. ....	41
Figura 2.16 Tipos de movimientos: a. Circular o rotatorio, b. Lineal continuo y c. alternativo, d. Oscilante. ....	43
Figura 2.17 Ilustración de un sistema con engranajes internos y externos..	45
Figura 2.18 Nomenclatura de diseño de un engranaje. ....	46
Figura 2.19 Geometría del contacto y ángulo de presión de dientes de engrane de involuta. ....	47
Figura 2.20 Ángulo de presión.....	49
Figura 2.21 Relación de transmisión.....	52
Figura 2.22 Elevada flexibilidad en correas dentadas.....	53
Figura 2.23 Elementos de una correa dentada.....	53
Figura 2.24 Dimensiones de una correa dentada. ....	54
Figura 2.25 Gráfico de selección de tipo de bandas según velocidad y potencia aplicada. ....	55
Figura 2.26 Geometría de una correa dentada sobre un piñón dentado. ....	57

Figura 2.27 Lazo sencillo rotacional entre caras polares curvas. a) Vista en perspectiva; b) Vista de las líneas de campo; c) Vista superior; d) Vista frontal.....	59
Figura 2.28 Fuerza producida en un motor DC.....	60
Figura 2.29 Componentes de un Servomotor. ....	62
Figura 2.30 Colores de los cables de los principales fabricantes de servos.	63
Figura 2.31 Pulso PWM para controla servos.....	64
Figura 2.32 a) Potencia en cargas lineales y b) Potencia en cargas rotatorias. ....	66
Figura 2.33 Velocidad Vs Tiempo. ....	67
Figura 2.34 Aceleración del Sistema .....	68
Figura 2.35 Grafica Modulo de Young Vs Densidad Para familias de materiales. ....	72
Figura 3.1 Perfil Circular de Aluminio.....	84
Figura 3.2 Perfil circular y Plancha de metal.....	84
Figura 3.3 Perfil con sección en C y Perfil circular.....	85
Figura 3.4 Sistema de Elevación Manual - Solidworks. ....	91
Figura 3.5 Familia de materiales - CES EduPack.....	98
Figura 3.6 Resultado - CES Edupack. ....	99
Figura 3.7 Resultado De Materiales Soporte Principal – CES EduPack....	101
Figura 3.8 Resultado De Materiales Perfil Guía Eje X, Y. – CES EduPack. ....	103
Figura 3.9 Resultado De Materiales Base Eje X. –CES EduPack .....	104
Figura 3.10 Resultado De Material Base de cámara. – CES EduPack.....	106

Figura 3.11 Sistema Lineal Multieje – Solidworks.....	107
Figura 3.12 Soporte Principal Estructura – Solidworks.....	108
Figura 3.13 Cargas estáticas - Soporte Principal – Solidworks. ....	108
Figura 3.14 Mallado - Soporte Principal – Solidworks.....	109
Figura 3.15 Resultado del estudio Von Mises – Solidworks. ....	109
Figura 3.16 Resultados del estudio URES – Solidworks. ....	111
Figura 3.17 Factor de seguridad, Soporte principal - Solidworks.....	112
Figura 3.18 Perfil Guía eje X – Solidworks. ....	112
Figura 3.19 Cargas estáticas, Perfil Guía eje X – Solidworks.....	113
Figura 3.20 Mallado, Perfil Guía eje X – Solidworks. ....	113
Figura 3.21 Resultado del estudio Von Mises – Solidworks. ....	114
Figura 3.22 Resultados del estudio URES - Solidworks. ....	115
Figura 3.23 Factor de seguridad Perfil eje X - Solidworks. ....	116
Figura 3.24 Soporte Cámara - Solidworks.....	116
Figura 3.25 Cargas estáticas, Soporte Cámara - Solidworks. ....	117
Figura 3.26 Mallado, Soporte Cámara - Solidworks.....	117
Figura 3.27 Resultado del estudio Von Mises – Solidworks. ....	118
Figura 3.28 Resultados del estudio, URES - Solidworks. ....	119
Figura 3.29 Factor de Seguridad, Soporte Cámara - Solidworks.....	119
Figura 3.30 Carro eje X- Solidworks. ....	120
Figura 3.31 Cargas estáticas, Carro eje X - Solidworks.....	120
Figura 3.32 Mallado, Carro eje X - Solidworks.....	121
Figura 3.33 Resultado del estudio Von Mises – Solidworks. ....	122
Figura 3.34 Resultados del estudio, URES - Solidworks. ....	123

Figura 3.35 Factor de seguridad, Carro eje X - Solidworks. ....	124
Figura 3.36. Correas Dentadas de Alta y Súper Alta Potencia. ....	129
Figura 3.37 Correa dentada seleccionada 1700H – 100.....	130
Figura 3.38 Espacio requerido para la instalación de la correa- Solidworks. .....	131
Figura 3.39 Polea dentada Eje X – Solidworks.....	131
Figura 3.40 Velocidad vs Potencia.....	135
Figura 3.41 Correa dentada seleccionada 450L-100.....	136
Figura 3.42 Espacio requerido para la instalación de la polea-Solidworks.	136
Figura 3.43 Polea dentada Eje Y-Solidworks.....	137
Figura 5.1 Desplazamiento sobre Eje Y - Solisworks. ....	139
Figura 5.2 Velocidad vs Tiempo - Motor eje X. ....	140
Figura 5.3 Aceleración del sistema .....	141
Figura 5.4 Servomotor HK15338. ....	142
Figura 5.5 Ejes metálicos - Servomotor HK15338 .....	144
Figura 5.6 Dimensiones de Motor HK1538. ....	144
Figura 5.7 Fuente de energía seleccionada 12V 3 A.....	146
Figura 5.8 Circuito configuración Puente H - Isis 7 Professional .....	147
Figura 5.9 Circuito configuración Puente H con borneras - Isis 7 Professional. .....	149
Figura 5.10 Circuito configuración Lm7805 - Isis 7 Professional. ....	150
Figura 5.11 Circuito configuración señales para fines de carrera - Isis 7 Professional.....	150
Figura 5.12 Diseño de la placa electrónica Ares Professional. ....	151

Figura 5.13 Tabla para determinar la sección transversal del conductor...	152
Figura 5.14 Tabla para determinar el ancho de pista de la placa electrónica. .....	153
Figura 5.15 Ingreso de datos según diseño establecido- Ares Profesional.	154
Figura 5.16 Caja instalada en el sistema. ....	155
Figura 5.17 Ubicación de la placa electrónica. ....	155
Figura 5.18 Ubicación de la Daq.....	156
Figura 5.19 Caja de control instalada. ....	156
Figura 5.20 My Daq NI usb 6009 – MAX (Labview). ....	158
Figura 5.21 Device Pinouts - NI My Daq (Labview). ....	158
Figura 5.22 Ventana una vez después de resetear el dispositivo con éxito- Labview.....	159
Figura 5.23 Ventana una vez después que el driver de la Daq este correctamente instalado-Labview. ....	159
Figura 5.24 Daq Assistant - Labview. ....	159
Figura 5.25 Daq Assistant Line Input – Digital Input (Labview).....	160
Figura 5.26 Puertos digitales de entrada (Labview).....	160
Figura 5.27 Configuración de Puertos digitales - Fines de Carrera (Labview). .....	161
Figura 5.28 Daq Assistant Line Input – Digital Output (Labview).....	161
Figura 5.29 Puertos digitales de Salida (Labview). ....	162
Figura 5.30 Configuración de Puertos digitales - Control Motores (Labview). .....	162
Figura 5.31 Daq Assistant Generate Voltaje – Analog Output (Labview)...	163

Figura 5.32 Puertos Analógico de Salida (Labview). .....	163
Figura 5.33 Vision Assistant – Labview. ....	164
Figura 5.34 Funciones de procesamiento de imágenes (Labview). ....	164
Figura 5.35 Image Original Cargada al sistema. ....	164
Figura 5.36 Cinta ajustable con luz led. ....	165
Figura 5.37 Configuración para Color Threshold. ....	166
Figura 5.38 Patrón reconocido con Color Threshold. ....	166
Figura 5.39 Imagen en blanco y negro del patrón a reconocer. ....	167
Figura 5.40 Imagen Limitadas Por regiones. ....	167
Figura 5.41 Imagen del patrón reconocida en el ambiente. ....	168
Figura 5.42 Ancho y Alto del patrón. ....	168
Figura 5.43 Matches - Geometry Matches. ....	169
Figura 5.44 Vision Acquisition - Vision and Motion (Labview). ....	169
Figura 5.45 Continuos Acquisition – Labview. ....	170
Figura 5.46 Asistente de Visión Finalizado. ....	170
Figura 5.47 Parámetros configurados en Labview. ....	170
Figura 5.48. Conexión de Visión Acquisition y Visión Assistant. ....	171
Figura 5.49 Unduble by name para sacar las coordenadas. ....	171
Figura 5.50 Conexión para adquirir y procesar la imagen (Labview). ....	172
Figura 5.51 Bloque Fuzzy Controller – Labview. ....	172
Figura 5.52 Componentes del sistema. ....	173
Figura 5.53 Componentes de visión artificial. ....	173
Figura 5.54 Funciones de labview en el sistema. ....	174
Figura 5.55 Lazo de Control. ....	175

Figura 5.56 Fuzzy System Designer (Labview).....	176
Figura 5.57 Variables de entrada y de Salida en Memb. Triangular (Labview). .....	177
Figura 5.58 Membresías de las Variables de Entrada (Labview).....	178
Figura 5.59 Membresías de las Variables de Salida (Labview). ....	179
Figura 5.60 Reglas del controlador Fuzzy (Labview).....	180
Figura 5.61 Duty Cicle del 50 %.....	181
Figura 5.62 Variables usadas en el programa. ....	181
Figura 5.63 Conexión de PWM (Labview). ....	182
Figura 5.64 Interfaz en Labview.....	183
Figura 5.65 Mando Manual y Automático. ....	184
Figura 5.66 Indicadores de Fines de Carrera. ....	185
Figura 5.67 Indicadores de datos.....	185
Figura 5.68 Graficas de la interfaz de Pwm y Salida del Controlador.....	185
Figura 5.69 Parámetros de configuración – Interfaz. ....	186
Figura 5.70 Botón de Stop – Interfaz. ....	186
Figura 5.71 Carga de archivo de la lógica difusa.....	186
Figura 7.1 Sistema de Transmisión por correa Eje Y.....	189
Figura 7.2 Fines de Carrera Frontal y Posterior.....	191
Figura 7.3 Fines de Carrera Laterales Eje X.....	191
Figura 7.4 Gabinete de control.....	192
Figura 8.1 Sistemas lineales (3500 dólares).....	193

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Objetivos de la biomecánica deportiva en relación con el deportista, con el medio y con el material deportivo. ....	6
Tabla 2-1 Etapas de Procesamiento de imágenes. ....	30
Tabla 2-2 Funciones para el procesamiento de imágenes - Vision Assistant (Labview) .....	37
Tabla 2-3. Transformación de Movimiento con mecanismos relacionados..	43
Tabla 2-4. Características geométricas según el tipo de correa. ....	54
Tabla 2-5 Factor de seguridad para selección de correas. ....	55
Tabla 2-6. Tabla de velocidades. ....	67
Tabla 2-7 Propiedades de los materiales.....	70
Tabla 2-8 Ejemplos de Índices de Materiales según características dadas.	71
Tabla 3-1 Evaluación del peso específico de cada criterio. ....	77
Tabla 3-2 Evaluación de solución según criterio a.....	77
Tabla 3-3 Evaluación de solución según criterio b.....	78
Tabla 3-4 Evaluación de solución según criterio c. ....	78
Tabla 3-5 Resumen de criterios evaluados.....	78
Tabla 3-6 Ventajas y Desventajas de posibles soluciones para la Estructura Guía del Eje X.....	79
Tabla 3-7 Evaluación de criterios - Estructura Guía del Eje X. ....	80
Tabla 3-8 Evaluación del criterio Peso.....	80
Tabla 3-9 Evaluación del criterio Facilidad de diseño, construcción y montaje. ....	80
Tabla 3-10 Evaluación del criterio Capacidad de Carga.....	80
Tabla 3-11 Evaluación del criterio Costo. ....	81

Tabla 3-12 Conclusiones según criterios evaluados.....	81
Tabla 3-13 Ventajas y Desventajas de posibles soluciones para Sistemas de Desplazamiento. ....	82
Tabla 3-14 Evaluación de criterios - Sistema de Desplazamiento. ....	83
Tabla 3-15 Evaluación del criterio Carga. ....	83
Tabla 3-16 Evaluación del criterio Disponibilidad en el mercado. ....	83
Tabla 3-17 Evaluación del criterio Costo. ....	83
Tabla 3-18 Conclusiones según criterios evaluados.....	84
Tabla 3-19 Ventajas y Desventajas - Sistemas de Tracción.....	86
Tabla 3-20 Evaluación de criterios - Sistema de Tracción. ....	87
Tabla 3-21 Evaluación del criterio Costo - Eje X.....	87
Tabla 3-22 Evaluación del criterio Costo - Eje Y.....	88
Tabla 3-23 Evaluación del criterio Diseño, construcción y montaje - Eje X. ....	88
Tabla 3-24 Evaluación del criterio Diseño, construcción y montaje - Eje Y. ....	88
Tabla 3-25 Evaluación del criterio Mantenimiento - Eje X.....	89
Tabla 3-26 Evaluación del criterio Mantenimiento - Eje Y.....	89
Tabla 3-27 Evaluación del criterio Capacidad de Carga - Eje X. ....	89
Tabla 3-28 Evaluación del criterio Capacidad de Carga - Eje Y. ....	89
Tabla 3-29 Conclusiones según criterios evaluados - Eje X. ....	90
Tabla 3-30 Conclusiones según criterios evaluados - Eje Y.....	90
Tabla 3-31 Ventajas y Desventajas - Alternativas de Motores.....	92
Tabla 3-32 Evaluación de criterios - Alternativas de Motores. ....	93
Tabla 3-33 Evaluación del criterio Pequeña Dimensión.....	93
Tabla 3-34 Evaluación del criterio Fácil control de velocidad y posición.....	93
Tabla 3-35 Evaluación del criterio Bajo costo. ....	94

Tabla 3-36 Evaluación del criterio Torque específico. ....	94
Tabla 3-37 Conclusiones según criterios evaluados. ....	94
Tabla 4-1 Función de cada componente del sistema. ....	98
Tabla 4-2 Factores Limitantes para el diseño del Soporte Principal. ....	101
Tabla 4-3 Factores Limitantes para el diseño del Perfil Guía X, Y. ....	102
Tabla 4-4 Factores Limitantes para el diseño de la Base - Eje X. ....	104
Tabla 4-5 Factores Limitantes para el diseño de la Base de la cámara. ....	105
Tabla 5-1 Tabla de velocidades. ....	140
Tabla 5-2 Descripción de pines - Puente H. ....	148
Tabla 5-3 Configuración para generar giro a motor. ....	148
Tabla 6-1 Descripción de canales usados de la My Daq. ....	157
Tabla 6-2 Puntos de cada membresía V. entrada. ....	178
Tabla 6-3 Puntos de cada membresía V. Salida. ....	179
Tabla 7-1 Prueba del sistema mecánico. ....	188
Tabla 7-2 Prueba del sistema electrónico. ....	189

## ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** Tablas de resultados para la selección de materiales – EduPack.
- ANEXO B:** Estimación de cantidad de masa por elemento estructural y mecánico.
- ANEXO C:** Coeficiente de Servicio – Correas dentadas marca DAYCO.
- ANEXO D:** Tipo de correas dentada seleccionadas.
- ANEXO E:** Señales de la tarjeta de adquisición DAQ Usb 6009.
- ANEXO F:** Sistema mecánico armado.
- ANEXO G:** Programación en Labview.
- ANEXO H:** Características del Servomotor HK1538.
- ANEXO I:** Características del integrado L298 (Datasheet).
- ANEXO J:** Características del integrado LM7805 (Datasheet).
- ANEXO K:** Presupuesto gastado en el Proyecto.
- ANEXO L:** Manual de usuario.
- ANEXO M:** Planos.

## RESUMEN

El presente documento explica el desarrollo de un sistema de posicionamiento lineal para dar movilidad automática a una cámara. La movilidad del sistema dependerá de la detección de un patrón puesto sobre la persona en movimiento. El movimiento automático de la cámara se lo realiza en el Eje Y y X, mientras que en el Eje Z el movimiento es manual. Para realizar el reconocimiento de un patrón en movimiento se ha empleado el software Labview de National Instruments, el cual incluye varios drivers para la adquisición y procesamiento de imágenes. Por medio de la programación en Labview se diseñó el control difuso teniendo como salida el parámetro de la modulación por ancho de pulso (PWM) con la que se determina las velocidades de los motores. El sistema detectará al patrón mediante coordenadas haciendo que la imagen permanezca dentro de un enfoque establecido manteniendo al patrón en el centro de la imagen siempre. El movimiento del sistema contará con parámetros de seguridad para que el sistema se reinicie sin causar daños a los actuadores. Además la distancia que la cámara recorre es restringida mediante fines de carrera que aseguran el movimiento y envían la señal por medio de una tarjeta de adquisición de datos My daq Usb 6009 la misma que se encarga de generar y recibir señales del computador a la planta y viceversa.

**Palabras Claves:** Vision Artificial – Labview – My Daq - PWM – Control Difuso

## 1. CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

### 1.1. Antecedentes

En la línea del tiempo el interés por estudiar el movimiento del cuerpo humano en el campo de la medicina ha tenido buenos resultados gracias al avance tecnológico. En la actualidad la tecnología avanza en su desarrollo y ha hecho que desde la década de los 70's con el desarrollo de la fotografía, científicos se interesen en utilizar con habilidad sistemas de video con el objetivo de realizar estudios detallados de análisis biomédicos a seres humanos que presentaban patologías relacionados con trastornos neuromusculares.

Para la década de los 80's el análisis de la marcha humana ayudaba mucho a mejorar los tratamientos de ortopedia en todo el mundo motivo por el cual se empezaba a implementar equipos más sofisticados en laboratorios de muchos hospitales de aquella época, tanto para el diseño de planes de tratamiento como para el estudio de marcha de un paciente.

Con el análisis de la marcha se ha logrado que se estudie características clínicas del paciente en cuyo estudio se pueda generar patrones de movimiento que permita identificar el problema y se pueda desarrollar una buena rehabilitación que mejore el rendimiento físico y psicológico. Esta mejora se logra con equipos desarrollados para seguir patrones que sigan la marcha del paciente y de esta manera se obtengan videos para futuros análisis y resultados de la patología del paciente.

### **1.1.1. Análisis de marcha**

La marcha humana está conformada por un conjunto de gestos extremadamente complejos y propios del ser humano. Cada individuo tiene un patrón diferente en la marcha porque no todas las personas caminan igual, debido a la anchura de pie, peso, estatura, longitud de extremidades, longitud de paso, velocidad, estado anímico, calzado, etc., por lo que es necesario contar un protocolo estandarizado que permita obtener datos de interés de forma confiable y eficaz. (Moreno de la Fuente, 2003)

Los datos obtenidos en el estudio de marcha permiten revelar aspectos individuales de la condición de salud y situaciones emocionales de cada persona. La exploración de la marcha dentro del proceso de evaluación del movimiento corporal humano sirve para determinar la condición del funcionamiento y discapacidad de un individuo convirtiéndose en una herramienta fundamental que revela las posibilidades motoras que tiene una persona para llevar a cabo las diferentes actividades cotidianas en el medio que se relacione (Lesmes, 2007, pág. 259). Esto ha permitido conocer el rendimiento que posee un individuo en alguna actividad física o discapacidad siguiendo un estudio comparativo de su sistema locomotor al caminar.

En la actualidad los laboratorios de análisis de marcha han implementado sistemas completos para el estudio de movimiento, instalando sistemas multi-cámara, plataformas de fuerza, electromiógrafos y equipos computarizados que brindan gran precisión para el diagnóstico y el entrenamiento de la marcha (Lesmes, 2007). Pero por más sofisticado que sean los equipos no siempre están al alcance motivo por el cual se pone a

prueba el talento ecuatoriano para generar equipos que se pueda complementar con un sistema de medición que genere el mismo alcance de otros que toman datos y son computacionales.

### **1.1.2. Sistemas de Análisis Biomecánicos**

Con el desarrollo de la informática se ha creado software capaz de generar datos a medida que se realiza el estudio médico por medio de un sistema computacional a través de imágenes en tercera dimensión dando a conocer datos para un estudio objetivo de la marcha normal y patológica del paciente.

La biomecánica también ha tenido participación en el área deportiva evaluando las condiciones físicas del paciente y su rendimiento para que se pueda realizar correcciones de hábitos, ergonomía del deporte e implementar nuevos diseños y evaluación del calzado, etc. Muchos deportistas prefieren ser atendidos y estudiados por un laboratorio de movimiento para mejorar sus entrenamientos y en un futuro tener menos lesiones o fatigas musculares.

En el Ecuador existe solo un laboratorio capaz de estudiar el movimiento por medio de captura de imágenes, llamada fotogrametría el mismo que captura imagen de tercera dimensión para futuros análisis de datos según la necesidad del paciente.

En el presente trabajo se desarrollara un equipo capaz de satisfacer con las necesidades del laboratorio brindando movimiento automático a una de sus cámaras a través de visión artificial al sistema.

## 1.2. La biomecánica

Redín Izquierdo afirma que “el estudio del movimiento humano se puede abarcar desde muchos puntos de vista: psicológico, filosófico, biológico, físico y anatómico” (Izquierdo Redín, 2008, págs. 3-4). Es así que la biomecánica se encuentra en cualquier actividad física desde caminar, correr, saltar y su aplicación, estudio y desarrollo ayuda a entender el tratamiento que se va a usar a cada paciente o deportista para su rehabilitación o mejora física.

Existen diferentes disciplinas como la Biología, Ergonomía, Ingeniería, Fisiología Y Medicina en donde conocer de biomecánica es indispensable para dar soluciones en diferentes áreas. Izquierdo deduce que en el “campo de la ingeniería en el tratamiento de señales se pueden registrar y analizar las señales provenientes de la activación de las unidades locomotoras” (Izquierdo Redín, 2008). Esto conlleva una gran responsabilidad ya que un profesional necesita conocer las características físicas del cuerpo humano y los principios mecánicos que gobiernan los movimientos con el propósito de orientar en el mejor rendimiento humano o prevenir lesiones relacionadas con una práctica mecánicamente del todo no correcta.

Los estudios de biomecánica en el sujeto pueden ser de tres tipos (Izquierdo Redín, 2008):

- Cuando existe un movimiento nuevo
- Cuando existe una hipótesis y se desarrolla estudios experimentales
- Cuando se requiere sacar el modelamiento de un movimiento,

Todos estos casos permiten que después del estudio se pueda adquirir datos que durante el movimiento del paciente se pueda obtener variables reales ajustadas a la capacidad física de cada individuo. Es por eso que la biomecánica entra en relación también con el deporte ya que exige una preparación física y un entrenamiento adecuado para practicarlos sin temor a lesionarse en un futuro. Su alcance consiste en determinar los parámetros que un deportista debe tener en cuenta para realizar una correcta práctica deportiva y que no se lesione. Todos estos estudios generan criterios científicos que permiten saber que implementos se puede utilizar y que técnica puede ser la más útil para hacer un deporte. Algunas de las áreas de investigación por parte de la biomecánica se dirigen a áreas del movimiento humano tales como (Izquierdo Redín, 2008):

- Mecánica del movimiento humano,
- Funcionamiento de los músculos, tendones, ligamentos, cartílagos y huesos.
- Factores influyentes en el del movimiento del cuerpo humano.

Los objetivos de la biomecánica en relación al medio en el que se produce se puede ver en la Tabla 1-1.

<b>En la relación con el deportista</b>
Ofrecer nuevos dispositivos y métodos de registro Corregir defectos en las técnicas y ayudar en el entrenamiento Evitar las lesiones con ejecución de técnicas deportivas segura Proponer técnicas más eficaces
<b>En relación con el medio</b>
Minimizar las fuerzas de resistencia Estudiar las fuerzas de acción- reacción y sustentación para mejorar el rendimiento deportivo Estudiar las fuerzas de reacción del suelo en relación con las lesiones deportivas
<b>En relación con el material deportivo</b>
Reducir el peso del material deportivo Aumentar en alguno casos la rigidez flexibilidad o elasticidad del material Aumentar la durabilidad del material Conseguir materiales más seguros Conseguir materiales que permitan lograr mejores marcas

Tabla 1-1 Objetivos de la biomecánica deportiva en relación con el deportista, con el medio y con el material deportivo.

(Fuente: (Izquierdo Redín, 2008)).

### 1.3. Visión artificial en la Biomecánica.

En la actualidad gracias a la visión artificial se puede obtener información detallada del objeto a reconocer o estudiar. En la medicina su aplicación consiste en el procesamiento de imágenes tanto en exámenes como tomografías, radiografías o en la extracción de imágenes en donde se puede detectar el movimiento y el volumen.

“La aplicación de interpretar automáticamente las actividades de las personas combina métodos de seguimiento visual con reconocimiento de patrones y aprendizaje” (Visión artificial e interacción sin mandos, 2010).

En el análisis de imágenes se puede seguir varios patrones de movimientos, los mismos que son analizados en diferentes aplicaciones de acuerdo al estudio del análisis.

Los laboratorios que ocupan un sistema computacional de extracción de datos por medio de imágenes están orientados al diagnóstico de dolencias o enfermedades con la ayuda de videos analógicos grabados en un ordenador para su posterior estudio y desarrollo de un diagnóstico efectivo.

Al abarcar diferentes ejemplos en la medicina, la visión artificial también es muy útil cuando se requiere dar a un mecanismo más velocidad de respuesta y permita automatizar el sistema. La utilización de visión artificial para grabar el movimiento de un paciente o poder utilizar patrones de reconocimiento que sigan al paciente en su marcha hace que el sistema sea más efectivo y menos complicado al momento de utilizarlo.

El seguimiento visual junto con la robótica se ha convertido en áreas de investigación para hacer proyectos en el campo de la medicina desarrollando sistemas acoplables y adaptables en sistemas automáticos de visión en entornos diferentes. El seguimiento de patrones junto con la visión artificial permite dar una mejor orientación y posición a la cámara que sigue el movimiento. Los primeros sistemas hechos con reconocimiento de patrones fueron hechos para dar módulos de detección que activan la grabación de secuencias. (ARTAL, 2003)

El laboratorio de análisis de movimiento en Quito consta de un sistema de video que capta tridimensional el movimiento del paciente. El sistema permite la recolección simultánea de datos e imágenes en 3d y en tiempo real por medio de cámaras instaladas en el laboratorio. (Laboratorio de Análisis de Movimiento, 2013)

#### 1.4. Características del Laboratorio LAM en Quito

LAM es un laboratorio donde se realiza el análisis del movimiento empleando un sistema de medición de alta tecnología, que recolecta datos e imágenes en tres dimensiones. Pero a pesar de que las cámaras del laboratorio trabajan en conjunto con un ordenador para la obtención de datos, su enfoque resulta en ocasiones no ser tan efectivo por que las cámaras son estáticas. (Laboratorio de Análisis de Movimiento, 2013)

Las imágenes obtenidas se almacenan en videos clínicos, que permiten ver claramente los rangos de movimiento y sus desviaciones respecto a patrones nominales que se emplea para cada estudio.

El laboratorio consta de 5 módulos para el análisis del sujeto:

**Módulo de Cinemática:** filma al paciente o deportista con seis cámaras de video digital de alta velocidad desde ángulos distintos. El paciente o deportista usa marcadores que reflejan la luz de las lámparas, resaltando la ubicación de los puntos específicos sobre los que se encuentra el marcador respetando protocolos estandarizados. (Laboratorio de Análisis de Movimiento, 2013)

**Módulo Cinético:** mide la fuerza de reacción del piso cuando el paciente o deportista camina sobre una placa de fuerza. (Laboratorio de Análisis de Movimiento, 2013)

**Módulo de Electromiografía Dinámica:** evalúa la actividad muscular durante el ciclo de marcha o de movimiento. (Laboratorio de Análisis de Movimiento, 2013)

**Módulo de Video:** Consiste en un módulo de visualización de las imágenes del movimiento del paciente para brindar al evaluador físico una herramienta para su tradicional análisis visual, con la gran ventaja que este sistema está sincronizado con otros módulos (cinética, electromiografía y presiones plantares) durante la misma prueba que se practica al paciente o deportista, sin que haya la necesidad de repetirla durante la evaluación con un módulo distinto. (Laboratorio de Análisis de Movimiento, 2013)

**Estudio de Baropodometría:** permite el análisis completo de la mecánica del pie durante el apoyo en la marcha o en el movimiento. (Laboratorio de Análisis de Movimiento, 2013)

### **1.5. Justificación e Importancia**

El laboratorio de análisis de movimiento tiene como responsabilidad la de proveer a los pacientes un buen estudio clínico a través de un sistema de estudio de movimiento de alta tecnología que captura el movimiento del paciente para la recolección y estudio de datos.

La toma de datos es la fase más importante que requiere el laboratorio para asegurar que los gráficos y datos obtenidos sean satisfactorios y útiles para un posterior estudio clínico.

Para un estudio completo se necesita enfocar al paciente desde un punto frontal, posterior y lateral, siendo este último el que presenta inconvenientes. Este plano que se requiere filmar con la cámara lateral se denomina **Plano Sagital**. La Figura 1.1 describe la ubicación de las cámaras en el laboratorio.



Figura 1.1 Fotografía del LAM con la descripción de ubicación de las cámaras.

(Fuente: (Laboratorio de Análisis de Movimiento, 2013)).

El problema radica en que la filmación de la marcha desde un punto de vista perpendicular al sentido de la caminata y al plano del piso (plano Sagital) no se realiza con la precisión necesaria porque la distancia hasta el paciente es muy corta, generando en consecuencia un rango limitado de visualización. Ver Figura 1.2.

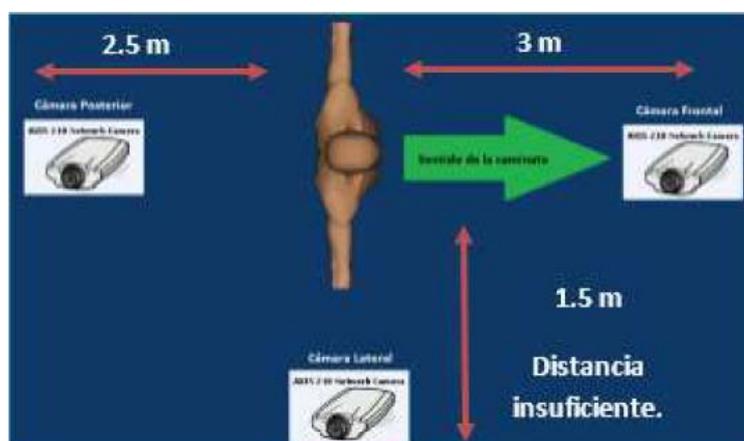


Figura 1.2 Esquema del laboratorio.

(Fuente: Propia).

Para solucionar este problema, actualmente, el encargado/a del laboratorio debe mover la cámara de manera manual en sentido paralelo a la marcha. Cuando la marcha del paciente es ligeramente rápida (no necesariamente cuando corre), es casi imposible captar videos. El pulso del

asistente pierde el ángulo completo de filmación y se tiene que mover a la cámara bruscamente. En el caso más crítico de movimiento, para el examen a un deportista, la cámara deberá moverse a la velocidad de marcha del sujeto.

Adicionalmente el laboratorio estudia la marcha a pacientes con parálisis cerebral o con problemas de desplazamiento propio. En el examen a estos pacientes la cámara debe tener el enfoque correcto y seguir al sujeto mientras camina. En estos casos el encargado/a de laboratorio no puede obtener una buena filmación. Incluso ocurren situaciones en que el asistente debe ayudar al paciente a realizar la caminata, sin poder realizar la filmación del paciente.

Además los pacientes con problemas serios se cansan muy rápido y si el examen no resulta bueno, se tiene que esperar un cierto tiempo hasta que el paciente descanse y pueda realizar el examen nuevamente.

En resumen, los problemas que se presentan en el actual sistema de análisis de marcha son los siguientes:

- La imagen solo cubre una parte de la marcha de la persona, debido a que la cámara está posicionada en una montura estática.
- El encargado de realizar el análisis debe mover manualmente la cámara sin que tenga la seguridad de que la imagen tenga un buen enfoque.
- El análisis se realiza en personas de diferentes tamaños y edad de manera que el encargado de la filmación debe inclinarse para filmar a personas pequeñas o niños, haciendo más difícil el enfoque de la imagen.

- El laboratorio trabaja con personas con diferentes discapacidades. En este caso el encargado no puede manipular la cámara y ayudar al mismo tiempo a los pacientes a realizar la caminata.
- La cámara no se puede reubicar en el otro lado de la persona por la configuración del resto de elementos de medición que utiliza el análisis.

Debido a esta problemática, se busca proveer de un sistema de desplazamiento lineal a la cámara, con un control apropiado para que se adapte a la velocidad del paciente, proporcionando un enfoque completo del sujeto con respecto a la parte que se desea estudiar.

Es importante que el control dé al sistema una fácil manipulación respecto la parte mecánica, capaz de poder disminuir al máximo los problemas existentes actualmente.

En el Ecuador el laboratorio LAM es el primer laboratorio biométrico, donde se estudia el análisis de movimiento con equipos de alta tecnología, aprovechándose al máximo las facilidades tecnológicas con el fin de realizar exámenes rápidos y menos tediosos. En este sentido, el proyecto está orientado a mejorar el procedimiento de toma de datos para realizar un correcto análisis de movimiento.

El espacio en donde se realiza el estudio y análisis de marcha se puede ver en la Figura 1.3.



Figura 1.3 Instalaciones del Laboratorio – LAM.  
(Fuente: (Laboratorio de Análisis de Movimiento, 2013)).

## 1.6. Objetivos

### 1.6.1. General

Diseñar y construir un sistema de posicionamiento lineal motorizado controlado por visión artificial para cámara de análisis computarizado del laboratorio de análisis de movimiento (LAM).

### 1.6.2. Específicos

- Diseñar y construir el sistema de posicionamiento mecánico lineal multieje que garantice una respuesta inmediata al seguimiento de una persona en movimiento.
- Sustentar el estudio mediante la elaboración de un marco teórico.
- Diseñar mecanismos para permitir a la cámara trasladarse en dos ejes cumpliendo con el enfoque preciso de la marcha del sujeto.
- Instalar un sistema de visión artificial para analizar la marcha del paciente en el entorno del laboratorio.
- Elaborar una interface en Labview que permita al usuario ver la imagen capturada controlando el movimiento de la cámara de forma manual y automática.

- Desarrollar el sistema de control para obtener una respuesta rápida que permita seguir al paciente en función de los datos obtenidos por la cámara.

## 1.7. Alcance del proyecto

### 1.7.1. Sistema mecánico

El sistema mecánico consiste de un sistema de posicionamiento lineal que desplazará la cámara horizontalmente y perpendicularmente a la trayectoria de la marcha. El sistema podrá moverse en los tres ejes X, Y y Z, como lo describe la Figura 1.4. Se utilizará un mecanismo de banda-engrane para generar los movimientos sobre eje X, Y, mientras que el desplazamiento sobre el eje Z se realizará manualmente.

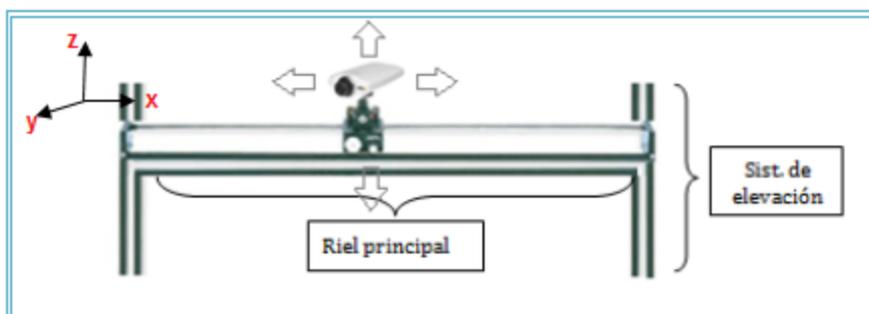


Figura 1.4 Esquema mecánico de la estructura.  
(Fuente: Propia).

El primer movimiento de la cámara será el desplazamiento que realice para alejarse o acercarse al paciente (eje Y). La distancia en el eje Y se limita a un desplazamiento de 15 cm de longitud. Esta distancia es suficiente para obtener una mejor imagen del paciente. La Figura 1.5 muestra la diferencia de enfoque cuando hay una diferencia de 15 cm en la distancia desde donde se tomó la foto.

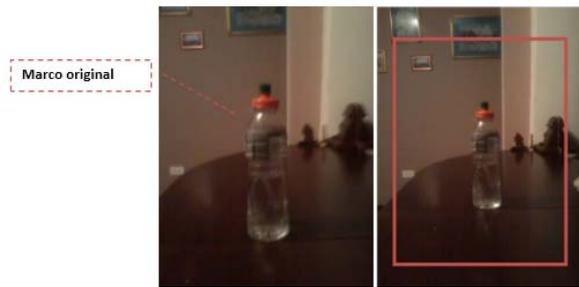


Figura 1.5 Fotos tomadas a 15 cm de diferencia en distancia.  
(Fuente: Propia).

El movimiento del eje Y se realizará en una estructura que permita un movimiento lineal en el eje mencionado. El giro en el eje Y se controlará por medio de un servomotor, de tal manera que éste pueda desplazarse en dirección perpendicular a la marcha del sujeto.

La estructura lineal del eje Y consiste en un perfil en donde puedan instalarse las rieles para generar movimiento. Las riel del sistema de desplazamiento lineal se denominara *riel principal* y se ubicará en los dos ejes X, Y.

El movimiento del eje X se realizará en una estructura que permitirá mover a la cámara 1.40 metros. El mecanismo a usarse para generar movimiento es un sistema de banda dentada y engrane para mover la cámara en la dirección de la marcha del paciente.

El movimiento del eje Z es manual y se conformará de un eje con tornillo de ajuste para generar y restringir el movimiento. Los movimientos de cada eje se generarán en una misma estructura que permita desarrollar un sistema de elevación para modificar la altura de la cámara manualmente y un sistema de desplazamiento con el que el sistema moverá a la cámara tanto en eje X, Y automáticamente para seguir el movimiento del sujeto.

La estructura del eje Y se montara en un perfil que contenga la riel principal y con suficiente espacio para disponer de la instalación de un sistema de correa dentada. En la Figura 1.6 se muestra la idea simulada en CAD.

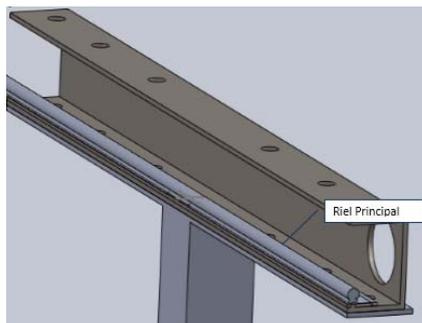


Figura 1.6 Sistema de desplazamiento en el eje x simulado en CAD.  
(Fuente: Propia).

#### Resumen de características:

- Alcance máximo horizontal (eje x): 1.40 m.
- Alcance máximo eje y: 0.15 m.
- Grados de Libertad: 3 grados (eje X, Y y Z)
- Posición de montaje: En el piso
- Velocidad Máxima: 2.5 m/s.

Las dimensiones de la cámara del LAM son de 169 mm de largo por 88 mm de ancho con un peso de 250 g. Con esta información se dimensionará la estructura de soporte de la cámara. Las dimensiones de la cámara se la puede ver en la Figura 1.7.

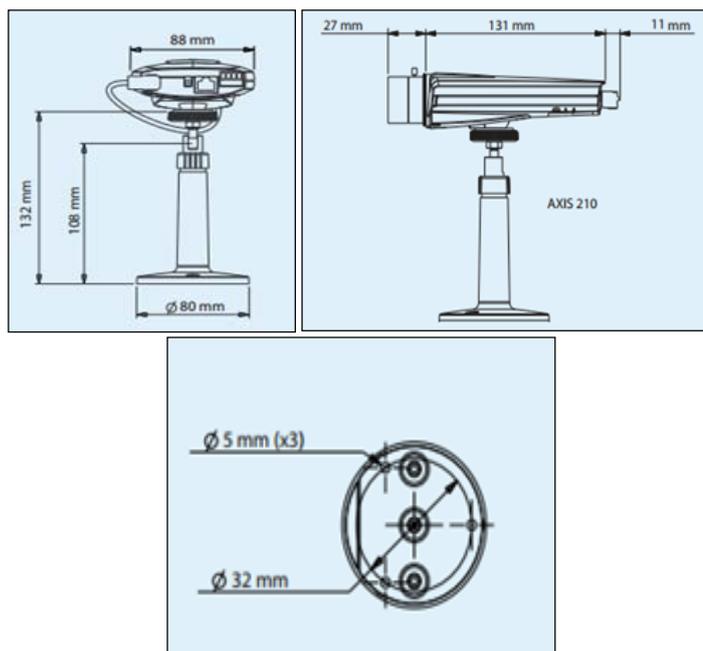


Figura 1.7 Dimensiones de la Cámara descritas por el fabricante.  
(Fuente: Propia).

### 1.7.2. Sistema electrónico/eléctrico

El control central del sistema será realizado por medio de una tarjeta electrónica MyDAQ de National Instruments (NI). Se escoge esta forma de adquisición de datos y salida de señales de control principalmente por la comodidad que presenta NI con los módulos de visión artificial dentro del entorno de programación de Labview y la cantidad de salidas análogas/digitales que posee la tarjeta. Ver Figura 1.8.



Figura 1.8 MyDAQ de National Instruments.  
(Fuente: (National Instrument, 2013)).

La señal de video se obtiene directamente de la cámara que actualmente se utiliza en el laboratorio. Esta cámara se conecta al computador del laboratorio por un cable de red con una IP asignada. Los módulos de visión artificial de Labview requieren que la cámara se encuentre conectada al computador para identificarla y utilizar la imagen de video.

El sistema electrónico se encarga de controlar el giro y velocidad de los motores utilizados para desplazar la cámara horizontalmente y tener un mejor enfoque de marcha del paciente. El servomotor a utilizar será de la marca Hobby King modelo Hk15338 (ver Figura 1.9). (HobbyKing, 2014)

Este servo posee dimensiones estándar pero con una mayor potencia gracias al cojinete metálico de salida que transfiere toda la potencia al eje con precisión y suavidad. El servo posee un torque de 25 Kg · cm a 6V. (HobbyKing, 2014) (detalles del servomotor en el **Anexo H**).



Figura 1.9 SERVO MOTOR Hk15338.

(Fuente: (HobbyKing, 2014) ).

El sistema dispondrá de fines de carrera que electrónicamente generan la señal que restringe el movimiento y evita el daño de los motores. Se tiene que modificar el servomotor para eliminar la limitación de giro que posee en su sistema de engranes. De esta manera se dispondrá servomotores

convertidos en motores Dc aprovechando la fuerza en torque para que generen movimiento a la velocidad específica de 2.5 m/s.

Adicionalmente, se desarrollará una interface visual en Labview que permita un control manual y automático del sistema. Esta interface constará de las siguientes partes:

- Botones de Apagado y Prendido,
- Interruptor para seleccionar modo Manual/Automático,
- Imagen capturada por la cámara en tiempo real,
- Botones para mover la cámara manualmente desde el interfaz,
- Botones de configuración de parámetros,
- Botón de stop general,
- Indicadores de posición.

Cuando el usuario cambie el funcionamiento a modo manual, éste podrá mover la cámara desde el computador controlando la velocidad del sistema, mientras que cuando el sistema se encuentre en este modo automático y se encienda el sistema, la cámara instantáneamente buscará los indicadores en el paciente para moverse libremente.

### **1.7.3. Sistemas de control**

En el sistema de control se desarrollará un controlador Fuzzy, teniendo en cuenta el seguimiento de un patrón que va a tener que detectar la cámara para generar el movimiento del motor en el eje X. Los dos motores del eje Y serán controlados si el paciente se aleja o se acerca mediante señales controladas por el sistema de adquisición de datos (My Daq).

Para obtener una lectura más real de la ubicación del paciente dentro del cuadro de imagen, se colocará un indicador, o varios indicadores dependiendo de la necesidad del examen o prueba. El o los indicadores se colocarán en un lugar determinado del cuerpo del paciente de acuerdo a la parte que se desee analizar. Por ejemplo, en el caso de analizar las extremidades inferiores, se puede ubicar un indicador en cada rodilla del paciente. Estos indicadores tendrán la forma geométrica de un círculo y su color se determinará de acuerdo a la intensidad de luz que ingrese al cuarto para que el patrón sea fácil de detectar por la cámara.

La iluminación es un detalle importante en los sistemas de control visual. El laboratorio limita la luminaria para que tengan un ambiente de iluminación controlado cada vez que se realicen los exámenes de movimiento.

La variable de control será la posición de los indicadores dentro de la imagen de la cámara. La posición se medirá en coordenadas rectangulares que corresponden a las dimensiones del cuadro de la imagen. En la Figura 1.10 se visualiza un ejemplo de la detección de una figura por medio de una cámara.



Figura 1.10 Identificación de un patrón por visión artificial.  
(Fuente: Propia).

Tal como se mencionó previamente, los indicadores sobrepuestos en el paciente serán detectados por la cámara y su posición será analizada para determinar las coordenadas dentro del cuadro de filmación (Ver Figura 1.11).

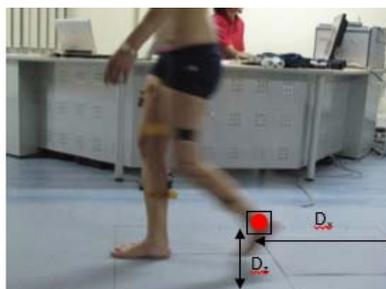


Figura 1.11 Medidas de control para la cámara.  
(Fuente: Propia).

Finalmente, el control en lazo cerrado seguirá el esquema de control indicado en la Figura 1.12.

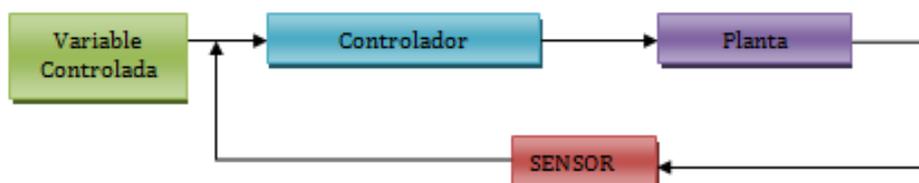


Figura 1.12 Esquema de Control del sistema.  
(Fuente: Propia).

Sustituyendo los parámetros del proyecto, el esquema de control es aquel que se observa en la Figura 1.13.

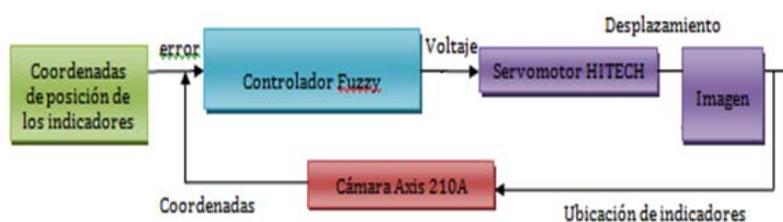


Figura 1.13 Lazo de Control con los parámetros del sistema.  
(Fuente: Propia).

## **1.8. Metodología del Proyecto**

Como metodología del proyecto se utilizó el Método Científico, en donde para desarrollarlo se implementó diferentes métodos tales como el método analítico, sintético, teórico, histórico lógico e inductivo.

Las técnicas implementadas dentro del método son la técnica documental y de campo.

Dentro de la técnica documental el instrumento que se usó para la recopilación de información es la elaboración de citas dentro del documento mediante notas de pie de página. En cambio dentro de la técnica de campo el instrumento de observación directa utilizado son los registros, notas y cámaras.

La etapa final de la metodología consiste en aprovechar los resultados para argumentarlos y explicarlos con el fin de satisfacer los objetivos previamente definidos e incrementar el conocimiento obtenido en el transcurso del desarrollo del proyecto.

## 2. CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Introducción

Los sistemas mecatrónicos se caracterizan por la sinergia entre sus componentes electro-mecánicos y la respuesta inmediata del sistema de control. Este proyecto no se diferencia de ninguna manera. En este sentido, el sistema se desarrolla con la tecnología que mejor pueda responder a las necesidades del laboratorio. La tecnología se explica a continuación a través de un marco teórico que enmarca las características más puntuales que el sistema va a utilizar.

### 2.2. Visión artificial

Generalmente se comprende que los desarrollos tecnológicos y científicos se producen en respuesta a una necesidad de solucionar problemas u mejorar situaciones de la vida común. Una de las áreas con bastante desarrollo tecnológico y científico es la Visión Computarizada o Visión Artificial. Ésta nació de la creatividad de mentes brillantes que fueron capaces de adaptar la tecnología en procesos cuyo interés era de satisfacer el estudio de interpretación de datos en donde la percepción de los sentidos del hombre no era capaces de asimilarlos.

En 1966, durante las vacaciones de verano del profesor Marvin Minsky, fundador del programa de Inteligencia Artificial en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), delega el proyecto de pregrado a sus estudiantes de “enlazar una cámara a una computadora y hacer que la computadora describa lo que ve” (Szeliski, 2010). A partir de este inicio evolucionan las

técnicas del reconocimiento de objetos a través de una cámara y un computador.

Hoy en día gracias al desarrollo de la electrónica, de cámaras de video y de microprocesadores hacen que el uso de la visión artificial sea aplicable en diferentes ramas de la ciencia, siendo una de estas la medicina.

### **2.2.1. Concepto General**

La visión artificial se define como un campo científico que maneja un conjunto de técnicas por computador para la obtención, procesamiento y análisis de información espacial del mundo real en imágenes digitales. También es conocida como una rama de la inteligencia artificial en donde el ordenador es programado para que entienda e identifique las características de una imagen.

### **2.2.2. Características de un Sistemas de Visión Artificial**

Un sistema de visión artificial intenta simular la capacidad sensorial del ser humano. El sensor de un ser humano interpreta lo que ve gracias al cerebro. Los ojos reciben luz en forma directa o de forma refractada y el cerebro es el encargado de interpretar estas señales y de reconocer lo que está viendo. Con la visión artificial pasa exactamente lo mismo, la cámara de video cumple la función de los ojos, mientras que el sistema informático se encarga de procesar la información para el análisis y reconocimiento de imágenes. Para ello el sistema debe ser capaz de reconocer la presencia de objetos mediante características específicas como su color, forma, dimensión etc.

Originalmente el concepto de visión artificial parte del estudio de Inteligencia Artificial. En la década de los 70s se impone como objetivo principal el deseo de lograr simular funciones del ser humano, como el sentido de vista e interpretación. Esta relación llegaba a tal punto que estos dos conceptos no se separaban demasiado dentro de su estudio.

Una de las ramas de la visión artificial que es de interés al realizar el proyecto son los sistemas de percepción visual, audible y táctil. Estos sistemas pueden interpretar inferir acerca de la calidad u orientación física de los objetos que pasan por delante de una cámara. (Rauch-Hindin, 1989, pág. 6) (Ver Figura 2.1).

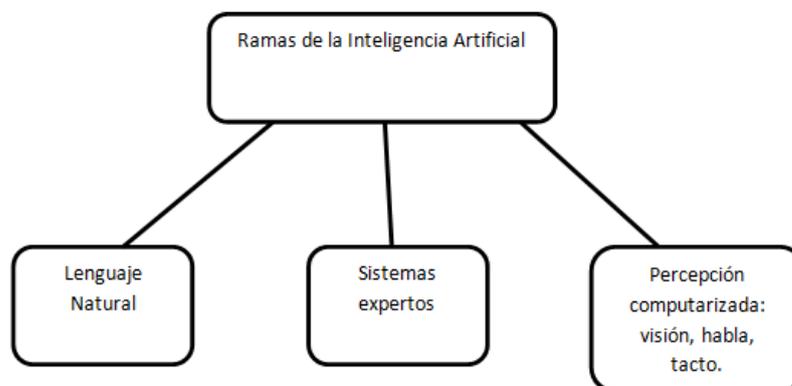


Figura 2.1 Ramas de la Inteligencia Artificial.  
(Fuente: (Szeliski, 2010)).

Las capacidades de estos sistemas aún están limitadas y solo se pueden utilizar bajo ciertas condiciones de iluminación y en escenarios simples.

### 2.2.3. Componentes de un sistema de visión artificial

A continuación se detalla cada uno de los componentes de un sistema de visión artificial por computadora tal y como se ve en la Figura 2.2.

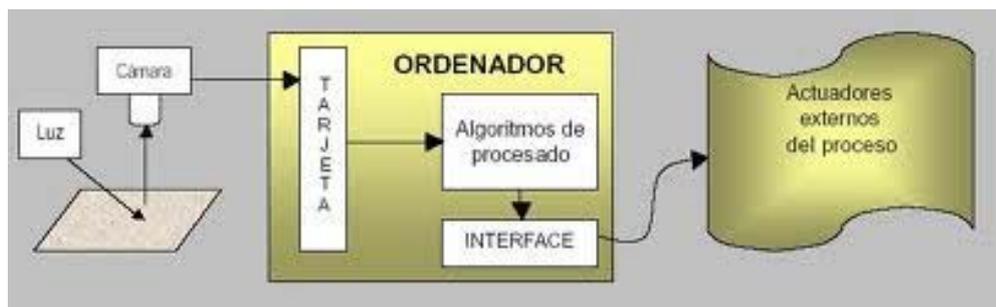


Figura 2.2 Componentes fundamentales de un sistema de visión artificial.  
(Fuente: (Asignatura de Gráficos en Computación, 2010)).

### 2.2.3.1. Sistema de iluminación

El componente iluminación de un sistema de visión artificial es muy importante para la toma de imágenes y reconocimiento de patrones en el sistema ya que las cámaras no ven los objetos, ven la luz reflejada de los objetos hacia ellos. Según Microscan “la iluminación de visión artificial se define como la medida de luz computarizada” (MICROSCAN, 2010, pág. 3) Con el reconocimiento de patrones el sistema puede llegar a un 90% de éxito según la iluminación proporcionada.

En un sistema de iluminación se tendrá en cuenta lo siguiente:

- Intensidad de luz necesaria
- Superficie a iluminar
- Efectividad del objeto
- Color del objeto
- Tipo de cámara utilizada

### **2.2.3.2. Sistema de captura de imagen**

Existe una gran variedad de cámaras digitales, pero todas funcionan bajo el mismo principio, aunque la calidad de la imagen varíe según los componentes utilizados. El lente de la cámara recibe la luz reflectada sobre un objetivo para realizar el primer filtro antes de transformar la luz en señales eléctricas procesadas por un circuito integrado. Finalmente el circuito integrado genera la imagen que enfoca la cámara.

### **2.2.3.3. Computadora/Ordenador**

El computador utiliza algoritmos de control para almacenar, procesar y mostrar las imágenes capturadas por la cámara. Dichos algoritmos también pueden controlar el funcionamiento de actuadores externos mediante el envío de señales electrónicas. Aplicaciones de software que pueden ejecutarse ya sea de forma embebida en una cámara inteligente o de manera externa en una unidad de procesamiento, en la que se designan parámetros máximos y mínimos de selección o rechazo. (Egomexico, s.f.)

### **2.2.4. Procesamiento/reconocimiento de imágenes**

El procesamiento de imágenes se lo desarrolla mediante un computador, en donde “la *imagen real* pasa por una serie de transformaciones que van desde la adquisición de la imagen hasta su visualización” (Passariello & Mora, 1995). El objetivo del procesamiento de la imagen es mejorar el aspecto de los objetos que se quieran estudiar. Este procesamiento se lo puede realizar de forma análoga por métodos ópticos o de manera digital con una computadora como se lo puede ver en la Figura 2.3.

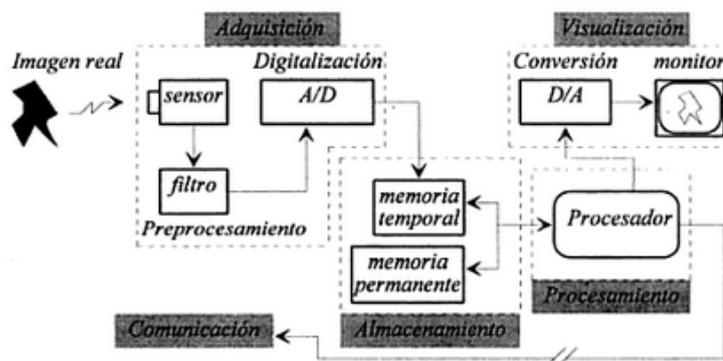


Figura 2.3 Configuración básica de un sistema de procesamiento digital de imágenes.

(Fuente: (Passariello & Mora, 1995)).

La necesidad de realizar un procesamiento digital parte de la complejidad y variabilidad de las imágenes a analizar. La problemática radica en tener una imagen 2D para un evento en 3D (ver Figura 2.4). Adicionalmente se tiene cambios susceptibles a las imágenes como la variación de iluminación, cambios de escala, deformaciones, movimiento o pérdida de información.

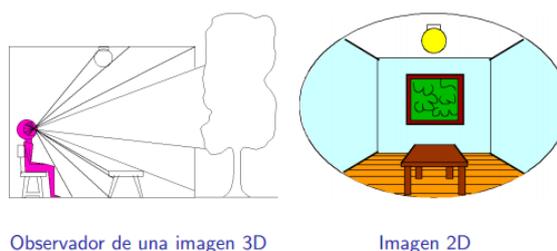


Figura 2.4 Captura de un evento en 3D con una imagen 2D.

(Fuente: (Szeliski, 2010)).

Por lo que el objetivo es tener una imagen adecuada para realizar un análisis más profundo en función de las necesidades de la aplicación. Ejemplos de tales operaciones incluyen la corrección de la exposición y el equilibrio de color, la reducción de ruido de la imagen, aumentar la nitidez o extender la imagen girándolo (Ver Figura 2.5).

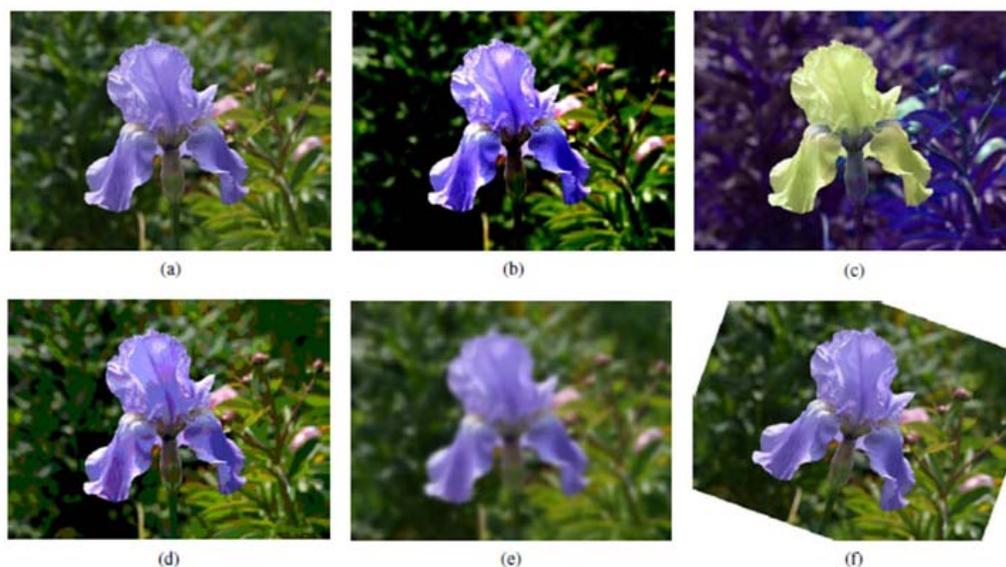


Figura 2.5 Procesamiento de imágenes comunes: (a) imagen original, (b) aumento de contraste, (c) cambio de tono, (d) "posterized" (colores cuantificados), (e) borrosa, (f) girada.  
(Fuente: (Szeliski, 2010)).

La utilidad del procesamiento de imágenes abarca muchos campos, entre ellos el campo médico en el que se usa la imagen capturada para futuros diagnósticos o tratamientos. Estos sistemas se aplican actualmente en diversos procesos en donde la automatización de tareas sirve para la inspección humana. (Quilmes, 2005)

### 2.2.5. Etapas para el procesamiento de imágenes

Las etapas para el procesamiento de imágenes se pueden ver en la Tabla 2-1.

<b>Etapa</b>	<b>Descripción</b>
Captura	Etapa donde se tiene las propiedades de la imagen según el tipo de cámara que realizó la captura.
Pre-procesamiento	Etapa donde se reduce el entorno para que el sistema solo se centre en el objeto de estudio.
Segmentación	Etapa donde se reconoce y extrae los objetos de la imagen
Extracción de características	Etapa donde se obtiene las características más relevantes del objeto a ser analizado.
Identificación de objetos	Etapa donde al objeto se los identifica según sus características.

Tabla 2-1 Etapas de Procesamiento de imágenes.

(Fuente: Propia).

### **2.2.6. Reconocimientos de imágenes con patrones**

El poder determinar las características de un objeto para clasificarlas para su análisis es un campo muy abierto a la investigación. Para procesar la información se necesita de un sistema inteligente.

No hay que confundir que el reconocimiento de patrones “trata la detección o clasificación automática de objetos, mientras que el análisis de imágenes es el proceso de descubrir, identificar y entender patrones que son relevantes para desarrollar una tarea con imágenes” (Lerma Garcia, 2002).

Entre algunas aplicaciones de identificación de patrones se puede citar las siguientes: (Beekman, 1999)

- Identificación de rostros
- Identificación de huellas dactilares
- Reconocimientos de escritura
- Análisis de datos científicos
- Reconocimientos de patrones en la biomecánica
- Reconocimiento automático y sistemas expertos

### 2.3. Software utilizado en visión artificial

Las técnicas para realizar procesamiento y análisis de imágenes con visión artificial son relativamente recientes. En la actualidad se pueden desarrollar sistemas de visión artificial en tiempo real y realizar gran cantidad de procesos en tiempos suficientemente cortos como para resolver aplicaciones de cualquier entorno. Esta evolución de hardware ha hecho que se creen librerías de visión en entornos estándares. (VISIÓN ARTIFICIAL-INFAIMON S.L, 2013)

National Instruments es un proveedor de herramientas tanto de hardware y software para visión artificial (National Instruments, 2013). Dicha tecnología se ha ocupado en laboratorios de la universidad y se ha escogido como implementación tecnológica dada su efectividad en el procesamiento de imágenes y su fácil entrenamiento en el uso de diferentes módulos de visión.

El asistente muestra un entorno de procesamiento de imágenes y de prototipado de aplicaciones que genera automáticamente diagramas de labview listos para su ejecución. (interempresas, 2013)

Alguna de estas herramientas que proporciona NI son:

- NI-DAQmx (Driver).
- Measurement and Automation Explorer
- Labview

### 2.3.1. Max – Measurement and Automation Explorer

Measurement & Automation Explorer permite el acceso a dispositivos de National Instruments. En la Figura 2.6 muestra la pantalla de inicio de la aplicación.



Figura 2.6 Pantalla de Inicio – MAX (Labview).  
(Fuente: Propia).

El programa permite:

- Configurar tanto el hardware y software de National Instrument
- Crear y editar instrumentos virtuales, interfaces, etc.
- Ver dispositivos e instrumentos conectados a su sistema
- Permite actualizar el software de National Instruments

Labview instala MAX para establecer todos los dispositivos y parámetros de configuración de canales de dispositivo dentro del sistema. MAX lee la información de los registros del Administrador de dispositivos en el Registro de Windows y asigna un número de dispositivo lógico para cada dispositivo DAQ. (Hans-Petter, 2013)

### 2.3.2. Labview

Labview, acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, es un lenguaje y a la vez un entorno de programación gráfica usado por ingenieros e investigadores para desarrollar aplicaciones de medida, pruebas y control de una forma rápida y sencilla.

Sus principales usos se los encuentra en:

- Adquisición de datos
- Control de instrumentos
- Automatización Industrial
- Tratamiento de Imágenes (IMAQ VISION).
- Control de Movimiento

Además es un lenguaje Gráfico (lenguaje g) y su programación es intuitiva lo que permite tener un rápido desarrollo del programa a implementar en un único entorno. Este lenguaje permite usar iconos que representan diferentes funcionalidades ligados entre sí por medio de cables que representan el flujo de datos que existe. (Lajara Vizcaino & Pelegrí Sebastián, 2007)

Los programas en labview se guardan en ficheros llamados VIs que significa instrumento virtual. Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente y creados y modificados por las paletas que el software ofrece para el desarrollo de una aplicación mediante una

interfaz, es por eso que Labview consta de dos paneles principales llamados panel frontal y panel de código. (Lajara Vizcaino & Pelegrí Sebastiá, 2007)

El **panel frontal** es aquel panel en donde se diseña la interfaz de usuario y se ubican los controles e indicadores en la pantalla que se va a usar. Se trata de la interfaz gráfica del VI. En este panel se encuentran elementos de control e indicadores, los mismos que ayudan a introducir datos y mostrar resultados producidos respectivamente.

El **panel de código** es aquel donde se realiza la programación por medio de diagrama de bloques en donde se utilizan librerías dinámicas, se colocan iconos y se interconectan para cumplir con los requerimientos de la aplicación. Este panel constituye el código fuente del VI, se construye conectando distintos objetos entre sí, cada conexión según el tipo de datos tiene un color diferente.

Las **paletas de Labview** proporcionan las herramientas que se requieren para crear y modificar tanto el panel frontal o el diagrama de bloques y se dividen en tres grupos:

- Paleta de herramientas (Tools palette)
- Paleta de Controles (Controls vpalette)
- Paleta de funciones (funtions palette)

Labview ofrece un módulo *real time* para desarrollar sistemas de visión artificial. El Módulo Labview NI Vision Development es para científicos,

ingenieros y técnicos que desarrollan aplicaciones de visión artificial y de imágenes científicas en Labview. Es una extensa biblioteca con cientos de algoritmos de procesamiento de imágenes y funciones de visión artificial para mejorar imágenes, verificar presencia, ubicar características, identificar objetos y medir partes.

Incluye IMAQ Vision, una biblioteca de poderosas funciones para procesamiento de visión y el Vision Assistant un entorno interactivo para desarrolladores que necesitan generar rápidamente prototipos para aplicaciones o que necesitan inspección fuera de línea.

De la página oficial de Labview las características del módulo son (National Instrument, 2013):

- Conjunto extenso de herramientas de software para ubicar, contabilizar, medir, identificar y clasificar objetos
- Compatibilidad de origen para LabVIEW, C, C++, C# y Visual Basic .NET
- Habilidad para crear pantallas HMI interactivas y tomar decisiones complejas basadas en resultados
- Realizar E/S e interfaz
- NI Vision Assistant para generación de códigos y prototipos.

También puede aprovechar los complementos y juegos de herramientas que suplementan el entorno de LabVIEW para integrar tareas, incluyendo adquisición de datos, control de movimiento y robótica, en la misma aplicación. (National Instrument, 2013).

Para la realización del proyecto se ha utilizado este software con la versión para estudiantes dado por la universidad.

### a. Vision Acquisition

El Software Vision Acquisition es un software controlador para adquirir, visualizar, registrar y monitorear imágenes desde varios tipos de cámaras. Para poder capturar imágenes con Labview con una webcam, se debe instalar el controlador mencionado anteriormente IMAQdx, permitiendo comunicar cualquier webcam en formatos como firewire, usb, Ethernet, etc. (Reyes, 2011)

Una de las funciones de IMAQ consiste en poder identificar la posición de elementos físicos de diferentes formas sobre el plano de coordenadas de la pantalla, lo que resulta ventajoso en el proyecto ya que permitirá obtener coordenadas de movimiento de objetos en el tiempo, mejorando la velocidad de cálculo, posición, aceleración, entre otras.

### b. Vision Assitant

Este asistente permitirá trabajar con funciones de procesamiento que se le da a la imagen para que pueda ser procesada. Los grupos están representados en la barra de herramientas como se puede ver en la

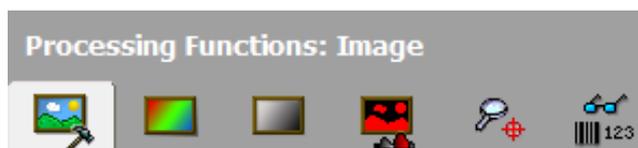


Figura 2.7 Funciones de procesamiento de imágenes-Labview.  
(Fuente: Propia)

Las características de cada grupo de funciones se detallan en la Tabla 2-2.

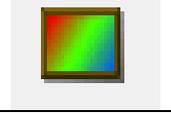
<p><b>Image</b></p> 	<p>Esta paleta de funciones permite analizar el contenido de la imagen para obtener información específica. También contiene funciones para modificar la geometría de la imagen corregirla y calibrarla.</p>
<p><b>Color</b></p> 	<p>Esta paleta de funciones permite analizar las imágenes en color. Se utiliza para eliminar uno de los planos de color.</p>
<p><b>Escala de grises</b></p> 	<p>Esta paleta de funciones permite analizar a la imagen en escala de grises (utiliza filtros matemáticos, regula los píxeles dentro de un rango y devuelve una imagen binaria como un resultado).</p>
<p><b>Binario</b></p> 	<p>Esta paleta de funciones permite analizar a la imagen en escala de grises (invierte las partes Verdadero y falso de una imagen binaria).</p>
<p><b>Vision Artificial</b></p> 	<p>Esta paleta de funciones permite llevar a cabo tareas de inspección de visión artificial como la detección de la presencia o ausencia de parte en una imagen, medición de piezas y localización de objetos dentro de ella.</p>
<p><b>Identificación</b></p> 	<p>Esta paleta de funciones permite llevar a cabo pasos de inspección visual para leer y verificar caracteres impresos, clasificar objetos binarios y leer códigos de barras 1D y 2D.</p>

Tabla 2-2 Funciones para el procesamiento de imágenes - Vision Assistant (Labview)  
(Fuente: Propia).

#### 2.4. Hardware utilizado en visión artificial

Las tarjetas DAQs son una de las principales herramientas en la adquisición y generación de señales eléctricas a través de tarjetas electrónicas de NI. Las tarjetas DAQ no operan de forma independiente sino que necesitan de un ordenador para controlarlas. Las hay internas que usan como interfaces más habituales OCI, PXI o PCI Express Y externas como USB o RS-232. (Lajara Vizcaino & Pelegrí Sebastián, 2007)

Algunas características de las DAQ son:

- Adquisición y generación de señales analógicas
- Adquisición y generación de señales digitales
- Contadores y temporizadores
- Auto calibración, sensores, etc.

#### 2.4.1. Tarjeta de adquisición DAQ - USB 6009

La tarjeta de adquisición es una interface de comunicación entre el puerto y las mediciones del mundo real. Para el objetivo del proyecto se eligió utilizar el dispositivo de adquisición de datos NI-6009. Un ejemplo de este dispositivo se ve en la Figura 2.8.



Figura 2.8 DAQ NI-6008/6009.  
(Fuente: (DAQ NI USB-6008 / 6009, s.f.)).

La tarjeta tiene las siguientes especificaciones:

- 8 entradas análogas
- 2 salidas análogas
- 12 entradas/salidas digitales
- Contador de 32 bits con conexión USB
- NI-DAQmx driver software
- Compatible con Labview y Measurement Studio for Visual Studio.net

La siguiente tabla describe las señales de entrada y salida de la tarjeta NI 6008. Estos mismos puertos se los puede identificar en el **Anexo E**.

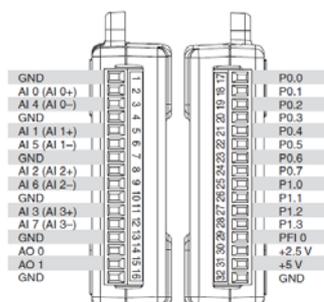


Figura 2.9 Pines/Canales de NI USB-6008/6009-Datasheet.  
(Fuente: (DAQ NI USB-6008 / 6009, s.f.)).

#### 2.4.2. Sistema de control Fuzzy en labview

La lógica difusa es un método de control que toma las decisiones basadas en reglas que limitan las características de funcionamiento en un sistema de control. Este control se asocia en un sistema de variables que se relacionan en la lógica difusa utilizando reglas ya definidas para controlar un sistema sobre la base de valores actuales de las variables de entrada. Ver Figura 2.10.

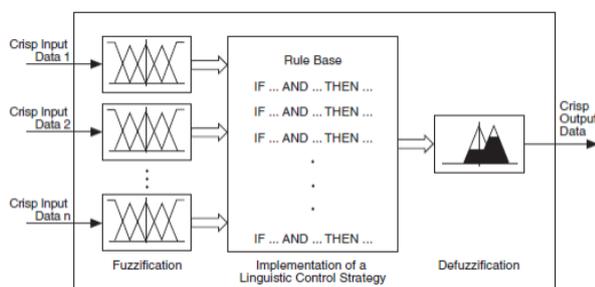


Figura 2.10 Lógica Difusa.  
(Fuente: (College, s.f.)).

Labview permite desarrollar las reglas del controlador Fuzzy por medio de Fuzzy System Designer, el cual permite diseñar, controlar y modificar los sistemas difusos mediante programación.

Como se puede ver en la Figura 2.11 permite ingresar tanto variables de entrada como variables de salida y adicional a esto permite crear y configurar las reglas según el funcionamiento deseado.

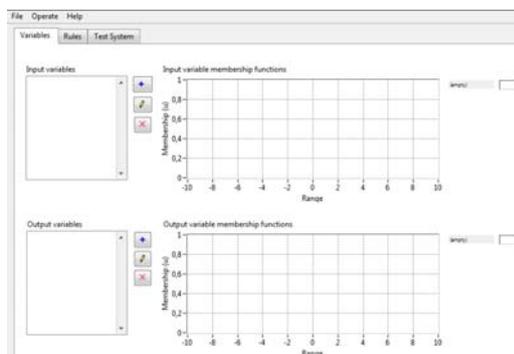


Figura 2.11 Fuzzy Control Design-Laview.  
(Fuente: Propia).

#### 2.4.2.1. Funciones de pertenencia

Las funciones de pertenencia de un conjunto indica el grado en que cada elemento de un universo dado, pertenece a un conjunto. Estas funciones son una forma de representar gráficamente un conjunto borroso sobre un universo (ver Figura 2.12). (Olmo Castillo, s.f.)

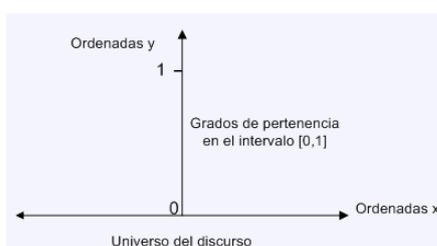


Figura 2.12 Universo-Lógica Difusa.  
(Fuente: (Olmo Castillo, s.f.)).

### 2.4.2.2. Función Triangular

Definida mediante el límite inferior  $a$ , el superior  $b$  y el valor modal  $m$ , tal que  $a < m < b$ . La función no tiene porqué ser simétrica. Ver Figura 2.13.

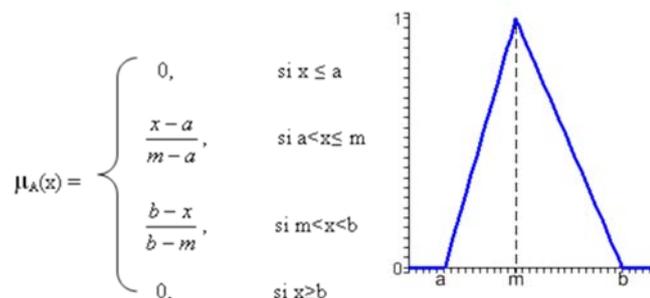


Figura 2.13 Parámetros de la función Triangular.  
(Fuente: (Olmo Castillo, s.f.)).

### 2.4.2.3. Función Trapezoide

Definida por sus límites inferior  $a$ , superior  $d$ , y los límites de soporte inferior  $b$  y superior  $c$ , tal que  $a < b < c < d$ .

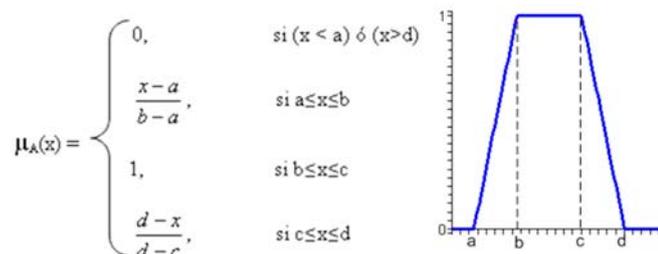


Figura 2.14 Parámetros de la función trapezoide.  
(Fuente: (Olmo Castillo, s.f.)).

### 2.4.2.4. Función Pseudo-Exponencial

Definida por el valor medio  $m$  y el parámetro  $k > 1$ . Cuanto mayor es el valor de  $k$ , el crecimiento es más rápido y la campana es más estrecha.

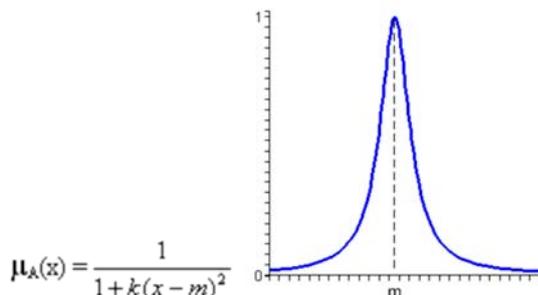


Figura 2.15 Parámetros de la función pseudo-exponencial.  
(Fuente: (Olmo Castillo, s.f.)).

## 2.5. Sistemas de desplazamiento lineal mecánicos

### 2.5.1. Mecanismos

En su definición más sencilla un mecanismo es un sistema de elementos que transforma un movimiento motriz de entrada en un movimiento resultante determinado. En esta definición no se especifica magnitudes, pero para diferenciarlo de una máquina se puntualiza que *los mecanismos* desarrollan fuerzas muy bajas y transmiten poca potencia. Por otro lado, *las máquinas*, que constan de varios mecanismos, si pueden producir y transmitir fuerzas significativas. (Norton, 2005)

Puesto que al diseñar el sistema mecánico de este proyecto no se trabaja con fuerzas significantes, ni una transmisión de potencia, tan solo se refiere a los sistemas mecánicos como mecanismos.

Profundizando en la clasificación de los mecanismos adicionalmente se tiene que la transformación de un movimiento además de la **transmisión** de movimiento. Se debe tener en cuenta que cuando se habla de movimientos se comprende principalmente cuatro tipos (Ver Figura 2.16).

- Circular o rotatorio: el desplazamiento de un cuerpo siguiendo una trayectoria circular,
- Lineal continuo: desplazamiento en una línea recta,
- Lineal Alternativo: movimiento de ida y vuelta en una línea recta,
- Oscilante: desplazamiento de un cuerpo hacia delante y hacia atrás según una trayectoria curva, que describe un arco de circunferencia.

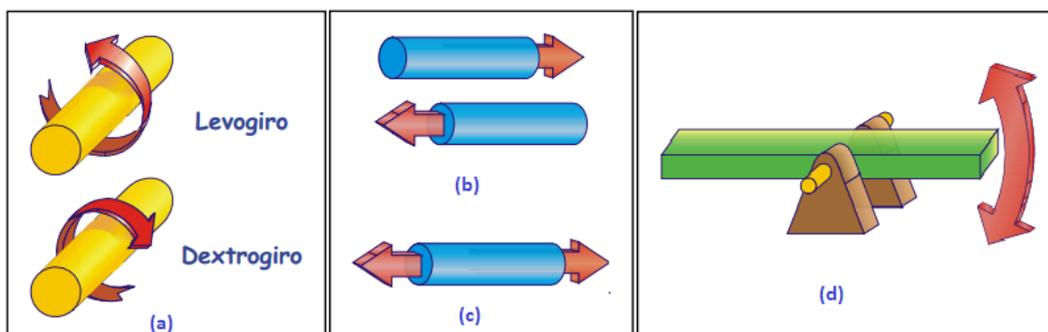


Figura 2.16 Tipos de movimientos: a. Circular o rotatorio, b. Lineal continuo y c. alternativo, d. Oscilante.

(Fuente: (Norton, 2005)).

La transformación de un movimiento a otro sucede en función de los 4 tipos de movimientos antes descritos. La siguiente Tabla 2-3 resume las transformaciones más utilizadas en sistemas mecánicos:

MOV. DE ENTRADA	MOV. DE SALIDA	MECANISMO UTILIZADO
Giratorio o Circular	Giratorio o circular	Ruedas de fricción.
		Transmisión por correa
		Transmisión por cadena
		Rueda dentada – Linterna
		Engranajes
		Engranaje y Tornillo sin fin
	Oscilante	Excéntrica – biela – palanca
		Leva – palanca
	Lineal alternativo	Biela – manivela
		Leva – émbolo
Lineal continuo	Rodillo – cinta	
	Cremallera – piñón	
	Tornillo – tuerca	
Oscilante	Giratorio	Palanca – biela – manivela
Lineal continuo	Giratorio	Cremallera – piñón
		Aparejos de Poleas
		Rueda
Lineal alternado	Giratorio continuo	Biela – manivela
	Lineal alternado	Palancas
	Oscilante	

Tabla 2-3. Transformación de Movimiento con mecanismos relacionados.

(Fuente: (Norton, 2005)).

Analizando las necesidades del diseño mecánico del proyecto se definen los siguientes puntos obligatorios a profundizar dentro de este capítulo:

El desplazamiento horizontal de la cámara es muy amplio (aproximadamente 2 metros) y su fuente de movimiento será un servomotor. Para esto es necesario un mecanismo que transforme la rotación del motor en un desplazamiento lineal amplio. Existen tres opciones aplicables al proyecto: Rodillo – cinta, cremallera – piñón y tornillo – tuerca.

El desplazamiento en dirección perpendicular a la marcha del paciente también se realizará con el mismo objetivo de transformar el movimiento rotacional del eje de un servomotor en el desplazamiento lineal de la cámara. Las opciones descritas en el punto anterior también se acomodan a estas especificaciones de funcionamiento.

Estos son los dos sistemas mecánicos controlados automáticamente por la computadora. La modificación de la altura de la estructura de este proyecto será manual y se tienen otras consideraciones a tomar que se mencionarán posteriormente.

### **2.5.2. Transmisión por Engranajes**

Los engranajes son ruedas dentadas que encajan entre sí, de tal manera que una rueda motriz transmite el movimiento circular a las siguientes. Son ampliamente conocidos por ser el principal mecanismo para transmitir, aumentar o disminuir la potencia de un eje a otro, manteniendo una razón definida entre las velocidades rotacionales de los ejes, además de eliminar el deslizamiento que si tienen las ruedas de transmisión. Justamente ésta

característica define su diseño. La ley general de engranajes determina que *la relación de velocidad angular entre los engranes de un juego de engranes permanece constante mientras permanecen engranados.* (Norton, 2005)

La relación de velocidad angular ( $m_v$ ) es igual a la relación del radio del engrane de entrada con la del engrane de salida.

$$m_v = \pm \frac{r_{ent}}{r_{sal}}$$

Ecuación 2-1

Los radios en esta ecuación son de los cilindros rodantes a los que se agregan los dientes para formar el engrane, tal como se mencionó en la primera definición. El signo positivo o negativo corresponde a los juegos de cilindros internos o externos como está ilustrado en la Figura 2.17:

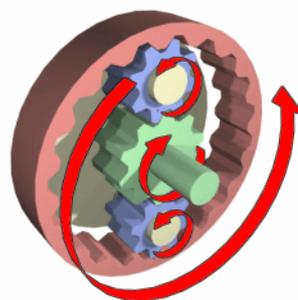


Figura 2.17 Ilustración de un sistema con engranajes internos y externos.  
(Fuente: (Norton, 2005)).

Cualquier variación de la relación se manifestará como una oscilación en la velocidad y par de torsión de salida, incluso si la entrada es constante con el tiempo.

Imaginando al engranaje como un cilindro dentado, se puede comprender mejor ciertas partes que los conforman. Mirando a estos

cilindros desde un punto de vista lateral, la superficie del cilindro comprende el *círculo de paso* y su diámetro es el *diámetro de paso* respectivamente. El punto de contacto entre los cilindros siempre se ubica en la línea de que une los centros de los engranajes y se lo llama el *punto de paso*. La Figura 2.18 muestra esta nomenclatura:

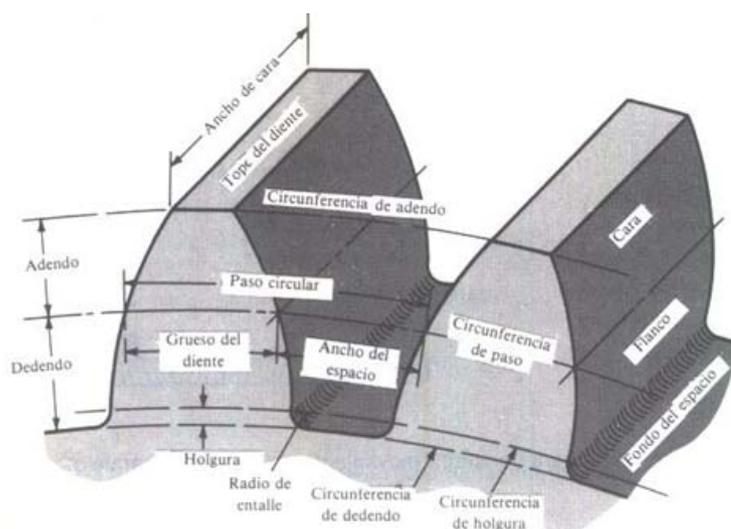


Figura 2.18 Nomenclatura de diseño de un engranaje.  
(Fuente: (Norton, 2005)).

En cuanto a los tipos de dientes se tiene 2 principales: dientes rectos y helicoidales. En función de los dientes se tiene engranajes rectos y engranajes helicoidales.

Los engranajes rectos son más fáciles de manufacturar, lo que implica una mayor precisión en su elaboración. Son buenos para transmitir potencia por tener un diente más robusto. Además, son insensibles a la deficiencia en el montaje en lo que respecta a la distancia entre los ejes.

Los engranajes helicoidales, a su vez, trabajan de mejor forma a velocidades altas, eliminando una gran parte del ruido de transmisión. Son

mejores al transmitir mayor potencia aunque su eficiencia es ligeramente más baja que la de engranajes de dientes rectos.

### 2.5.3. Nomenclatura de Engranajes

La Figura 2.19 muestra dos involutas sobre las cuales se generan dos engranes que se encuentran en contacto. De esta imagen se obtiene importante nomenclatura en el diseño de un engranaje.

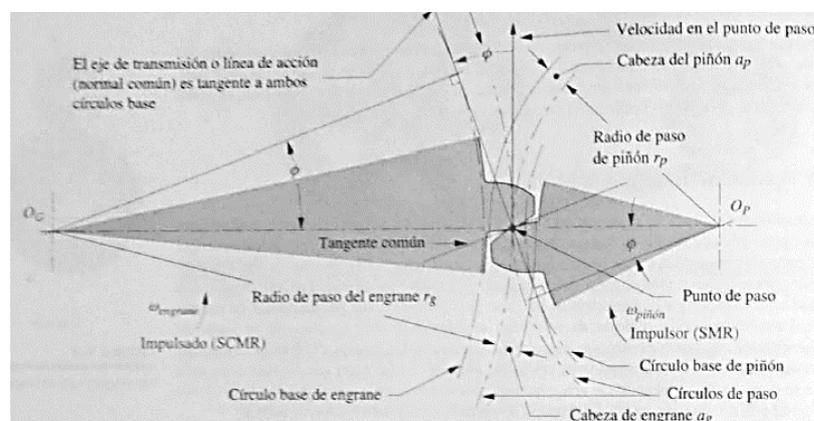


Figura 2.19 Geometría del contacto y ángulo de presión de dientes de engrane de involuta.  
(Fuente: (Norton, 2005)).

Por debajo de los dientes del engranaje se tiene la *circunferencia base* o *círculo base*. Sobre este círculo se genera la cuerda involuta que dibuja a los dientes tal como se vio en la Figura 2.18

Sobre el mismo centro se tiene otro círculo más grande llamado círculo de paso o circunferencia de paso. Es muy importante tener en cuenta esta variable, ya que sobre esta se diseñan los engranajes comúnmente. Otra denominación muy común es la *circunferencia primitiva*. Hay que recordar que a esta circunferencia se la llamó como la circunferencia que generan los

cilindros rodantes sin tener los dientes añadidos. Si se ve la Figura 2.17 y Figura 2.18, se puede notar que los dientes del engrane se generan tanto por debajo como por arriba de los cilindros rodantes originales (circunferencia de paso).

En función de la circunferencia de paso dividimos al diente en dos partes: la parte sobre la circunferencia se conoce como la *Cabeza o Addendum* y la parte inferior *Raíz o Dedendum*. Sobre la cabeza se forma una circunferencia adicional llamada *círculo de cabeza o circunferencia de cabeza*.

La suma del Addendum y dedendum da por resultado la altura total del diente. El dedendum es un poco más grande para dar más holgura a la punta del diente cuando tope con otro engranaje. En adición a la altura del diente, se tiene el *ancho de la cara* que corresponde al ancho del engrane medido a lo largo de su eje.

En función de estos nuevos términos se reescribe la ley fundamental de engranaje de la siguiente manera: “*la normal común a los perfiles de los dientes, en todos los puntos de contacto cuando están engranados, siempre debe pasar por un punto fijo sobre la línea de centros llamado punto de paso.*” (Norton, 2005)

Otro término a tener en cuenta en el diseño de un engranaje es el *ángulo de presión* ( $\varphi$ ). Este ángulo se forma por la línea del eje de transmisión (normal común) y la dirección de la velocidad en el punto primitivo o de contacto (punto de paso en la Figura 2.20).

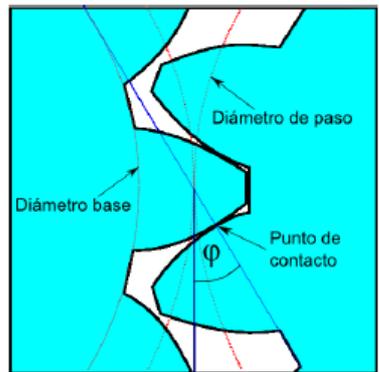


Figura 2.20 Ángulo de presión  
(Fuente: (Norton, 2005)).

Los valores de los ángulos de presión de los engranajes esta estandarizado y presentan las siguientes opciones: 14.5°, 20° y 25°. La segunda opción es la más utilizada, mientras que 14.5° es considerado obsoleto.

En la figura 4 se puede ver también el **paso circular** como parte de la nomenclatura de un engranaje. El paso circular es “*la longitud de arco a lo largo de la circunferencia del círculo de paso de un punto de un diente al mismo punto en el siguiente diente*”. (Norton, 2005)

Esta medida es fundamental para definir el tamaño del diente. En función de esta se puede calcular o determinar el resto de parámetros. Matemáticamente, su ecuación relaciona el diámetro de paso ( $d_p$ ) y el número de dientes ( $N$ ) de la siguiente manera:

$$p_c = \frac{\pi \cdot d_p}{N}$$

Ecuación 2-2

Pero la forma más conveniente para definir los parámetros de un engranaje es utilizar el **módulo** del engranaje. La ecuación correspondiente es la siguiente:

$$m = \frac{d_p}{N}$$

Ecuación 2-3

Las unidades del diámetro están dadas en milímetros por lo que el módulo también se dan en esta unidad. Existen tamaños estandarizados para la fabricación de engranajes según su módulo. Los valores estándar son 1 , 1.25, 1.5, 2 2.5, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 32, 40 y 50.

Ahora, la relación de velocidad ( $m_v$ ) (Ec. 1) se puede reescribir en función de los parámetros recién descritos de la siguiente manera:

$$m_v = \pm \frac{d_{ent}}{d_{sal}} = \pm \frac{N_{ent}}{N_{sal}}$$

Ecuación 2-4

A la relación de velocidad también se la conoce como **relación de transmisión** según diferentes autores.

#### 2.5.4. Diseño de Engranajes

En la sección 2.1.2 se mencionó que dos parámetros principales para diseñar un engranaje son el módulo ( $m$ ) y el número de dientes ( $N$ ) para determinar el paso circular ( $p_c$ ).

Por lo general, el diseño empieza por la selección aleatoria del número de dientes del engranaje o la determinación del número de dientes según el

paso del engranaje. Ambos datos se puede calcular con la ecuación expuesta en la sección 2.1.2:

$$m = \frac{d_p}{N}$$

Ecuación 2-5

### 2.5.5. Transmisión por Correa

Este tipo de sistemas de transmisión, en su forma más básica, se conforma por dos ruedas - lisas o dentadas - y una correa - lisa o con dientes para encajar con la rueda dentada – de tal forma que el movimiento de una rueda motriz se transmita a la otra rueda por medio de la correa. La adición de dientes en este sistema elimina el problema de deslizamiento entre correa y polea lo que previene las variaciones en la relación de transmisión del sistema, que es uno de los principales problemas de las correas lisas.

Las transmisiones por medio de correas son denominadas de tipo flexible pues absorben un mínimo de vibraciones y choques.

#### 2.5.5.1. Relación de Transmisión

La relación de transmisión está dada en función del cociente entre la velocidad de la rueda seguidora y la de la rueda motriz. En función del tamaño de las ruedas se puede expresar la relación de transmisión con la siguiente ecuación:

$$i = \frac{d_{conducida}}{d_{conductora}} = \frac{V_{conducida}}{V_{conductora}}$$

Ecuación 2-6

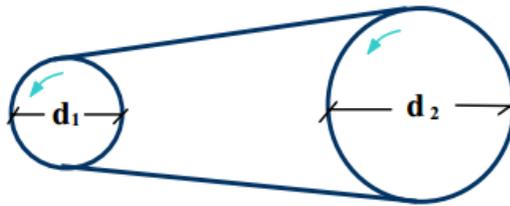


Figura 2.21 Relación de transmisión.  
(Fuente: (Andrés Porras S., 2001)).

De esta manera se tiene sistemas reductores de velocidad cuando la rueda conducida es más grande (más dientes) que la conductora y sistemas multiplicadores de velocidad cuando la rueda conducida es más pequeña.

#### 2.5.5.2. Características y tipos de correas

Las correas se clasifican en los siguientes tipos:

Correas planas: este tipo ya no se utiliza comúnmente, ha sido reemplazadas por las correas trapezoidales. Se utilizaban principalmente en transmisiones donde no se requerían grandes prestaciones, esto es, que no se transmiten grandes pares y la velocidad lineal sea baja en el sistema (< 5 m/s).

Correas trapezoidales o de sección en V: transmiten potencias más elevadas con velocidades más altas. Correas dentadas o síncronas: son las mejores para transmitir altas potencias. Presentan mayor flexibilidad, aunque en este caso se deben emplear poleas de diámetro pequeño. Con este tipo de correas se asegura la relación de transmisión.

Es importante detallar que la tensión permisible para las correas esta entre 125 y 250 kg/cm<sup>2</sup>. Además, en la práctica se recomienda que la velocidad lineal de funcionamiento sea menor a 30 m/s, pues las flexiones a

las que se somete la correa al pasar por las poleas actúan sobre la vida útil. A mayor velocidad, mayores serán las veces que la correa pase por las poleas. (Soriano, 2001)

### 2.5.5.3. Correas dentadas o síncronas

Las poleas dentadas garantizan una relación de transmisión constante al disminuir el riesgo de deslizamiento sobre la polea. La incorporación del dentado a la correa le da mayor flexibilidad longitudinal. Esta característica permite utilizar diámetros pequeños en las poleas (Figura 2.22).

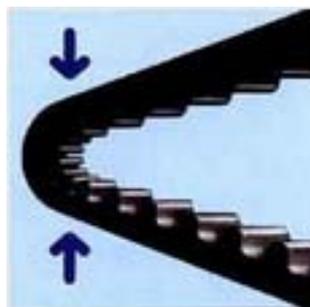


Figura 2.22 Elevada flexibilidad en correas dentadas.  
(Fuente: (Hermenegildo, s.f.)).

Las correas se dividen en tres partes principales. Estas partes se las puede ver en la Figura 2.23

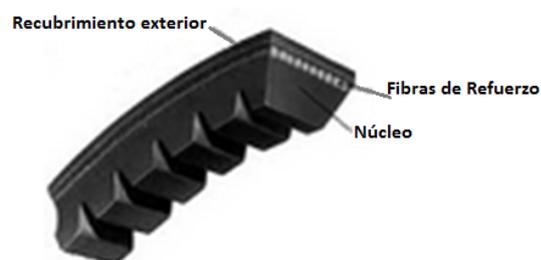


Figura 2.23 Elementos de una correa dentada.  
(Fuente: (Hermenegildo, s.f.)).

#### 2.5.5.4. Selección y Estandarización de Correas

Las correas dentadas están normalizadas según la forma de los dientes y el paso entre cada diente. En la siguiente Figura 2.24 y en la Tabla 2-4 se brindan algunas características geométricas de las correas dentadas de perfil de flancos rectos según ISO 5296-1:1989:

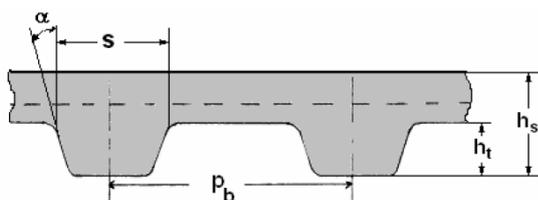


Figura 2.24 Dimensiones de una correa dentada.  
(Fuente: (González Rey & García Domínguez, 2010)).

Parámetro	Tipo de perfil				
	XL	L	H	XH	XXH
Paso $p_b$ (mm)	5,080	9,525	12,700	22,225	31,750
Ángulo de flanco $\alpha$	25°	20°	20°	20°	20°
Espesor del diente $s$ (mm)	2,57	4,65	6,12	12,57	19,05
Altura del diente $h_t$ (mm)	1,27	1,91	2,29	6,35	9,53
Altura total $h_s$ (mm)	2,3	3,6	4,3	11,2	15,7
Número mínimo recomendado de dientes en la polea	12 – 10	16 – 12	20 – 17	26 – 22	26 - 22

Tabla 2-4. Características geométricas según el tipo de correa.  
(Fuente: (González Rey & García Domínguez, 2010)).

La norma ISO agrupa a las correas en los tipos XL, L, H, XH, y XXH.

Fabricantes distintos proporcionan otras clases de correas. Para poder determinar qué tipo de correa es apropiado para cada aplicación se utiliza graficas de Potencia vs Velocidad que proporciona el fabricante de las correas. La Figura 2.25 presenta un ejemplo de estos gráficos:

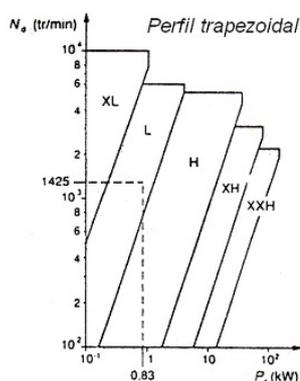


Figura 2.25 Gráfico de selección de tipo de bandas según velocidad y potencia aplicada.  
(Fuente: (Hermenegildo, s.f.)).

En función de la velocidad y la potencia transmitida por el mecanismo se puede determinar el tipo de correa necesaria. Para introducir un factor de seguridad a la selección de correas, por lo general se multiplica la potencia transmitida por un factor C determinado en función del tipo de trabajo que realiza el sistema mecánico. La Tabla 2-5 muestra un ejemplo de la selección de este factor:

Máquinas motrices	Motores eléctricos cd = 2 cn Motores térmicos multicilindros > 600 rpm			Motores eléctricos c maxi > 2 cn Monocilindro < 600 rpm		
	< 6 h/d	6 a 16 h/d	16 a 24 h/d	< 6 h/d	6 a 16 h/d	16 a 24 h/d
<i>Cargas uniformes ligeras:</i> Agitadores para líquidos, bombas y compresores centrífugos-ventiladores hasta 7,5 Kw Pequeños transportadores	1,0	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3
<i>Cargas uniformes medias:</i> Transportadores de cinta (arena, grano) Ventiladores superiores 7,5 Kw Generadores-alternadores, máquinas herramientas Maquinaria artes gráficas, prensas, cizallas, lavadoras, bombas rotativas.	1,1	1,2	1,3	1,2	1,3	1,4
<i>Cargas irregulares con sobrecargas:</i> Maquinaria para ladrillos y cerámica Elevadores con canchales. Compresores y bombas de pistones. Maquinaria papel. Pulverizadores. Maquinaria textil.	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6
<i>Cargas irregulares y sobrecargas importantes:</i> Molinos, machacadoras, laminadoras, calandras mezcladoras. Gruas, dragas.	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,8
Cargas muy irregulares y grandes sobrecargas.	2	2	2	2	2	2

Tabla 2-5 Factor de seguridad para selección de correas.  
(Fuente: (Hermenegildo, s.f.)).

### 2.5.5.5. Distancia entre ejes

La distancia entre ejes de las poleas suele estar establecida en la transmisión que debe calcularse. No obstante, puede que en algunos casos este dato no esté decidido, quedando a mejor criterio calcular esta distancia.

De acuerdo a la experiencia de las empresas fabricantes, y con el objetivo de mejorar el rendimiento de la transmisión, la distancia entre ejes de poleas mínima se puede obtener a partir de las siguientes expresiones:

$$E \geq \frac{(R + 1) \cdot d}{2} + d$$

Ecuación 2-7

### 2.5.5.6. Cálculo de la longitud de correa

La longitud primitiva de la correa ( $L_p$ ) de una transmisión se calcula directamente a partir de la siguiente ecuación:

$$L_p = 2E + \frac{\pi}{2}(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4E}$$

Ecuación 2-8

Donde E es la distancia entre ejes de poleas, d es el diámetro de la polea menor y D es el diámetro de la polea mayor.

La expresión anterior calcula el valor exacto para la longitud de la correa. No obstante, las casas comerciales fabrican una serie normalizada de longitudes primitivas nominales para cada sección de correa, que seguramente no coincidirán con la longitud calculada mediante la expresión anterior. Por ello, de esta lista habrá que elegir, para el tipo de correa que se trate, la longitud más próxima al valor calculado.

### 2.5.5.7. Poleas dentadas

Las poleas que se usan para transmisiones con correas se fabrican con distintos materiales como el hierro, acero, plástico y aleaciones ligeras.

Las poleas para correas planas se construyen con llanta (superficie de contacto correa-polea) plana o ligeramente abombada según se presenta en la figura siguiente. El objeto de esta conformación es el de estabilizar la correa evitando con ello que se salga por el lateral.

Las poleas para correas trapeziales son acanaladas y cuando son pequeñas se construyen de una sola pieza, en cambio para grandes transmisiones es frecuente usar varias poleas unidas mediante tornillos.

Las poleas para correas dentadas parecen engranajes de gran paso.

Para un funcionamiento continuado y sin problemas es muy importante que las aristas de los dientes se redondeen. La Figura 2.26 siguiente presenta un detalle de una polea dentada con su correa.

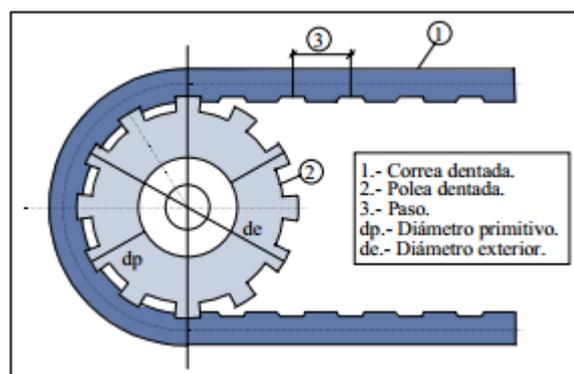


Figura 2.26 Geometría de una correa dentada sobre un piñón dentado.  
(Fuente: (Soriano, 2001)).

## **2.6. Motores de corriente continua y servomotores**

Los primeros pasos de los sistemas de potencia eléctrica se dieron en los años de 1890 en el continente americano. Inicialmente los sistemas de potencia AC fueron opacando a los sistemas DC, pero los motores DC continuaron siendo una importante fracción de la maquinaria comprada durante la década de los 60s, aunque durante estos los últimos 30 años haya decaído. (Chapman, 2000)

Entre los principales factores que permitieron la continuidad de los motores DC en el mercado y la industria resaltan los siguientes:

Los sistemas de potencia DC fueron – y son- muy comunes en los automóviles, los motores DC se aplicaban cuando se requerían amplias variaciones de velocidad, Antes de los variadores de velocidad AC, los motores DC no fueron igualados en aplicaciones de control de velocidad. Aunque no se tuviera fuente de potencia DC, los rectificadores de estado sólido y los circuitos recortadores se utilizaron para crear la potencia necesaria.

Justamente en función de la facilidad y precisión de control que existe sobre los motores DC y servomotores (también controlados por corriente continua) se decide utilizar este tipo de motor para los actuadores del proyecto en desarrollo.

### **2.6.1. Motores DC**

La Figura 2.27 muestra la máquina rotatoria DC más sencilla posible. Consiste en una sola espira de alambre que rota alrededor de un eje fijo. La

parte rotante de máquina se llama el **rotor** y la parte estacionaria se denomina el estator.

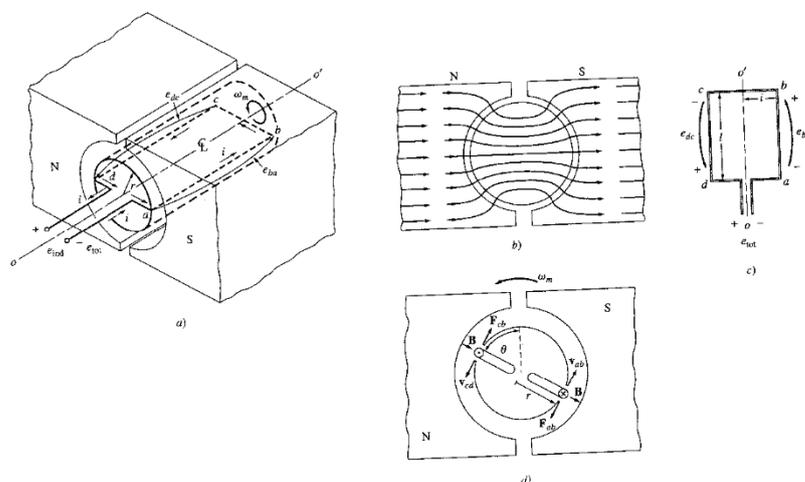


Figura 2.27 Lazo sencillo rotacional entre caras polares curvas. a) Vista en perspectiva; b) Vista de las líneas de campo; c) Vista superior; d) Vista frontal.

(Fuente: (Chen, 2011)).

Para que se produzca una fuerza sobre el rotor es necesario que se cumplan dos puntos principales sobre éste:

Debe estar conduciendo electricidad y debe encontrarse dentro de un campo magnético. El campo magnético es suministrado por los polos norte y sur magnéticos mostrados sobre el estator de la figura b) de la Figura 2.27 y la electricidad la proporciona un fuente de voltaje.

La fuerza que se genera sobre el conductor tiene una dirección perpendicular a la del campo magnético. Matemáticamente esta fuerza está representada por la siguiente ecuación:

$$F = B \cdot i \cdot l$$

Ecuación 2-9

Donde  $B$  es la densidad del campo magnético,  $l$  es la longitud del conductor e  $i$  es el valor de la corriente que pasa por el conductor.

Como se explicó previamente, la dirección de esta fuerza será perpendicular al campo formado por la corriente y la dirección del campo magnético. La siguiente figura lo demuestra:

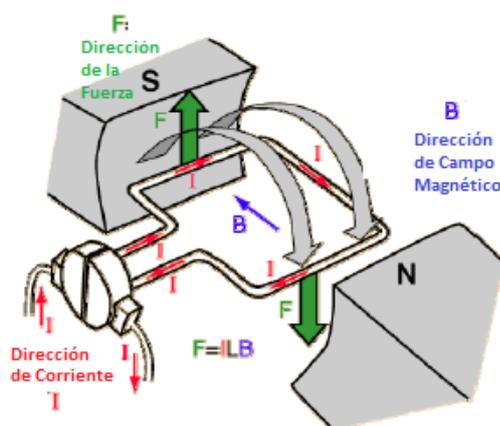


Figura 2.28 Fuerza producida en un motor DC.  
(Fuente: (Chen, 2011)).

En un motor DC real el rotor está diseñado con un bobinado complejo para garantizar la fuerza de giro. Mientras más grande sea la corriente del conductor (rotor) o más grande sea el campo magnético, mayor será el torque generado y la velocidad de giro.

La dirección del giro depende de la polaridad de la tensión. Si bien es posible controlar la dirección de estos con una configuración de transistores (Puente H) el problema se presenta cuando se desea controlar su velocidad. Como generalmente no es posible entregarle un voltaje de tensión variable, se recurre a una técnica digital basada en modulación por ancho de pulsos o PWM por su sigla en inglés.

**Ventajas:**

- Dirección de giro reversible cambiando polaridad de voltaje de alimentación.
- Control de velocidad sencillo.
- Se puede controlar la aceleración y desaceleración para obtener el tiempo deseado de respuesta.
- Se puede controlar el torque o fuerza al variar la corriente aplicada al motor.
- Se puede obtener frenado dinámico al invertir la polaridad de la corriente mientras gira el motor.
- Estos motores tienen respuesta rápida, acelerando con rapidez cuando cambia el voltaje, porque el diámetro de su rotor es pequeño, y les permite tener una alta relación de par torsional a inercia.

**2.6.2. Servomotores**

Los servomotores son dispositivos que constan de un motor DC cuyo desplazamiento puede ser controlado en función de una señal de posición. También llamados comúnmente “**servos**” estos dispositivos están conformados por los siguientes componentes principalmente (Ver Figura 2.29):

- Motor DC
- Caja reductora de engranajes
- Potenciómetro (Resistencia variable)

- Circuito electrónico de control
- Carcasa



Figura 2.29 Componentes de un Servomotor.  
(Fuente: (Candelas & Corrales, 2007)).

Su rango típico de movimiento de es  $90^\circ$  o  $180^\circ$ . Si las necesidades e movimiento son más amplias, se puede hacer arreglos al sistemas de engranajes para ampliar el movimiento.

#### **Ventajas de uso:**

- Son capaces de entregar gran precisión en su control.
- Son especiales para aplicaciones donde se requiera un movimiento de mucha fuerza con precisión en su posicionamiento.
- Los motores son pequeños y tienen el circuito de control ya incorporado.

#### **2.6.2.1. Principio de Funcionamiento**

Los servomotores disponen de tres en su salida (Figura 2.30): dos cables de alimentación (positivo y negativo) que suministran un voltaje 4.8-6V, dependiendo del modelo, y un cable de control que indica la posición

deseada al circuito de control mediante señales PWM (Pulse Width Modulation).

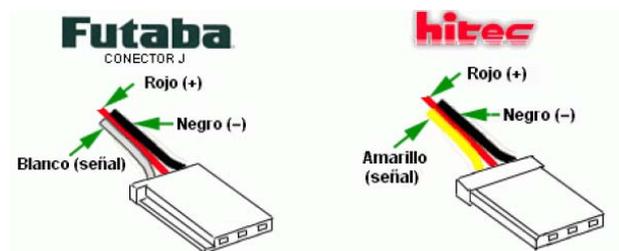


Figura 2.30 Colores de los cables de los principales fabricantes de servos.  
(Fuente: (Fabricantes servos, s.f.).)

Las señales PWM utilizadas para controlar los servos están formadas por pulsos positivos cuya duración es proporcional a la posición deseada del servo y que se repiten cada 20ms (50Hz). Todos los servos pueden funcionar correctamente en un rango de movimiento de 90°, que se corresponde con pulsos PWM comprendidos entre 0.9 y 2.1ms. Sin embargo, también existen servos que se pueden mover en un rango extendido de 180° y sus pulsos de control varían entre 0.5 y 2.5ms (Figura 2.31). Antes de utilizar un servo habrá que comprobar experimentalmente su rango de movimiento para no dañarlo. Para mantener fijo un servo en una posición habrá que enviar periódicamente el pulso correspondiente; ya que si no recibe señales, el eje del servo quedará libre y se podrá mover ejerciendo una leve presión. (Candelas & Corrales, 2007)

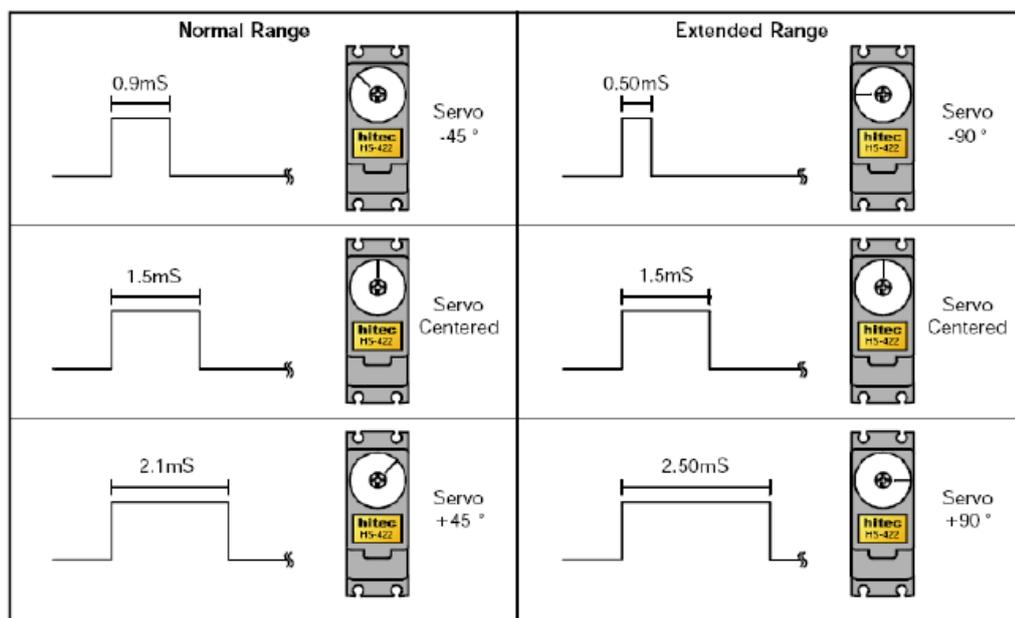


Figura 2.31 Pulso PWM para controla servos.  
(Fuente: (Andrés Porras S., 2001)).

### 2.6.2.2. Transformación de un servomotor en motor DC

Tal como se mencionó previamente, los servomotores poseen un circuito de control que trabaja con un potenciómetro para definir la posición del servo. Existe la posibilidad de convertir un servomotor en un motor DC justamente al eliminar los dispositivos de control de posición. Para realizar esta transformación se debe seguir los siguientes pasos:

- Abrir la caja del servomotor,
- Cortar o desoldar los cables que conectan el potenciómetro con el circuito de control,
- Cortar o desoldar los cables que energizan el circuito de control,
- Cortar o desoldar los cables que envían señales eléctricas desde el circuito al servomotor.

- Soldar los cables de energía del servomotor directamente con los puertos del motor interno.
- Finalmente se debe cortar el tope metálico que tiene el sevo en uno de sus engranes de la caja reductora.

Los pasos se resumen la siguiente secuencia de imágenes:



Figura 2.31. Transformación de un servomotor a motor DC.  
(Fuente: Propia).

### 2.6.3. Selección del motor eléctrico

#### 2.6.3.1. Determinación de la potencia requerida del motor

Para poder seleccionar el motor de corriente continua es necesario conocer la potencia mecánica  $P$  que se necesita para desplazar la cámara en el sistema. La potencia es un producto de la fuerza por la velocidad, teniendo en cuenta que la velocidad puede ser lineal o giratoria (Figura 2.32):

$$P = F \cdot V$$

Ecuación 2-10

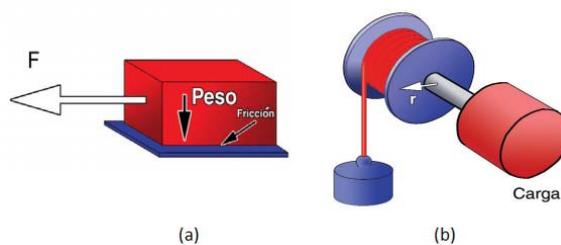


Figura 2.32 a) Potencia en cargas lineales y b) Potencia en cargas rotatorias.  
(Fuente: Propia).

Inicialmente se procede a determinar la fuerza necesaria para romper la inercia del objeto a desplazar. Esta fuerza dependerá de la fricción de desplazamiento y el peso del objeto en un sistema lineal.

En el caso de sistemas rotacionales se utiliza el torque necesario para mover el objeto. El torque es un producto de la fuerza por el radio de rotación.

$$T = F \cdot r$$

Ecuación 2-11

El producto de la inercia por la aceleración angular:

$$T = J \cdot \alpha$$

Ecuación 2-12

Normalmente la velocidad es fácil de establecer, debido a que se conoce la velocidad requerida de desplazamiento de la carga ya sea en m/s o rpm. Generalmente causa más dificultad establecer la fuerza requerida.

### 2.6.3.2. Determinación de la potencia requerida del motor por análisis gráfico

Este método permite determinar la potencia necesaria en un sistema analizando las diferentes condiciones de funcionamiento.

*Perfil de Velocidades:* Este gráfico contiene la evolución de la velocidad del sistema durante un ciclo de funcionamiento. Se puede hacer una tabla en la que se indiquen las posiciones en función del tiempo, el cálculo de las velocidades y aceleraciones.

El siguiente ejemplo explica los pasos a seguir:

En el siguiente sistema el ciclo de trabajo continuo dura 1 segundo, en el cual el 25% del tiempo acelera de  $0^\circ$  a  $60^\circ$ , se mantiene en una velocidad constante durante el 50% del ciclo y, al llegar a  $300^\circ$  desacelera hasta 0 rpm.

Tabulando la información se obtiene la siguiente tabla:

Tiempo	Intervalo	Velocidad Rotacional	Carga	Posición
S	S	r/min	r/min	°
0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
0.25	0.25	80.0	80.0	60.0
0.75	0.50	80.0	80.0	300.0
1.00	0.25	0.0	0.	360.0

Tabla 2-6. Tabla de velocidades.  
(Fuente: Propia).

La información tabulada se representa sobre un plano cartesiano de velocidad vs tiempo:

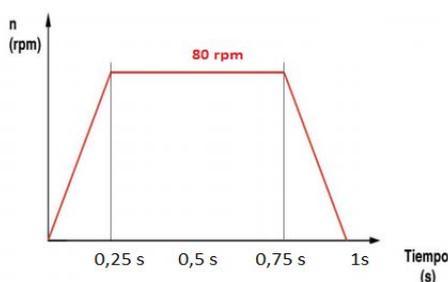


Figura 2.33 Velocidad Vs Tiempo.  
(Fuente: Propia).

En función del perfil de velocidades se puede graficar la modificación de la aceleración del sistema.

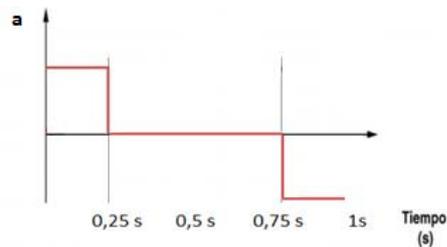


Figura 2.34 Aceleración del Sistema  
(Fuente: Propia).

Analizando el gráfico se identifica que la máxima aceleración se encuentra en el primer tramo del ciclo de funcionamiento. Reemplazando los datos del ejemplo para el primer tramo se tiene una aceleración igual a:

$$80 \text{ rpm} \cdot \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 8.378 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$a = \frac{8.378 \text{ rad/s}}{0.25 \text{ s}} = 33.51 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Para poder finalizar con el cálculo del torque del sistema, resta obtener el valor de la inercia de los componentes del sistema, tal como lo denota la Ecuación 2-12. Para este ejemplo, se asume una inercia  $I$  a determinar. De esta manera la, reemplazando los valores en la Ecuación 2-12, se tiene:

$$T = 33.51 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \cdot I$$

Lo que implica que el motor debe obtener una velocidad mínima de 80 rpm con un par máximo de  $33.51 I$ . Este valor se presenta en el pico de par del motor, lo que corresponde normalmente a valores en un 300% más grande del par nominal del motor.

El fabricante del motor siempre presenta los datos referidos al Par Nominal del motor, que corresponde al trabajo continuo del motor (heavy duty), y el Pico del par (Peak torque) que es el par que el servo es capaz de suministrar en el arranque del sistema.

Si el ciclo de trabajo no es severo, es decir sin un tiempo en el que el motor este acelerando y decelerando, se puede considerar que el par efectivo (o RMS) disminuye notablemente.

## **2.7. Selección del material por el Método Ashby**

La adecuada selección de materiales para la construcción de la estructura garantiza en el diseño mecánico el máximo rendimiento de las piezas que conforman el sistema.

“Desde el punto de vista práctico, la posibilidad de usar varios métodos y poderlos confrontar, garantiza una mayor eficiencia en la selección correcta del material en un fin específico”. (Leal, 2011)

Para ello la selección de materiales se las hace en base a criterios de disponibilidad, costo, facilidad de fabricación, resistencia y rigidez. Es muy difícil seleccionar un material en base a una sola propiedad, motivo por el cual se utilizara el método grafico usando mapas de ASHBY.

Los grupos de materiales que se puede encontrar con sus propiedades respectivas se las puede ver resumidas en la siguiente Tabla 2-7.

Materiales	Puntos Fuertes	Debilidades
<b>Metales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rigidez (<math>E \approx 100</math> GPa)</li> <li>• Ductilidad <math>\Rightarrow</math> Moldeabilidad</li> <li>• Tenacidad (<math>K_{IC} &gt; 50</math> MPa m<sup>1/2</sup>)</li> <li>• Elevado punto de fusión (<math>T_m \approx 1000^\circ\text{C}</math>)</li> <li>• Elevada resistencia al choque térmico (<math>\Delta T \approx 500^\circ\text{C}</math>)</li> <li>• Elevadas conductividades eléctricas y térmicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se deforman plásticamente (<math>\sigma_f \approx 1</math> MPa) <math>\Rightarrow</math> Aleaciones</li> <li>• Baja dureza (<math>H \approx 3\sigma_f</math>) <math>\Rightarrow</math> Aleaciones</li> <li>• Baja resistencia a la fatiga (<math>\sigma_f \approx 1/2\sigma_t</math>)</li> <li>• Elevada resistencia a la corrosión <math>\Rightarrow</math> recubrimientos</li> </ul>
<b>Cerámicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rigidez (<math>E \approx 200</math> GPa)</li> <li>• Elevada resistencia a la fluencia y duras (<math>\sigma_f \approx 3</math> GPa)</li> <li>• Elevado punto de fusión (<math>T_m \approx 2000^\circ\text{C}</math>)</li> <li>• Densidad moderada</li> <li>• Resistencia a la corrosión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy baja tenacidad (<math>K_{IC} \approx 2</math> MPa m<sup>1/2</sup>)</li> <li>• Baja resistencia al choque térmico (<math>\Delta T \approx 200^\circ\text{C}</math>)</li> <li>• Dificultad de moldear <math>\Rightarrow</math> métodos de polvo</li> </ul>
<b>Polímeros</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ductilidad y moldeabilidad</li> <li>• Resistencia a la corrosión</li> <li>• Baja densidad</li> <li>• Bajas conductividades eléctricas y térmicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja rigidez (<math>E \approx 2</math> GPa)</li> <li>• Elevada Fluencia (<math>\sigma_f \approx 2-100</math> MPa)</li> <li>• Baja temperatura de transición vítrea (<math>T_g \approx 100^\circ\text{C}</math>) <math>\Rightarrow</math> fluyen a baja temperatura</li> <li>• Tenacidad media (<math>K_{IC} \approx 1</math> MPa m<sup>1/2</sup>)</li> </ul>
<b>Materiales compuestos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rigidez (<math>E &gt; 50</math> GPa)</li> <li>• Resistencia mecánica (<math>\sigma_f \approx 200</math> MPa)</li> <li>• Tenacidad (<math>K_{IC} &gt; 50</math> MPa m<sup>1/2</sup>)</li> <li>• Resistencia a la fatiga</li> <li>• Resistencia a la corrosión</li> <li>• Baja densidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificultad de moldear</li> <li>• Elevado costo</li> <li>• Elevada fluencia (matrices poliméricas)</li> </ul>

Tabla 2-7 Propiedades de los materiales.  
(Fuente: (Ashby, 2005)).

### 2.7.1. Metodología Ashby

La metodología de selección de materiales Ashby fue desarrollado por M.F Ashby en 1992 y radica principalmente en realizar un buen diseño mecánico, basándose en la selección más apropiada de material para la aplicación. (Romero Sors & de Anda del Muro, 2012)

Esta metodología utiliza un parámetro “P” de rendimiento, que permite la elaboración de un componente a través de varios parámetros como característica. Este parámetro dependerá de requerimientos tanto funcionales, geométricos y del material que se va a utilizar para su fabricación, dependiendo de las exigencias físicas a las cuales el componente se encuentra sometido.

La expresión de P sería la siguiente:

$$P = \left[ \left( \begin{array}{c} \text{requerimientos} \\ \text{funcionales } F \end{array} \right), \left( \begin{array}{c} \text{parámetros} \\ \text{geométricos } G \end{array} \right), \left( \begin{array}{c} \text{propiedades} \\ \text{materiales } M \end{array} \right) \right]$$

De manera simbólica,

$$P = f(F, G, M)$$

Separando cada uno de los índices de forma independiente se obtiene,

$$P = f_1(F)f_2(G)f_3(M)$$

Para lograr un buen diseño, se deben maximizar o minimizar P, solo en función de las propiedades del material, llamando a  $f_3(M)$  coeficiente de eficiencia del material. Este coeficiente se puede ver en la Tabla 2-8 que determinan las características de diseño según las especificaciones que se le da al componente.

Requerimientos	Índice
Barra, Mínimo peso, rigidez especificada	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
Barra, peso mínimo, resistencia especificada	$\frac{\sigma_f^{2/3}}{\rho}$
Barra, costo mínimo, rigidez especificada	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
Barra, costo mínimo, resistencia especificada	$\frac{\sigma_f^{2/3}}{C_m \rho}$
Columna, costo mínimo, resistencia al pandeo especificada.	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
Aislamiento térmico, costo mínimo, flujo de calor especificado.	$\frac{1}{\lambda C_m \rho}$

Tabla 2-8 Ejemplos de Índices de Materiales según características dadas.  
(Fuente: (Romero Sors & de Anda del Muro, 2012)).

Estos parámetros permiten agrupar características como costos, disponibilidad, durabilidad, resistencia etc, para que según la pendiente y



Se puede ver los contornos que encierran datos de un determinado material. Las líneas diagonales muestran la velocidad de la onda longitudinal. Las directrices de constante  $E/\rho$ ,  $E^{1/2}/\rho$  y  $E^{1/3}/\rho$  *permitir la selección de materiales para peso mínimo, deflexión limitada, diseño.* (Ashby, 2005)

De acuerdo a las características de material cada función tiene un índice, en donde los materiales con altos valores de índice maximizan el aspecto de rendimiento en un componente. El índice del material, por norma general, es independiente de los detalles del diseño.

### **2.7.3. Método Ashby con la ayuda de bases de datos**

En el uso de bases de datos, el software CES EduPack es uno de los más conocidos en el diseño e ingeniería. La selección del material con ayuda de base de datos permite relacionar varias propiedades a la vez para empezar a diseñar según características específicas.

Además de ser una base de datos es una herramienta de aprendizaje donde se puede encontrar datos técnicos, notas científicas e información completa e ilustrativa de todos los materiales y procesos a elegir.

Se utilizó la versión de prueba por 30 días del software para evaluar la selección del material en cada componente.

### 3. CAPITULO 3: DISEÑO CONCEPTUAL

#### 3.1 Características funcionales del proyecto

El primer paso para poder diseñar los sistemas mecánicos, eléctricos y de control es definir los requisitos que deben cumplir cada uno de estos sistemas. El objetivo general del proyecto se orienta al diseño y construcción de un sistema mecatrónico de desplazamiento que traslade automáticamente la cámara siguiendo la marcha del paciente/deportista durante la realización de un examen.

Para cumplir este objetivo es necesario definir las mejores opciones para los diferentes elementos motrices, de tracción y estructurales del proyecto. Con este fin se puede dividir al sistema en diferentes elementos de diseño para enfocarnos en las características específicas de cada uno.

##### 3.1.1 Elementos de diseño

Analizando el aspecto estructural del sistema, es necesario definir las mejores opciones para las siguientes partes:

- **Estructura Guía del Eje X:** sobre esta estructura se desplazará la cámara al seguir la marcha del paciente. Esta debe cumplir con la longitud de desplazamiento de 1.40 m. Adicionalmente, toda esta estructura deberá desplazarse en el sentido del Eje Y.

- **Estructura Guía del Eje Y:** sobre estas guías se desplazará la *Estructura Guía del Eje X*. La longitud de esta estructura debe cumplir con los 15 cm de recorrido que puede desplazarse la cámara sobre el eje.

- **Sistema de elevación manual (Eje Z):** Este sistema debe ofrecer la comodidad a los operadores para poder elevar la cámara una altura de 80 cm desde el piso.

Las estructuras mencionadas cumplen la función de direccionar el movimiento de la cámara. A cada estructura se debe acoplar un sistema de tracción y un elemento generador de movimiento.

Los sistemas de tracción son mecanismos que permitirán transformar o transmitir el movimiento del motor. Las consideraciones a tomar para estos sistemas son las siguientes:

- **Sistema de tracción Eje X:** El mecanismo que se utilice para el eje X debe facilitar el desplazamiento de la cámara en una distancia de 1.40 m y a una velocidad máxima de 2.5 m/s. El peso de la cámara es de 200 g por lo que no se consideran mecanismos de alta potencia.

- **Sistema de tracción Eje Y:** Este mecanismo debe generar un desplazamiento de 15 cm a una velocidad máxima de 1 m/s.

Analizando los elementos motrices se debe tomar en cuenta las siguientes especificaciones de funcionamiento:

- **Motor del Eje X:** Este motor genera el movimiento de la cámara sobre el eje X. El torque dependerá de la masa de la cámara más el soporte sobre el cual se apoye. Considerando una velocidad máxima de 2.5 m/s y un desplazamiento de 1.40 m, se puede definir una aceleración máxima de 15 m/s<sup>2</sup>.

- **Motor del Eje Y:** Este motor moverá la *Estructura Guía del Eje X* para cumplir con el desplazamiento de 15 cm sobre el Eje Y. Se debe considerar un peso más grande para este motor, aunque la velocidad de desplazamiento sea de tan solo 1 m/s con una aceleración de 1 m/s<sup>2</sup>.

### 3.2. Selección de Alternativas

En el capítulo 2 se expuso la gama de posibilidades de software, hardware y tecnología en general relacionada con el objetivo de este proyecto. Con esa información se eligió algunas alternativas para evaluar los criterios de funcionamiento. Para evaluar estas alternativas se plantea utilizar un método de selección de alternativas que asigna un valor a los criterios más relevantes de cada sistema o elemento de diseño. Los elementos a evaluar son los que se presentaron en la previa sección.

#### 3.2.1. Método de Selección de Alternativas

Para la evaluación de las alternativas se utiliza *el método ordinal corregido de criterios ponderados*. Este es un método que permite obtener resultados globales suficientemente significativos para cada criterio de diseño sin la necesidad de estimar numéricamente y evaluar parámetros de cada propiedad. Los criterios de evaluación que se consideran más importantes son escogidos para cada sistema a analizar.

A cada criterio se asigna un valor de *importancia* en relación al resto de criterios. Por ejemplo, se tiene los siguientes criterios de evaluación para una estructura:

- Criterio a: Costo

- Criterio b: Construcción
- Criterio c: Mantenimiento

Cada criterio se compara y se asigna un “1” si es más importante que el comparado. La iteración entre cada criterio se resume de esta manera (ver Tabla 3-1).

Criterio	a	b	c	$\sum +1$	Ponderación
a		1	1	3	0,50
b	0		1	2	0,33
c	0	0		1	0,16
			suma	6	1

Tabla 3-1 Evaluación del peso específico de cada criterio.  
(Fuente: Propia).

Al ponderar los valores de la última comparación se puede determinar cuáles de los criterios tienen mayor peso en la selección de las alternativas. Siguiendo con el ejemplo, al analizar el valor de ponderación de la tabla los dos criterios más importantes a considerar son costo y capacidad de carga.

El siguiente paso consta en evaluar cada uno de las Soluciones para cada Criterio a considerar. Es decir, asumiendo que se tenga una Solución A, B y C, se define las siguientes tablas de evaluación:

- **Evaluando el Criterio a:**

Criterio a	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,50
Solución B	0		1	2	0,33
Solución C	0	0		1	0,17
			<b>Suma:</b>	6	1

Tabla 3-2 Evaluación de solución según criterio a.  
(Fuente: Propia).

- **Evaluando el Criterio b:**

Criterio b	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		0	0	1	0,16
Solución B	1		0	2	0,33
Solución C	1	1		3	0,50
<b>Suma:</b>				6	1

Tabla 3-3 Evaluación de solución según criterio b.  
(Fuente: Propia).

- **Evaluando el Criterio c:**

Criterio c	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		0	1	2	0,40
Solución B	0		0	1	0,20
Solución C	1	0		2	0,40
<b>Suma:</b>				5	1

Tabla 3-4 Evaluación de solución según criterio c.  
(Fuente: Propia).

Finalmente se realiza la multiplicación de los resultados obtenidos en las previas tablas con los valores de la Tabla 3-1.

Evaluación	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	$\sum +1$	Prioridad
Solución A	0,50 x 0,50	0,16 x 0,33	0,40 x 0,16	1,36	3
Solución B	0,50 x 0,50	0,33 x 0,33	0,20 x 0,16	1,39	2
Solución C	0,40 x 0,50	0,50 x 0,33	0,40 x 0,16	1,42	1

Tabla 3-5 Resumen de criterios evaluados.  
(Fuente: Propia).

La multiplicación matricial da como resultado el orden de las prioridades de las soluciones según los criterios planteados. En el ejemplo planteado la Solución C es la mejor opción, mientras que la opción A es la menos favorable. Ver Tabla 3-5.

### 3.3. Alternativas de Estructura Guía del Eje X

El primer factor a considerar para el diseño del proyecto es la estructura sobre la que se desplazará la cámara. Entre varias opciones en el mercado existen las siguientes posibilidades (ver Tabla 3-6):

Solución A: Rieles de tubos circulares paralelos

Solución B: Rieles unidas por una estructura simétrica

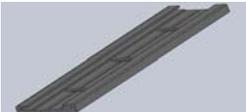
Solución de Diseño	Ventajas	Desventajas
Rieles de tubos circulares paralelos 	Estructura Liviana Fácil construcción. Bajo Costo Gran longitud de desplazamientos. Mayor disponibilidad de mercado. Fácil Montaje.	Posible vibración de la estructura.
Rieles unidas por una estructura simétrica 	Rigidez. Estabilidad.	Estructura pesada. Costos elevados. Limitante en la selección de rodamientos.

Tabla 3-6 Ventajas y Desventajas de posibles soluciones para la Estructura Guía del Eje X.  
(Fuente: Propia).

#### 3.2.1 Selección de Estructura Guía del Eje X

Los criterios más relevantes son:

- Criterio A: Peso
- Criterio B: Facilidad de diseño, construcción y montaje.
- Criterio C: Capacidad de carga
- Criterio D: Costo

Evaluación del peso específico de cada criterio

Criterio	A	B	C	D	$\sum +1$	Ponderación
A		0	1	0	2	0,22
B	1		1	1	3	0,33
C	0	0		0	1	0,11
D	1	0	1		3	0,33
				suma	9	1,00

Tabla 3-7 Evaluación de criterios - Estructura Guía del Eje X.  
(Fuente: Propia).

Evaluando el peso específico del criterio Peso:

Peso	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	2	0,66
Solución B	0		1	0,33
		Suma	3	1

Tabla 3-8 Evaluación del criterio Peso.  
(Fuente: Propia).

Evaluando facilidad de diseño, construcción y montaje:

Diseño, construcción y montaje	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	2	0,66
Solución B	0		1	0,33
		Suma	3	1

Tabla 3-9 Evaluación del criterio Facilidad de diseño, construcción y montaje.  
(Fuente: Propia).

Considerando la capacidad de carga:

Capacidad de Carga	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		0	1	0,33
Solución B	1		2	0,66
		Suma	3	1

Tabla 3-10 Evaluación del criterio Capacidad de Carga.  
(Fuente: Propia).

Se evalúa el criterio Costo

Costo	Solución A	Solución B	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	2	0,66
Solución B	0		1	0,33
		Suma	3	1

Tabla 3-11 Evaluación del criterio Costo.  
(Fuente: Propia).

Calculando la tabla de conclusiones se obtiene la siguiente respuesta:

Conclusión	Peso	Diseño, const. y montaje	Capacidad de Carga	Costo	$\sum +1$	Prioridad
Solución A	0,66 x 0,22	0,66 x 0,33	0,33 x 0,11	0,66 x 0,33	1,617	1
Solución B	0,33 x 0,22	0,33 x 0,33	0,66 x 0,11	0,66 x 0,33	1,363	2

Tabla 3-12 Conclusiones según criterios evaluados.  
(Fuente: Propia).

Evidentemente la solución más conveniente para el proyecto es utilizar guías paralelas de forma circular.

### 3.4. Alternativas de sistema de deslizamiento

Teniendo en cuenta la forma que tendrá la estructura de desplazamiento se debe considerar el tipo de rodamiento a utilizar para montar la cámara. En función de esta idea se buscó en el mercado local sistemas de desplazamiento lineal sobre tubos circulares teniendo las siguientes posibilidades (ver Tabla 3-13):

Solución A: Estructura de rodamientos lineales

Solución B: Rodamientos lineales independientes.

Solución C: Ruedas acaneladas

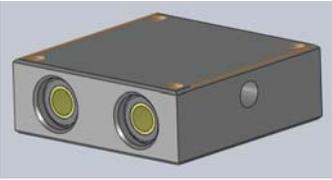
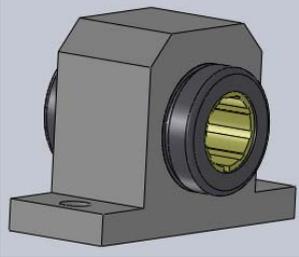
Solución de Diseño	Ventajas	Desventajas
<p>Estructura de rodamientos lineales</p> 	<p>Poca vibración en el desplazamiento. Robusto. Poca Fricción.</p>	<p>Sistemas importados solo a pedido. Pesado. Costoso.</p>
<p>Rodamientos lineales independientes.</p> 	<p>No mucha vibración en el deslizamiento. Poca Fricción. Fácil montaje sobre una estructura diseñada. Versatilidad en el diseño.</p>	<p>Sistemas importados solo a pedido. Disponibilidad limitada en el mercado nacional. Costoso.</p>
<p>Ruedas acaneladas</p> 	<p>Bajo Costo Disponibilidad en el mercado nacional. Fácil Montaje Versatilidad en el diseño.</p>	<p>Posible vibración en el desplazamiento. Mayor dimensión.</p>

Tabla 3-13 Ventajas y Desventajas de posibles soluciones para Sistemas de Desplazamiento.  
(Fuente: Propia).

### 3.4.1. Selección de Estructura de desplazamiento

Los criterios a considerar para este sistema son:

- Criterio A: Capacidad de Carga
- Criterio B: Disponibilidad en el mercado nacional.
- Criterio C: Costo

Evaluación del peso específico de cada criterio

Criterio	A	B	C	$\sum +1$	Ponderación
A		1	1	3	0,43
B	1		1	3	0,43
C	0	0		1	0,14
			suma	7	1

Tabla 3-14 Evaluación de criterios - Sistema de Desplazamiento.

(Fuente: Propia).

Evaluando el peso específico del criterio Carga:

Carga	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,50
Solución B	0		0	1	0,17
Solución C	0	1		2	0,33
		Suma		6	1

Tabla 3-15 Evaluación del criterio Carga.

(Fuente: Propia).

Evaluando el criterio de Disponibilidad en el mercado:

Disponibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	0	2	0,33
Solución B	0		0	1	0,17
Solución C	1	1		3	0,50
		Suma		6	1

Tabla 3-16 Evaluación del criterio Disponibilidad en el mercado.

(Fuente: Propia).

Finalmente evaluando Costo:

Costo.	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	0	2	0,33
Solución B	0		0	1	0,17
Solución C	1	1		3	0,50
		Suma		6	1

Tabla 3-17 Evaluación del criterio Costo.

(Fuente: Propia).

Calculando la tabla de conclusiones se tiene la siguiente respuesta:

Conclusión	Carga	Disponibilidad	Costo	$\sum +1$	Prioridad
Solución A	0,50 x 0,43	0,33 x 0,43	0,33 x 0,14	0,403	2
Solución B	0,17 x 0,43	0,17 x 0,43	0,17 x 0,14	0,17	3
Solución C	0,33 x 0,43	0,50 x 0,43	0,50 x 0,14	0,427	1

Tabla 3-18 Conclusiones según criterios evaluados.

(Fuente: Propia).

Finalmente, la mejor opción es utilizar llantas acaneladas. En función de esta decisión se encontró en el mercado local los sistemas de deslizamiento que se acoplan a un perfil circular que tienen la siguiente geometría:

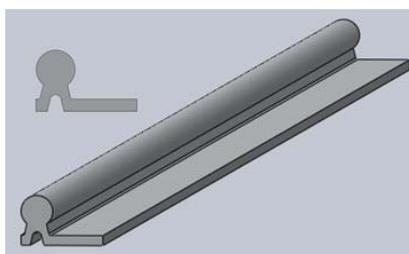


Figura 3.1 Perfil Circular de Aluminio.

(Fuente: Propia).

Debido a que se necesita un recorrido de 1.40 metros, el perfil en uso se flexionaría con tal distancia. Para reforzar a este perfil se plantea la idea de montarlo sobre una plancha de metal, como lo muestra la siguiente figura:

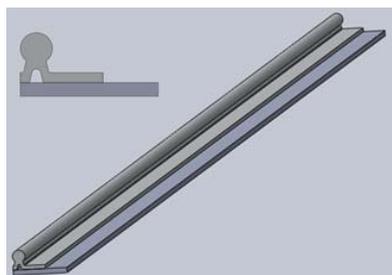


Figura 3.2 Perfil circular y Plancha de metal.

(Fuente: Propia).

Para asegurar la estabilidad de la cámara al desplazarse, se plantea ubicar a las ruedas en la mitad de las rieles de aluminio. Esto se puede hacer utilizando un perfil con sección en C. El resultado final es el siguiente:

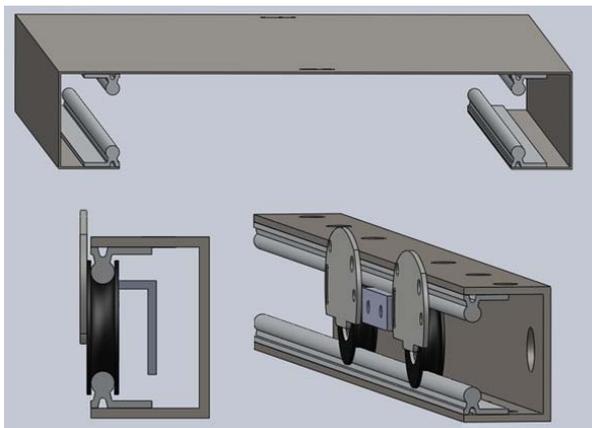


Figura 3.3 Perfil con sección en C y Perfil circular.  
(Fuente: Propia).

### 3.5. Alternativas de sistemas de tracción.

Las alternativas dentro de un sistema de guiado lineal son las siguientes:

- Solución A: Sistema con eje de correa dentada
- Solución B: Sistema con eje de husillo
- Solución C: Sistema con cilindro electromecánico

Ver Tabla 3-19.

<b>Solución A. Sistema con Correa – Polea Dentada</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<p>Marcha silenciosa Absorción de choques y vibraciones Distancia entre ejes puede ser elevada Coste inferior al de otras transmisiones Mantenimiento reducido (0% lubricación) Gran fuerza de avance Menor peso</p>	<p>Volumen superior al de otras transmisiones. Relaciones de transmisión pequeñas. Requiere tensión de montaje. Cargas transversal sobre los ejes. Deslizamiento elástico de la correa. Variación de la longitud de la correa y coeficiente de fricción con condiciones ambientales.</p>
<b>Solución B. Sistema con eje de husillo</b>	
	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<p>Máxima precisión. Silencioso. Sin vibraciones. No sufre desgaste No requiere de mantenimiento Relación de transmisión alta de 7 a 10</p>	<p>Velocidades bajas con cargas elevadas. El sistema dependerá del paso de husillo Fabricación complicada Rendimiento bajos de 40 al 90% mientras más grande es la relación de transmisión menor es el rendimiento Si necesitan lubricación Precio de fabricación alto</p>
<b>Solución C. Cilindro Electroneumático</b>	
	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<p>Altos de potencia y carga. Mayor exactitud. Amplio rango de velocidad. La neumática es capaz de desarrollar grandes fuerzas, imposibles para la tecnología eléctrica. No genera chispas, incendios, riesgos eléctricos. La neumática posibilita sistemas con movimientos muy rápidos y precisos.</p>	<p>Posibles fugas de aceite a lo largo de la Instalación. Fuente de energía adicional Sistema ruidoso Poco rendimiento a bajas velocidades. Recorridos no muy largos Precio elevado</p>

Tabla 3-19 Ventajas y Desventajas - Sistemas de Tracción.

(Fuente: Propia).

### 3.5.1. Selección de sistema de tracción

Los criterios de evaluación que se consideran más importantes son:

- Criterio A: Costo
- Criterio B: Facilidad de diseño, construcción y montaje
- Criterio C: Mantenimiento
- Criterio D: Capacidad de carga

#### Evaluación del peso específico de cada criterio:

Criterio	a	b	c	d	$\sum +1$	Ponderación
a		1	1	1	4	0,33
b	0		1	1	3	0,25
c	0	0		0	1	0,083
d	1	1	1		4	0,33
				suma	12	1

Tabla 3-20 Evaluación de criterios - Sistema de Tracción.

(Fuente: Propia).

Según el valor de ponderación dado al sistema, los dos criterios más importantes a considerar son costo y capacidad de carga.

#### Evaluación del peso específico del criterio Costo

- Eje x (aprox. 1.4m)

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,5
Solución B	0		1	2	0,33
Solución C	0	0		1	0,17
			Suma	6	1

Tabla 3-21 Evaluación del criterio Costo - Eje X.

(Fuente: Propia).

- **Eje y (aprox, 0.15m)**

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,5
Solución B	0		1	2	0,33
Solución C	0	0		1	0,17
			Suma	6	1

Tabla 3-22 Evaluación del criterio Costo - Eje Y.

(Fuente: Propia).

Evaluación del peso específico del criterio; Facilidad de diseño, construcción y montaje

- **Eje x**

Diseño, construcción montaje	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,46
Solución B	0.5		1	2.5	0,41
Solución C	0	0		1	0,16
			Suma	6.5	1

Tabla 3-23 Evaluación del criterio Diseño, construcción y montaje - Eje X.

(Fuente: Propia).

- **Eje y**

Diseño, construcción montaje	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		0.5	1	2,5	0,41
Solución B	0.5		1	2,5	0,41
Solución C	0	0		1	0,16
			Suma	6	1

Tabla 3-24 Evaluación del criterio Diseño, construcción y montaje - Eje Y.

(Fuente: Propia).

Evaluación del peso específico del criterio Mantenimiento

- **Eje x**

Mantenimiento	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,5
Solución B	0		0,5	1,5	0,25
Solución C	0	0,5		1,5	0,25
			Suma	6	1

Tabla 3-25 Evaluación del criterio Mantenimiento - Eje X.

(Fuente: Propia).

- **Eje y**

Mantenimiento	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,5
Solución B	0		0,5	1,5	0,25
Solución C	0	0,5		1,5	0,25
			Suma	6	1

Tabla 3-26 Evaluación del criterio Mantenimiento - Eje Y.

(Fuente: Propia).

Evaluación del peso específico del criterio Capacidad de carga

- **Eje x**

Capacidad de carga	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	0	2	0,36
Solución B	0,5		0	1,5	0,27
Solución C	1	0		2	0,36
			Suma	5,5	1

Tabla 3-27 Evaluación del criterio Capacidad de Carga - Eje X.

(Fuente: Propia).

- **Eje y**

Capacidad de carga	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	ponderación
Solución A		0,5	0	1,5	0,3
Solución B	0,5		0	1,5	0,3
Solución C	1	0		2	0,4
			Suma	5	1

Tabla 3-28 Evaluación del criterio Capacidad de Carga - Eje Y.

(Fuente: Propia).

➤ **Calculo de la tabla de conclusiones:**

**Eje x**

Conclusión	Costo	Diseño, const. y montaje	Mantenimiento	Capacidad De carga	$\sum +1$	Prioridad
Solución A	0,50 x 0,33	0,46 x 0,25	0,50 x 0,083	0,36 x 0,33	2,54	1
Solución B	0,33 x 0,33	0,41 x 0,25	0,25 x 0,083	0,27 x 0,33	1,33	2
Solución C	0,17 x 0,33	0,16 x 0,25	0,25 x 0,083	0,36 x 0,33	1,24	3

Tabla 3-29 Conclusiones según criterios evaluados - Eje X.

(Fuente: Propia).

**Eje y**

Conclusión	Costo	Diseño, const. y montaje	Mantenimiento	Capacidad De carga	$\sum +1$	Prioridad
Solución A	0,50 x 0,33	0,41 x 0,25	0,50 x 0,083	0,3 x 0,33	1,4	1=2
Solución B	0,33 x 0,33	0,41 x 0,25	0,25 x 0,083	0,3 x 0,33	1,4	2=1
Solución C	0,17 x 0,33	0,16 x 0,25	0,25 x 0,083	0,4 x 0,33	1,13	3

Tabla 3-30 Conclusiones según criterios evaluados - Eje Y.

(Fuente: Propia).

Según los criterios seleccionados se puede concluir que la solución A es la mejor opción para el proyecto pues tiene mayor prioridad en el análisis, seguida de la solución B como alternativa a elegir, mientras que la solución C se descarta por completo.

Para el Eje X la mejor solución es la opción A, ya que el sistema de correa dentada va a permitir trabajar en carreras largas con gran capacidad de carga y no va depender de lubricación por lo que tendrá cero mantenimientos.

Para el eje Y hay un empate entre la solución A y B, por lo que por motivos de diseño se elegirá la opción A.

### 3.6. Alternativas de sistema de elevación manual.

En el segundo capítulo se había especificado que el sistema de desplazamiento del eje Z podría ser de accionamiento manual pues no es un parámetro que varíe significativamente en cada prueba de movilidad.

Para este eje se optó por recurrir por un sistema de deslizamiento con ajuste manual. No se evalúa otros sistemas mecánicos pues no existe una variedad de opciones significativa que se pueda comparar.

El resultado de esta selección se presenta a continuación:

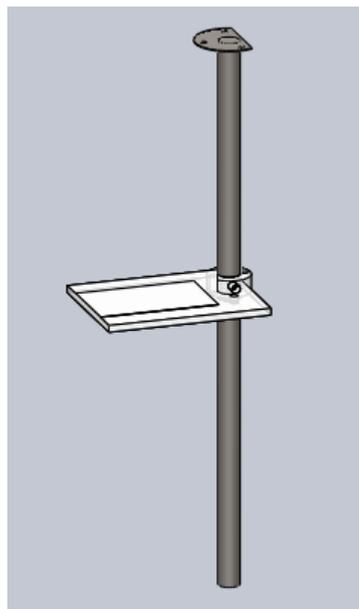


Figura 3.4 Sistema de Elevación Manual - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

### 3.7. Alternativas de Motores

Establecidas las opciones estructurales del proyecto, se continúa con los actuadores que generarán el movimiento. Las alternativas a considerar son las siguientes:

- Solución A: Motor de Inducción
- Solución B: Motor DC
- Solución C: Servomotor

Analizando los aspectos técnicos de las opciones mencionadas se describen las siguientes ventajas y desventajas de su uso:

Solución de Diseño	Ventajas	Desventajas
Motor de Inducción 	Velocidades de rotación altas. Bajo Costo. Poco mantenimiento al carecer de escobillas. Potencia alta al no depender de la velocidad. Fácil arranque en velocidad que no varía.	Sistema de control de velocidad y posición costoso. Restricciones para trabajar a bajas velocidades. No menor de 1/3 de la velocidad base. Dimensiones grandes. Corrientes altas en el arranque.
Motor DC 	Facilidad en controlar el arranque y paro. Control de velocidad no muy complicado.	Alto costo. Mantenimiento necesario en motores con escobillas.
Servomotor 	Fácil control de posición y velocidad. Control preciso. Pequeñas dimensiones de diseño.	Alto costo. Potencia y torque bajo.

Tabla 3-31 Ventajas y Desventajas - Alternativas de Motores.

(Fuente: Propia).

### 3.7.1. Selección de Actuadores

Tomando en cuenta la función del proyecto los criterios a considerar son:

- Criterio A: Pequeña dimensión.
- Criterio B: Fácil control de velocidad y posición.
- Criterio C: Bajo costo
- Criterio D: Adquisición de torque específico

Evaluación del peso específico de cada criterio:

Criterio	a	b	c	d	$\sum +1$	Ponderación
a		0	1	1	3	0,33
b	0		0	0	1	0,11
c	1	0		0	2	0,22
d	1	0	1		3	0,33
				Suma	9	1

Tabla 3-32 Evaluación de criterios - Alternativas de Motores.  
(Fuente: Propia).

Evaluando el peso específico de los criterios antes mencionados:

Pequeña Dimensión	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		0	0	1	0,16
Solución B	1		0,5	2,5	0,42
Solución C	1	0,5		2,5	0,42
				6	1

Tabla 3-33 Evaluación del criterio Pequeña Dimensión.  
(Fuente: Propia).

Ahora evaluando el criterio Fácil control de velocidad y posición:

Fácil control de velocidad y posición.	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		0	0	1	0,17
Solución B	1		0	2	0,33
Solución C	1	1		3	0,50
				6	1

Tabla 3-34 Evaluación del criterio Fácil control de velocidad y posición.  
(Fuente: Propia).

Evaluando el criterio de Bajo costo:

Bajo costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,50
Solución B	0		0	1	0,17
Solución C	0	1		2	0,33
				6	1

Tabla 3-35 Evaluación del criterio Bajo costo.  
(Fuente: Propia).

Finalmente evaluando Adquisición de torque específico:

Torque específico	Solución A	Solución B	Solución C	$\sum +1$	Ponderación
Solución A		0	0	1	0,20
Solución B	1		1	3	0,60
Solución C	0	0		1	0,20
				5	1

Tabla 3-36 Evaluación del criterio Torque específico.  
(Fuente: Propia).

Calculando la tabla de conclusiones se obtiene la siguiente respuesta:

Conclusión	Dimensión	Control	Costo	Torque	$\sum +1$	Prioridad
Solución A	0,16 x 0,33	0,17 x 0,11	0,50 x 0,22	0,20 x 0,33	0,25	3
Solución B	0,42 x 0,33	0,33 x 0,11	0,17 x 0,22	0,60 x 0,33	0,41	1
Solución C	0,42 x 0,33	0,50 x 0,11	0,33 x 0,22	0,60 x 0,33	0,34	2

Tabla 3-37 Conclusiones según criterios evaluados.  
(Fuente: Propia).

El resultado indica que la mejor opción para la selección de los actuadores es un motor DC.

Investigando el mercado local hubo dificultad en obtener un motor DC con el torque específico para el proyecto, por lo que se obtuvo decidió buscar un servomotor para utilizarlos como motor DC.

### **3.8. Selección de opciones**

Hay que considerar que dentro del presupuesto del proyecto resulta mejor tomar algunas características de diseño para desarrollar el sistema de guiado lineal. Es por eso que se han tomado dichas alternativas para poder identificar claramente las características del sistema según la descripción y funcionamiento de cada parte. Como consideración personal de diseño el costo es el principal peso para la decisión final de diseño, el resto de criterios valorados atienden a intereses del laboratorio.

Usar sistemas de desplazamiento lineal permitirá la construcción sencilla y segura del sistema para generar movimiento lineal y posicionamiento complejo. La utilización por accionamiento lineal, engranaje, motor, control y software van a ser requisitos para el diseño de la aplicación planteada. Además la vibración que se obtiene al utilizar los sistemas mecánicos analizados es casi nula al tener un riel fijo que mantenga el movimiento en línea recta siempre.

## 4. CAPITULO 4: DISEÑO MECÁNICO

### 4.1 Selección del material con el Método Ashby

La selección del material se la realiza en base al método Ashby como se menciona en la sección 2.7 del capítulo 2. Para ello se implementa un análisis de las características que debe optar el sistema para definir el material de cada parte y que cumpla con los requisitos de diseño y parámetros de rendimiento.

### 4.2. Selección de materiales a partir del índice de rendimiento.

#### a. Objetivo

El objetivo es encontrar un mismo material para poder realizar las partes del sistema, siendo lo más económico posible, de fácil fabricación, asequible en el país y que cumplan con los requisitos mecánicos necesarios para garantizar el buen funcionamiento de cada componente.

Se utilizará el método de Ashby los índices de rendimiento mencionados en la sección 2.7.1 para realizar la selección.

#### b. Análisis de las propiedades indispensables del sistema

El sistema lineal a diseñar estará compuesto de diferentes partes que serán analizados por separado. Las partes del sistema poseerán requerimientos parecidos en base a la función de generar un movimiento lineal en cada eje. El sistema se encontrara en un lugar fresco, temperado por lo que no se considerara resistencia a la corrosión, pero si a un posible efecto de oxidación de las partes. El material también deberá ser lo más ligero posible y se tendrá en cuenta consideración tales como: costo,

disponibilidad en el mercado y facilidad de construcción de acuerdo a la forma del diseño.

**c. Materiales que entran al proceso de selección**

Antes de seleccionar el material adecuado se limitó la selección del material de acuerdo al siguiente análisis:

- Familias de materiales que entran en selección: Metales y aleaciones, Híbridos(Al/Si).
- Familias de materiales que no entran en la selección: Cerámicas y vidrios, Polímeros y elastómeros.

Se ha descartado la familia de materiales de cerámico y vidrio, ya que son materiales con una fragilidad y peso elevado. Por lo tanto no se adaptan a las características de selección.

La familia de polímeros y elastómeros son descartados por su mala resistencia mecánica, mala rigidez a temperatura elevadas, fabricación costosa a dimensiones específicas y comportamiento elástico inapropiado para un sistema de desplazamiento lineal.

De la familia de materiales híbridos (compuestos, espumas y material naturales) hay que considerar que los materiales tales como polímeros, espumas y materiales naturales son descartados por su composición, y por su alto costo, por lo tanto no se adaptan a las características de selección.

**d. Componentes del sistema**

Los componentes a consideración de selección de materiales y su respectiva función dentro del sistema son (ver Tabla 3-38):

Componentes	Función
Soporte principal	Soportar el peso del sistema dando estabilidad y asegura el movimiento.
Perfil Guía Eje X	Soportar el peso de la carga en movimiento, siendo base para la guía de movimiento lineal en el eje x.
Perfil Guía Eje Y	Soportar el peso de la carga en movimiento, siendo base para la guía de movimiento lineal en el eje y.
Base Eje x	Juntarse al movimiento en el eje x capaz de soportar las ruedas de desplazamiento
Base cámara	Servir de soporte a la cámara.

Tabla 3-38 Función de cada componente del sistema.  
(Fuente: Propia).

**4.2.1. Método Ashby con la ayuda de bases de datos**

Para el uso del software EduPack se han seleccionado las familias de materiales que se pueden ver en la Figura 3.5.

- **Familias de materiales seleccionadas en CES EduPack**

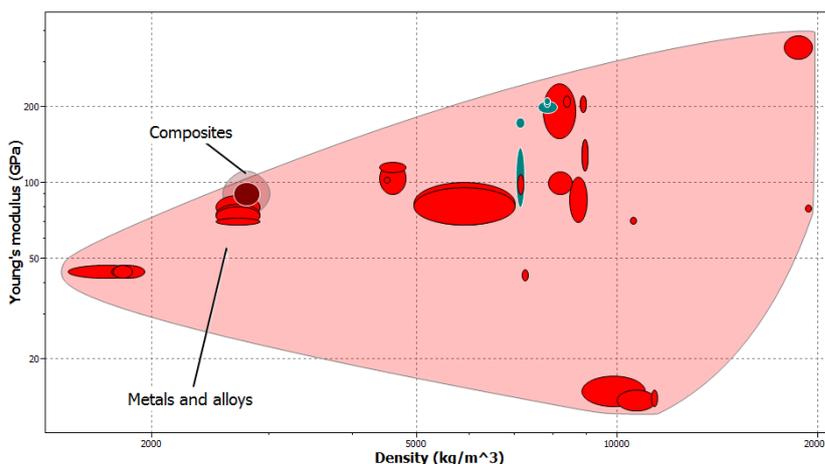


Figura 3.5 Familia de materiales - CES EduPack.  
(Fuente: Propia).

Se puede ver en el grafico que la densidad aumenta a medida que aumenta el módulo de Young por lo que si se quiere un material que resista gran esfuerzo mecánico sin tener problemas de llegar a su límite de fluencia se tiene que elegir un material con una densidad alta especifica.

#### 4.2.1.1. Selección del material para cada componente

##### 4.2.1.1.1. Soporte Principal

##### Requerimiento

- El material debe ser rígido.
- Se debe minimizar la masa
- El costo deber ser menor de 2.5 Usd/kg
- El primer índice de material para esta aplicación es  $\frac{E^{1/2}}{\rho}$ .
- El segundo índice de material: de una densidad mínima de 2000

kg/m<sup>3</sup>

Por lo que introduciendo el parámetro dentro de las gráficas se encuentra lo siguiente:

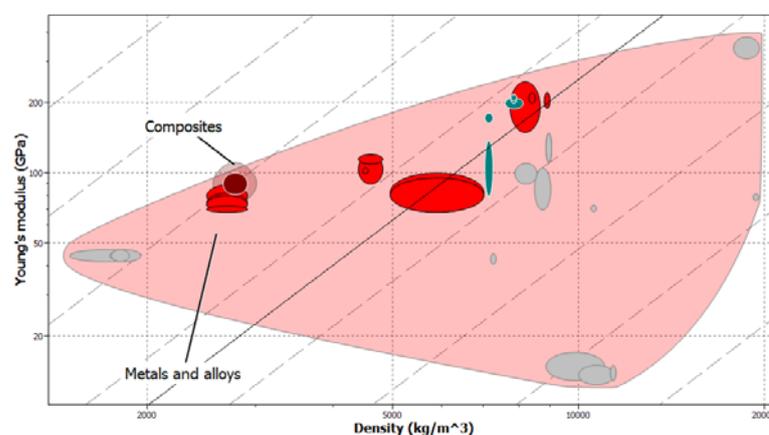


Figura 3.6 Resultado - CES Edupack.  
(Fuente: Propia).

Como resultado se obtiene 36 materiales y de estos 21 materiales pasan por los índices de requerimiento especificados anteriormente.

Age-hardening wrought Al-alloys	Nickel
Aluminum alloys	Nickel alloys
Aluminum/Silicon carbide composite	Nickel-based super alloys
Cast Al-alloys	Nickel-chromium alloys
Cast iron, ductile (nodular)	Non age-hardening wrought Al-alloys
Cast iron, gray	Stainless steel
Commercially pure titanium	Titanium alloys
High carbon steel	Titanium alloys
Low alloy steel	Zinc alloys
Low carbon steel	Zinc die-casting alloys
Medium carbon steel	

El software permite añadir más índices de material para llegar a obtener según la pendiente del parámetro de rendimiento un conjunto de materiales que pueden ser utilizados en el diseño.

Los factores limitantes que van a garantizar el diseño se los puede ver en la Tabla 3-39.

Factor Costo	Menor de 2.5 usd/kg
Módulo de Young	Menor a 200 Gpa
Módulo de corte	Menor de 80 Gpa
Limite elástico	Menor a 350 Mpa

Tabla 3-39 Factores Limitantes para el diseño del Soporte Principal.  
(Fuente: Propia).

Por lo que el resultado con el índice de pendiente Ashby y índices particulares de diseño (datos limitantes) fueron 11 de 36 materiales analizados. Como se puede ver en la Figura 3.7.

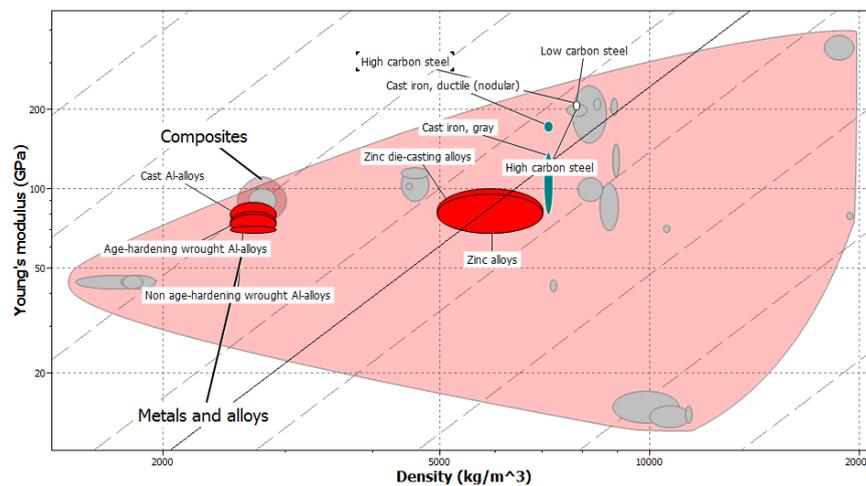


Figura 3.7 Resultado De Materiales Soporte Principal – CES EduPack.  
(Fuente: Propia).

Las propiedades mecánicas de los materiales seleccionados para el Soporte principal se pueden ver en el **Anexo A** (Tabla A-1).

- **Conclusión:**

De los materiales a seleccionar. El material aprobado para la selección es el acero. Se puede ver que las propiedades en el acero no varían considerablemente de acuerdo a su porcentaje de carbono, motivo por el

que se ha escogido el acero 36 por su precio, disponibilidad en el mercado y características mecánicas antes mencionadas.

#### 4.2.1.1.2. Perfil Guía EJES X,Y

##### Requerimiento

- Rigidez limitada de diseño 100 Gpa
- Forma especificada
- Área de sección libre
- La masa debe ser minimizada.
- La rigidez y el costo deben de estar de acuerdo a datos específicos.
- Por lo tanto el índice de material para esta aplicación es  $\frac{E^{1/2}}{\rho}$ .
- La densidad máxima como criterio de selección no debe de sobrepasar los 9000 kg/m<sup>3</sup> asumiendo que la longitud específica es de 500mm.

Los factores limitantes que van a garantizar el diseño se los puede ver en la Tabla 3-40.

Factor Costo	Menor de 2.5 usd/kg
Módulo de Young	Valor máximo de 200 Gpa
Módulo de corte	Menor de 100 Gpa
Limite elástico	Menor a 350 Mpa

Tabla 3-40 Factores Limitantes para el diseño del Perfil Guía X, Y.  
(Fuente: Propia).

Por lo que el resultado con el índice de pendiente Ashby y índices particulares de diseño (factores limitantes) fueron 8 de 26 materiales analizados. Como se puede ver en la Figura 3.8.

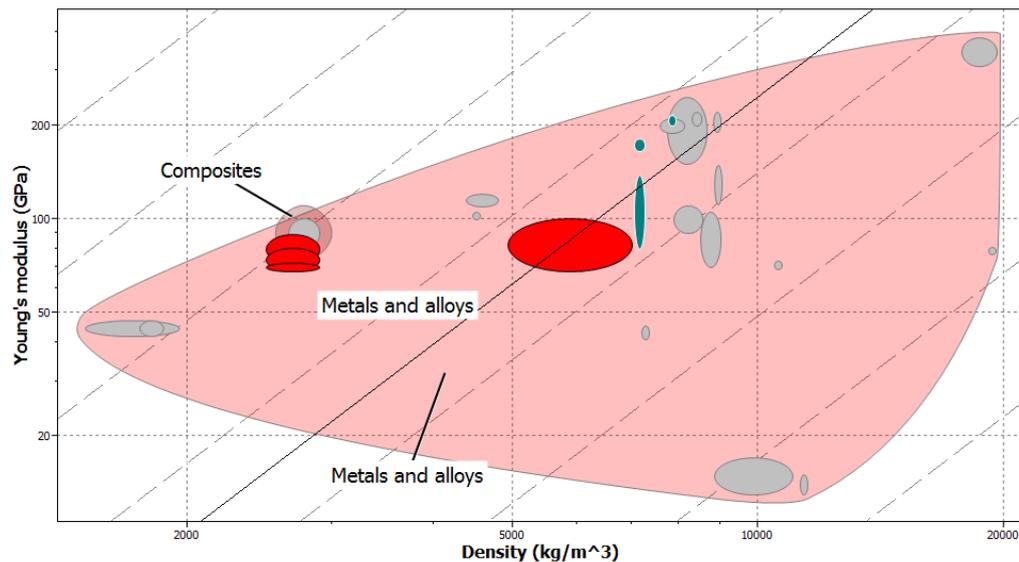


Figura 3.8 Resultado De Materiales Perfil Guía Eje X, Y. – CES EduPack.  
(Fuente: Propia).

Las propiedades mecánicas de los materiales seleccionados para el Perfil Guía Eje X, Y se puede ver en el **Anexo A** (Tabla A-2).

- **Conclusión**

Se ha elegido al aluminio ya que presenta buenas características como otra alternativa de selección pero en base a pruebas realizadas con el material se comprobó que para la distancia que se requiere como requisito de movilidad de 140 cm el material no presenta mucha rigidez. En el caso de elegir el material el aluminio se tendría que redimensionar al componente en su espesor por lo que tendríamos un sobredimensionamiento innecesario y el costo sería muy elevado. Por dicho motivo el material que le secunda al aluminio es el acero A36 y en base a pruebas del requerimiento del sistema el material cumple con los datos técnicos de diseño en resistencia, rigidez y maquinizado.

#### 4.2.1.1.3. Base Eje X

##### Requerimientos

- Rigidez limitada de diseño
- Minimizar la masa
- Sección de área libre
- Criterio de diseño  $\frac{E}{\rho}$
- La densidad máxima como criterio de selección no debe de sobrepasar los 4000 kg/m<sup>3</sup>

Los factores limitantes que van a garantizar el diseño son los siguientes:

Factor Costo	Menor de 4 usd/kg
Módulo de Young	Valor máximo de 80 Gpa
Limite elástico	Menor a 70 Mpa

Tabla 3-41 Factores Limitantes para el diseño de la Base - Eje X.  
(Fuente: Propia).

Por lo que el resultado con el índice de pendiente Ashby y índices particulares de diseño (datos limitantes) fueron 3 de 29 materiales analizados. Ver Figura 3.9

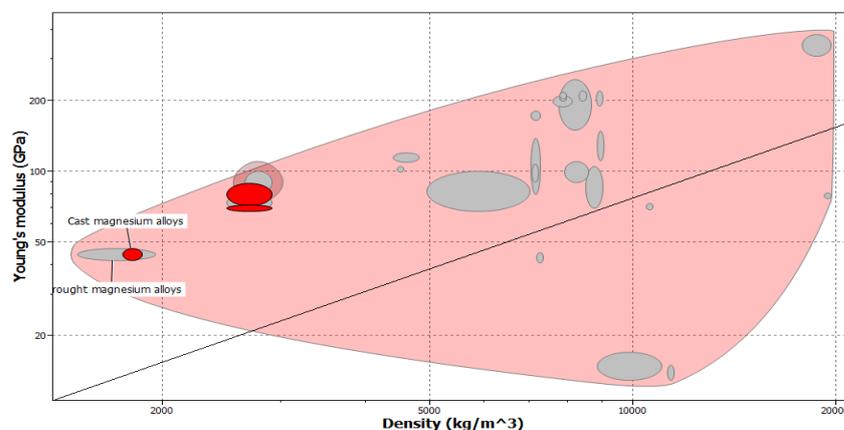


Figura 3.9 Resultado De Materiales Base Eje X. –CES EduPack  
(Fuente: Propia).

Las propiedades mecánicas de los materiales seleccionados para el Perfil Guía Eje X, Y se puede ver en el **Anexo A** (Tabla A-3).

- **Conclusión:**

El material seleccionado es el aluminio. En base a pruebas se comprobó que el material resulta satisfactorio para realizar el componente ya que sus dimensiones no requieren de mucho material pero considerando que este componente va a sostener el eje en Z cuando se produzca movimiento el material resulta muy débil para sostener el peso y no producir vibración. Por este motivo de acuerdo a las tablas de diseño con el objetivo de seleccionar un mismo material se seleccionará el acero A36.

#### 4.2.1.1.4. Base de Cámara

La base del material debe ser muy rígida usando un material de densidad máxima de 1200 kg/m<sup>3</sup>. Para esto se ha seleccionado los polímeros como la familia de materiales para determinar si el Nylon cumple con los requerimientos de diseño para la selección de materiales.

Factor Costo	Menor de 3 usd/kg
Módulo de Young	Valor máximo de 4 Gpa
Limite elástico	Menor a 60 Mpa

Tabla 3-42 Factores Limitantes para el diseño de la Base de la cámara.  
(Fuente: Propia).

Por lo que el resultado con el índice de pendiente Ashby y índices particulares de diseño (factores limitantes) se tiene dos tipos de materiales incluidos el Nylon con se puede ver en la Figura 3.10.

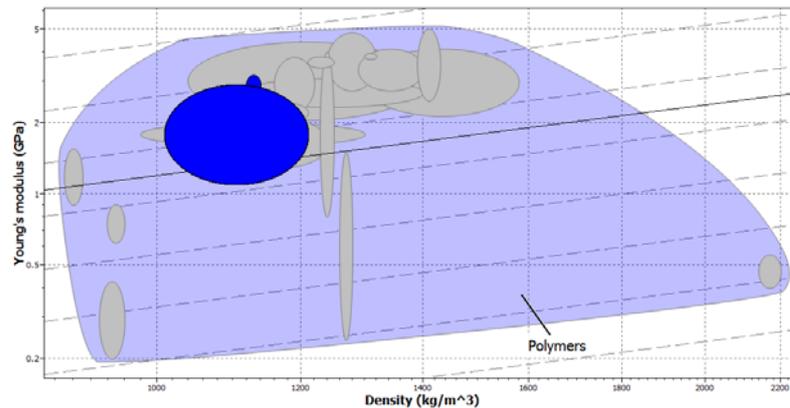


Figura 3.10 Resultado De Material Base de cámara. – CES EduPack  
(Fuente: Propia).

Las propiedades mecánicas de los materiales seleccionados para la base de la cámara se pueden ver en el **Anexo A** (Tabla A-4).

- **Conclusión:**

El material a escoger en el Nylon, tiene una densidad baja, es ligero y muy resistente. Cumple con las condiciones de diseño y es conocido y utilizado en algunas ocasiones para fabricar componentes.

#### 4.2.1.2. Resumen del material escogido para el Sistema de Desplazamiento.

El material escogido es el acero A36. Es un material que cumple con los datos de diseño y proporciona una rigidez valida en longitudes específicas para cada eje. En cuestión de costos se puede adquirir mediante planchas que de acuerdo al espesor no resultan muy caro. El peso cumple con la condición de cargas a soportar y da linealidad al movimiento que se desea generar. El material cumple con el objetivo de diseño y cumple con características mecánicas deseadas, de acuerdo a su alta densidad según el diseño el peso será minimizado teniendo en cuenta que el área en la

metodología Ashby es una variable libre. Con respecto a la oxidación mínima que se va a producir se lo cuida con pintura antioxidante.

### 4.3. Modelado 3D de los componentes del sistema

En la Figura 3.11 se puede observar el modelo del sistema lineal construido.



Figura 3.11 Sistema Lineal Multieje – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

La simulación de esfuerzos de los componentes se muestra a continuación en donde se analiza bajo carga si el componente cumple con el diseño planteado. El diseño del sistema final se lo puede ver en el **Anexo F**.

#### 4.3.1. Soporte principal

El soporte principal se puede ver en la Figura 3.12.

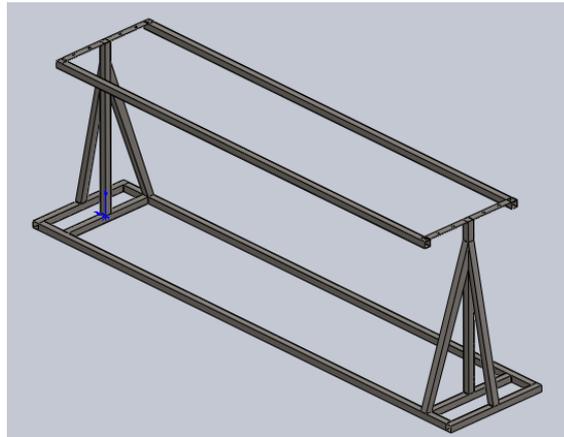


Figura 3.12 Soporte Principal Estructura – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Las cargas son distribuidas de manera uniforme en cada extremo del soporte con 6.8 kg en cada uno, lo cual para el estudio estático se aplica una carga de 67N. (Ver Figura 3.13).

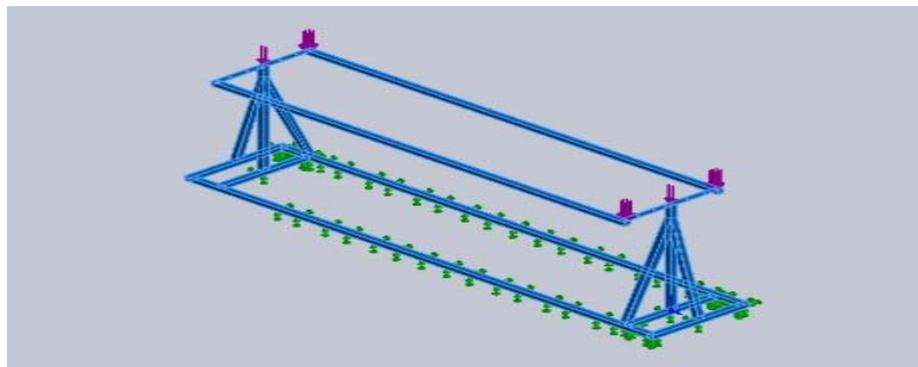


Figura 3.13 Cargas estáticas - Soporte Principal – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Para la simulación con elementos finitos, se usó un mallado fino con un número total de nodos de 16485, y un número total de elementos de 8167, el mallado sobre el soporte principal se puede observar en la Figura 3.14.

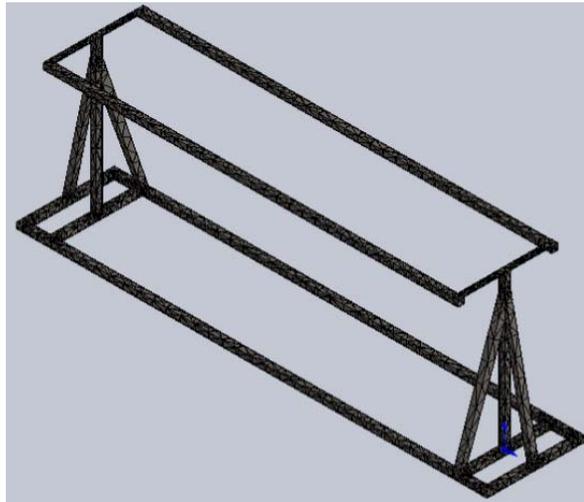


Figura 3.14 Mallado - Soporte Principal – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Los resultados de la simulación que se han obtenido se muestran a continuación:

#### 4.3.1.1. Resultado del estudio de Tensión de von Mises

En la Figura 3.15 se puede ver los resultados desprendidos del análisis realizado en SolidWorks dan un esfuerzo von Mises máximo de 120.200.304 (N/m<sup>2</sup>).

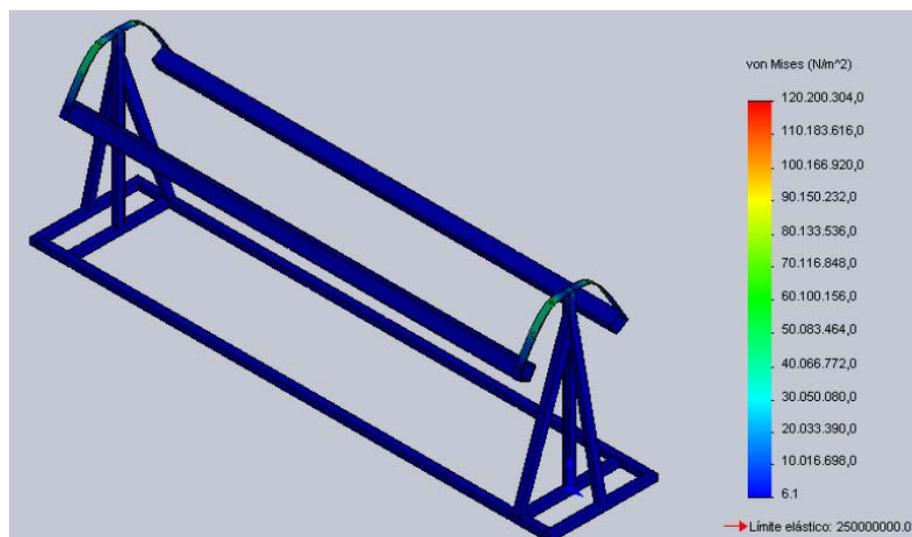


Figura 3.15 Resultado del estudio Von Mises – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

- **Análisis.**

La resistencia a la fluencia del acero estructural es de 250 Mpa. Para que el diseño se valide se debe cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_r \leq [\sigma]$$

Ecuación 3-1

El esfuerzo permisible del acero estructural es:

$$[\sigma] = 0.66S_y$$

Ecuación 3-2

Siendo  $S_y$  la resistencia a la fluencia del acero.

$$[\sigma] = 0.66 \times 250 \text{ Mpa} = 165 \text{ Mpa}$$

Se puede ver que el máximo esfuerzo real es de 121 Mpa.

Demostrando que:

$$121 \text{ Mpa} \leq 165 \text{ Mpa}$$

Se concluye que el diseño es satisfactorio ya que cumple la condición de la Ecuación 3-1

#### **4.3.1.2. Resultado del estudio URES – Desplazamiento.**

En la Figura 3.16 se puede observar que la máxima deflexión que puede soportar el componente es de 3.9mm al extremo de la estructura. Se considera un diseño satisfactorio ya que el riesgo al desplazamiento estático es muy pequeño.

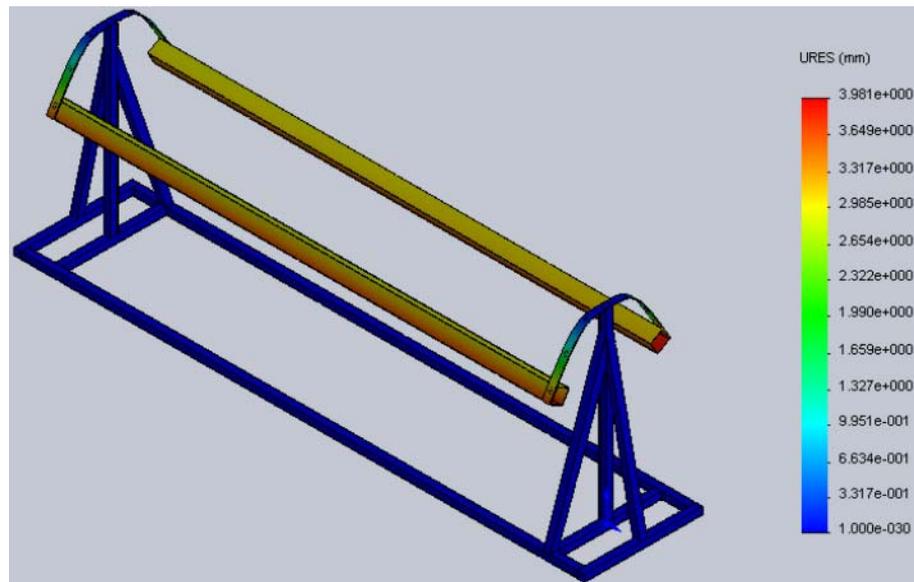


Figura 3.16 Resultados del estudio URES – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

#### 4.3.1.3. Factor de Seguridad

El mínimo factor de seguridad que se ha obtenido es de 2, (ver en la Figura 3.17), lo que indica que el diseño es satisfactorio. El Valor del factor de seguridad entra entre los parámetros de diseño de estructuras bajo cargas estáticas ( $F_s=1.25$  a 2), en donde se concluye que hay un alto grado de confianza en todos los datos de diseño.

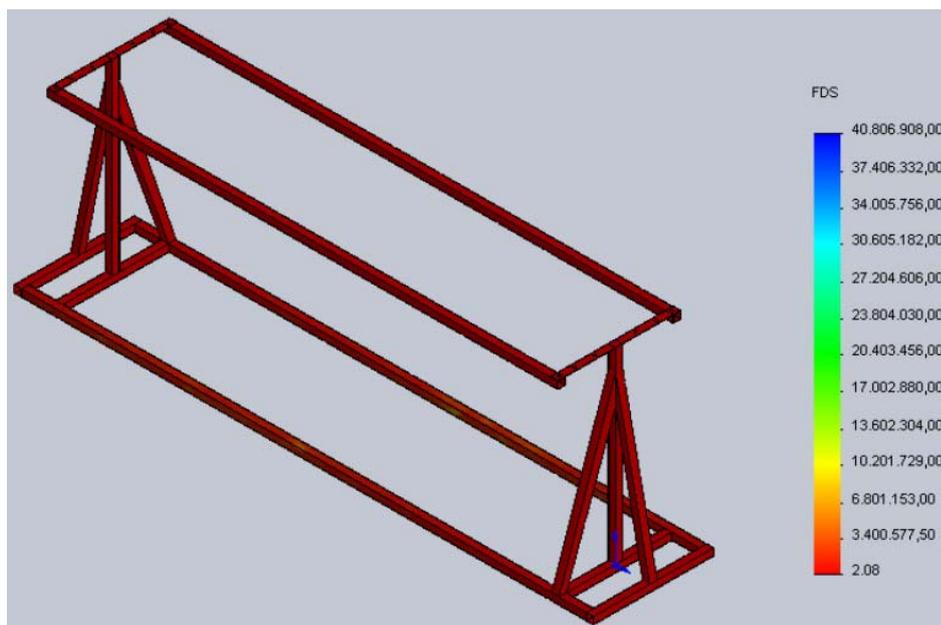


Figura 3.17 Factor de seguridad, Soporte principal - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

#### 4.3.2. Perfil Guía X

El perfil de acero del eje X se puede ver en la Figura 3.18.

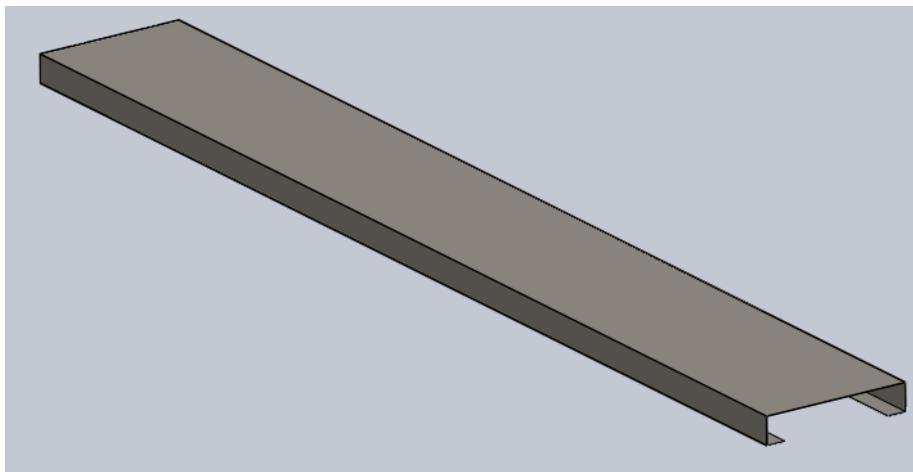


Figura 3.18 Perfil Guía eje X – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Las cargas son distribuidas de manera uniforme en cada extremo del perfil con 3 kg en cada lado como se puede ver en la Figura 3.19 lo cual para el estudio estático se aplica una carga de 30N.

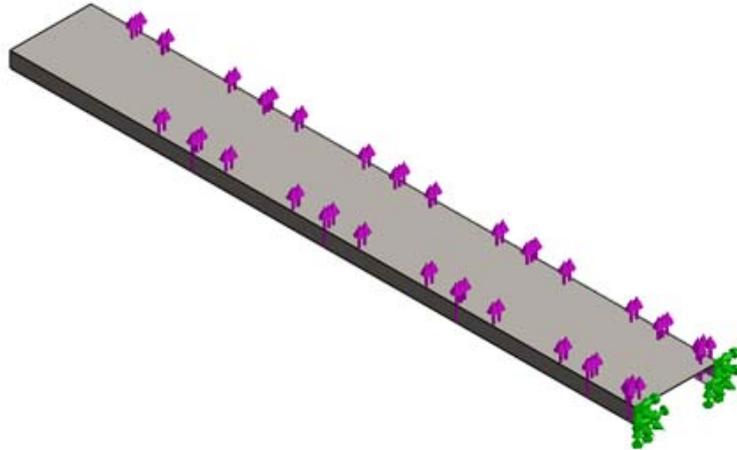


Figura 3.19 Cargas estáticas, Perfil Guía eje X – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Para la simulación con elementos finitos, se usó un mallado fino con un número total de nodos de 79734, y un número total de elementos de 39470, el mallado sobre el perfil se puede observar en la Figura 3.20.

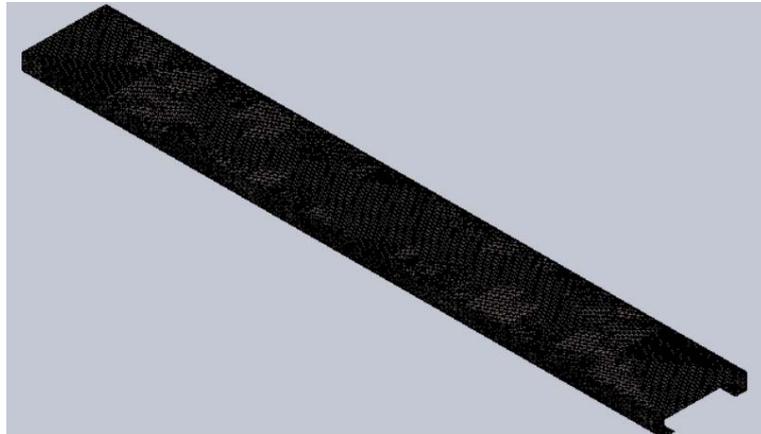


Figura 3.20 Mallado, Perfil Guía eje X – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Los resultados de la simulación que se han obtenido se muestran a continuación:

#### 4.3.2.1. Resultado del estudio de Tensión de von Mises

En la Figura 3.21 se puede ver que los resultados desprendidos del análisis realizado en SolidWorks dan un esfuerzo von Mises máximo de 5.136.039 (N/m<sup>2</sup>).

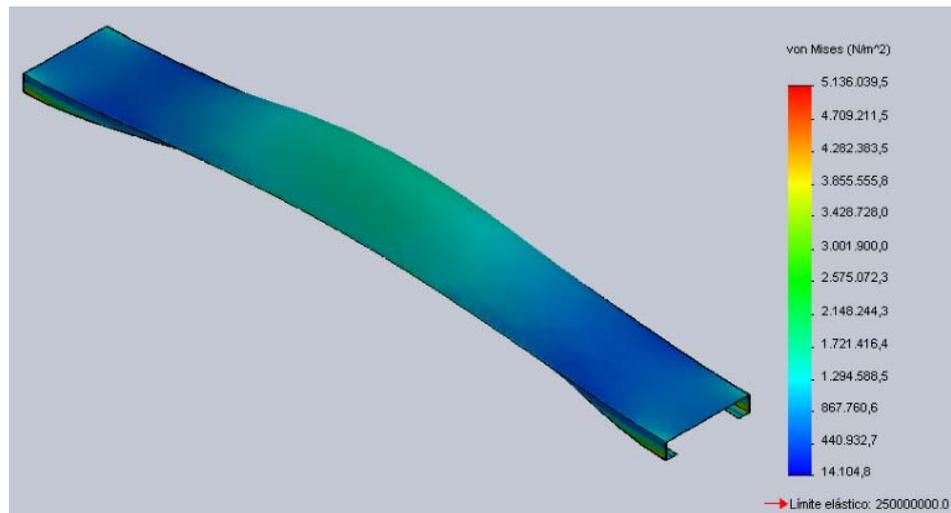


Figura 3.21 Resultado del estudio Von Mises – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Para que el diseño se valide se debe cumplir con la Ecuación 3-1.

Como dato se puede ver que el máximo esfuerzo real es de 6 Mpa y la resistencia a la fluencia del acero  $S_y$  es de 250 Mpa.

Por lo que cumpliendo con la condición de la Ecuación 3-2 se demuestra que:

$$6Mpa \leq 165Mpa$$

Ecuación 3-3

De esta manera se puede concluir que el diseño es satisfactorio ya que cumple la condición de la Ecuación 3-3.

#### 4.3.2.2. Resultado del estudio URES – Desplazamiento.

En la Figura 3.22 se puede observar que la máxima deflexión que puede soportar el componente es de 0.214mm. Se considera un diseño satisfactorio ya que el riesgo al desplazamiento estático es nulo.

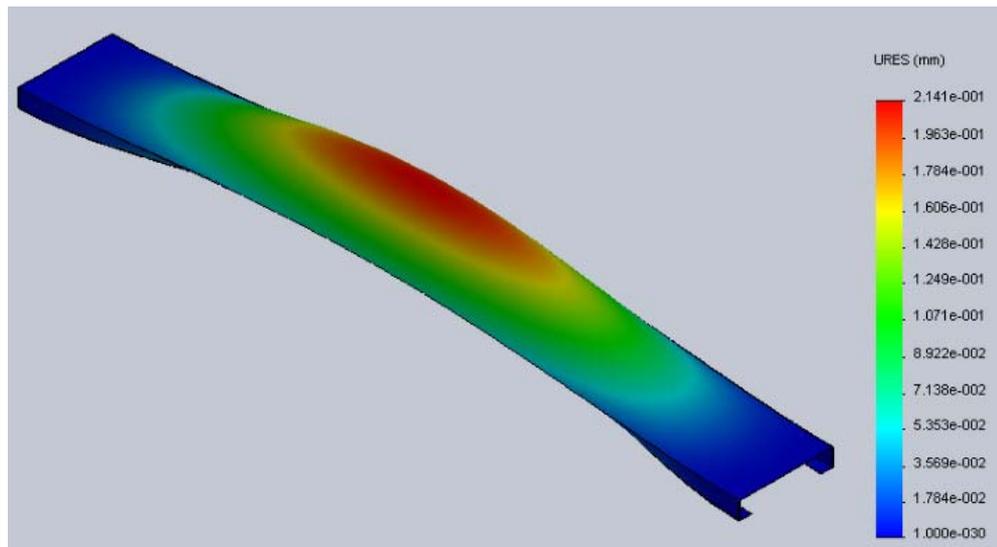


Figura 3.22 Resultados del estudio URES - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

#### 4.3.2.3. Factor de seguridad

El mínimo factor de seguridad es de 42. Se considera un elemento satisfactorio ya que las tensiones y deformaciones a las que se somete el componente son las esperadas. El diseño se considera adecuado.

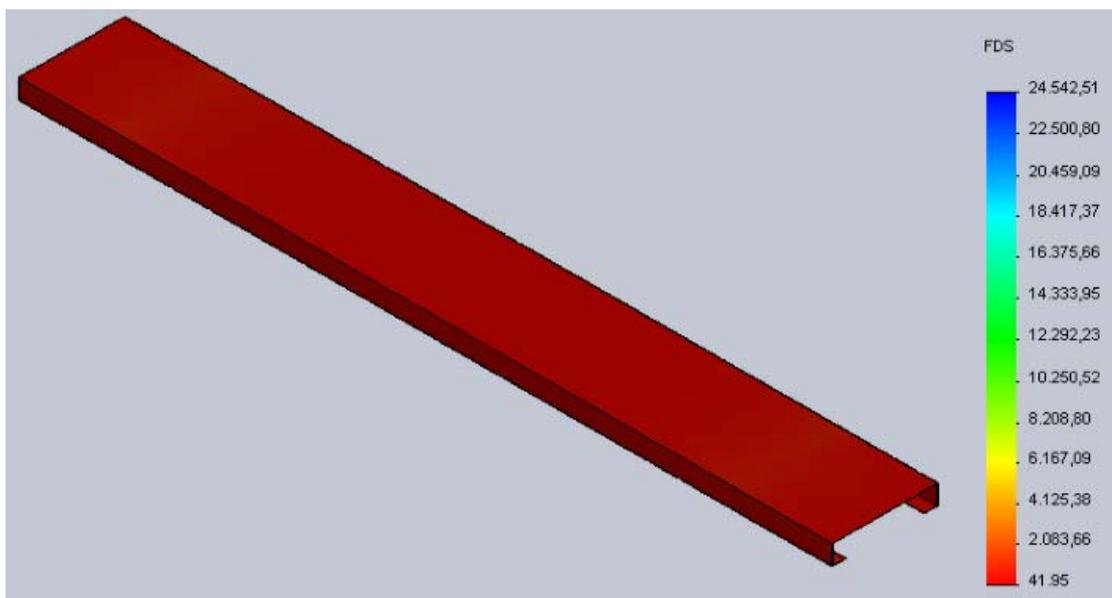


Figura 3.23 Factor de seguridad Perfil eje X - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

#### 4.3.3. Soporte Cámara

El soporte para la cámara hecho de Nylon se puede ver en la Figura 3.24.

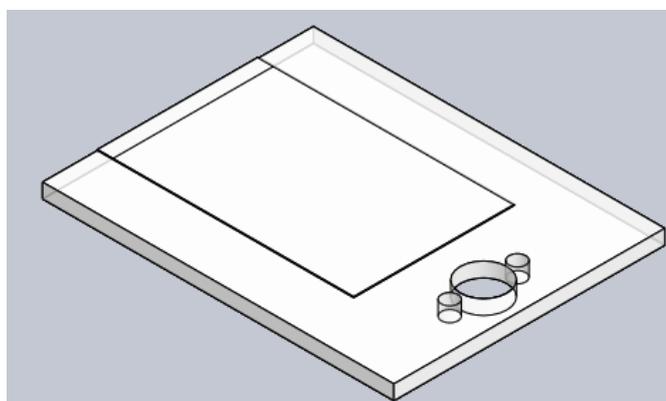


Figura 3.24 Soporte Cámara - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Las cargas son distribuidas de manera uniforme en la parte que se ubica la cámara soportando una carga de 2kg como se ve en la Figura 3.25, lo cual para el estudio estático se aplica una carga de 20N.

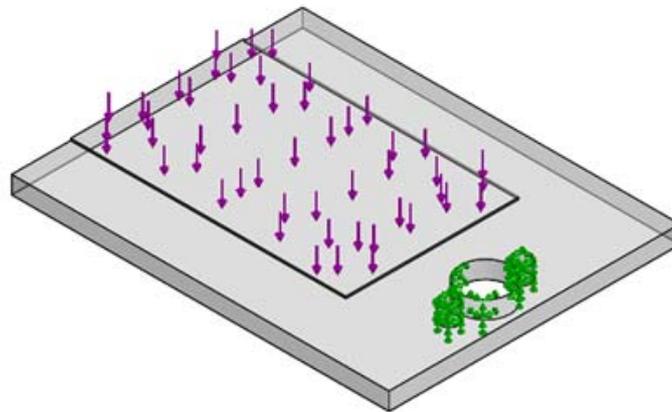


Figura 3.25 Cargas estáticas, Soporte Cámara - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Para la simulación con elementos finitos, se usó un mallado fino con un número total de nodos de 131239, y un número total de elementos de 85014, el mallado sobre el soporte principal se puede observar en la Figura 3.26.

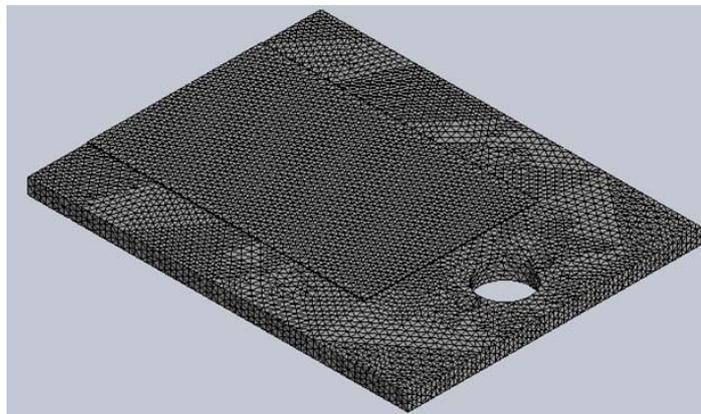


Figura 3.26 Mallado, Soporte Cámara - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Los resultados de la simulación que se han obtenido se muestran a continuación.

#### 4.3.3.1. Resultado del estudio de Tensión de von Mises

En la Figura 3.27 se puede ver los resultados desprendidos del análisis realizado en SolidWorks dan un esfuerzo von Mises máximo de 3.304.915 (N/m<sup>2</sup>).

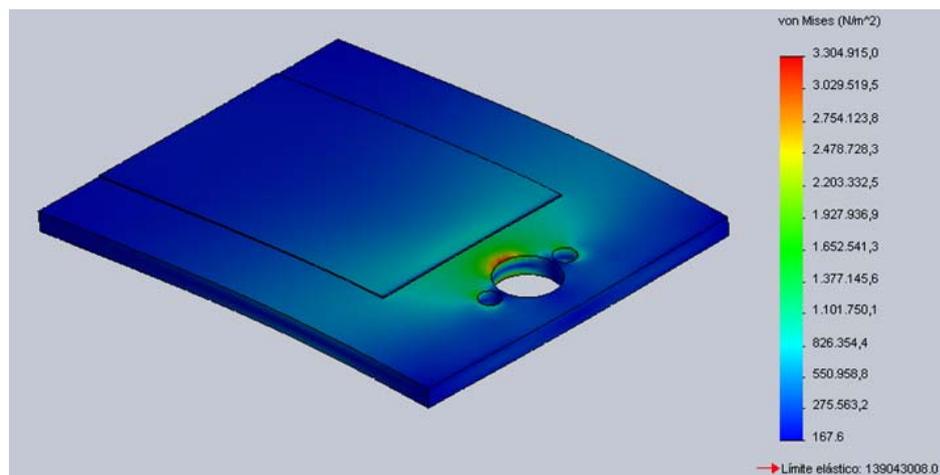


Figura 3.27 Resultado del estudio Von Mises – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Para que el diseño se valide se debe cumplir con la Ecuación 3-1. Como dato se puede ver que el máximo esfuerzo real es de 4 Mpa y la resistencia a la fluencia del Nylon Sy es de 139 Mpa.

Por lo que cumpliendo con la condición de la Ecuación 3-2 se demuestra que:

$$4Mpa \leq 91 Mpa$$

Ecuación 3-4

De esta manera se puede concluir que el diseño es satisfactorio ya que cumple la condición de la Ecuación 3-4.

#### 4.3.3.2. Resultado del estudio URES – Desplazamiento.

En la Figura 3.28 se puede observar que la máxima deflexión que puede soportar el componente es de 0.23mm. Se considera un diseño satisfactorio ya que el riesgo al desplazamiento estático es nulo.

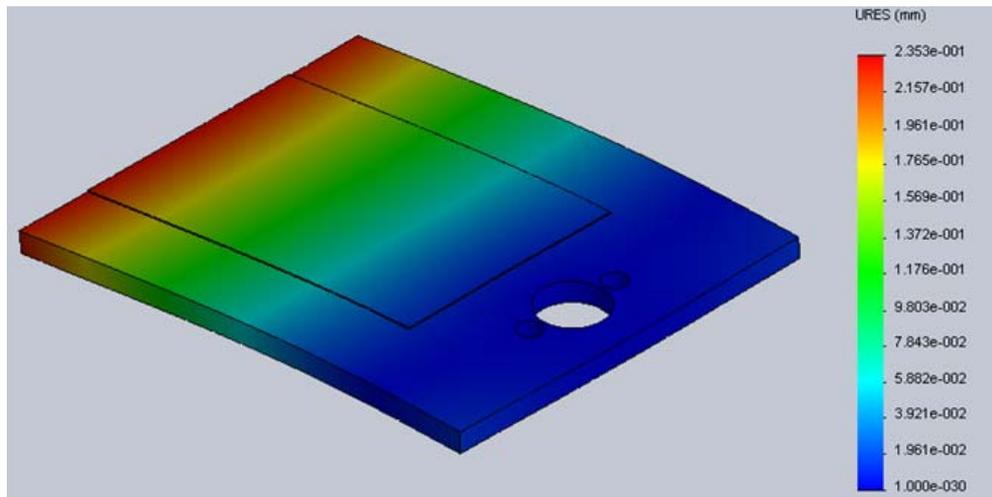


Figura 3.28 Resultados del estudio, URES - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

#### 4.3.3.3. Factor de seguridad

El mínimo factor de seguridad que se ha obtenido es de 28.26. Se considera un elemento satisfactorio ya que las tensiones y deformaciones a las que se somete el componente son las esperadas. El diseño se considera adecuado.

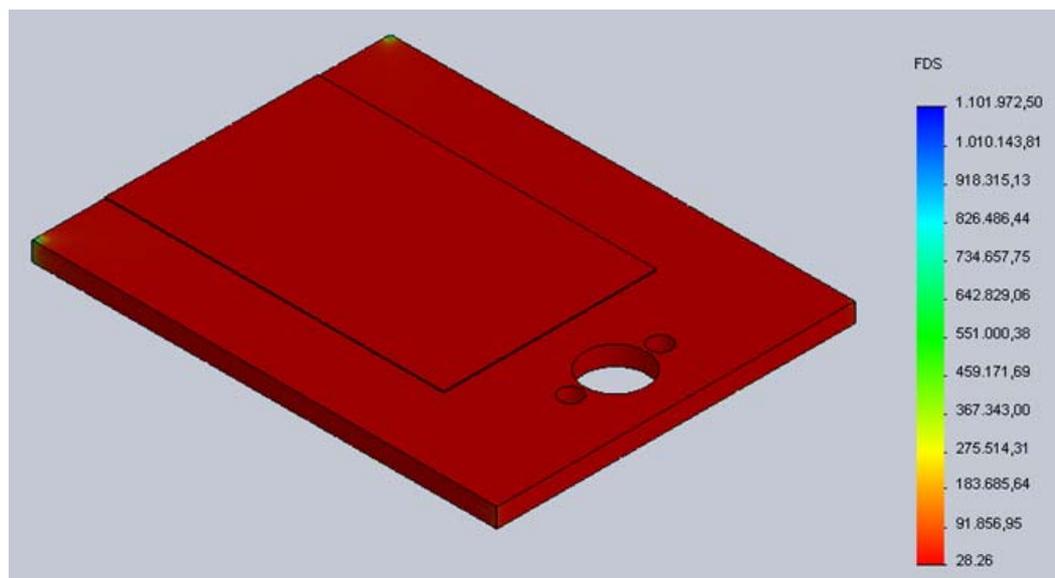


Figura 3.29 Factor de Seguridad, Soporte Cámara - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

#### 4.3.4. Carro eje X

En la Figura 3.30 se puede ver el carro que se usara en el eje x.

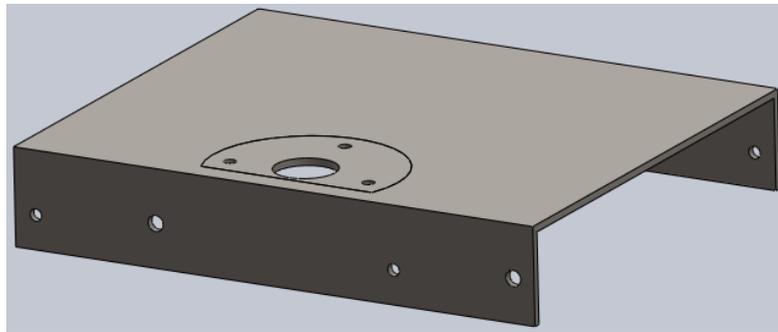


Figura 3.30 Carro eje X- Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Las cargas son distribuidas de manera uniforme en la parte donde se concentra el peso del eje que contendrá a la cámara soportando una carga de 3kg como se ve en la Figura 3.31, lo cual para el estudio estático se aplica una carga de 30N.

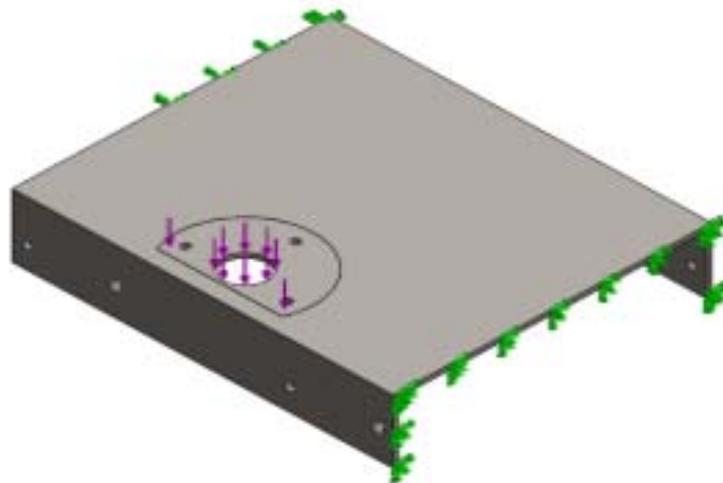


Figura 3.31 Cargas estáticas, Carro eje X - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Para la simulación con elementos finitos, se usó un mallado fino con un número total de nodos de 25904, y un número total de elementos de 12780, el mallado sobre el soporte principal se puede observar en la Figura 3.32.

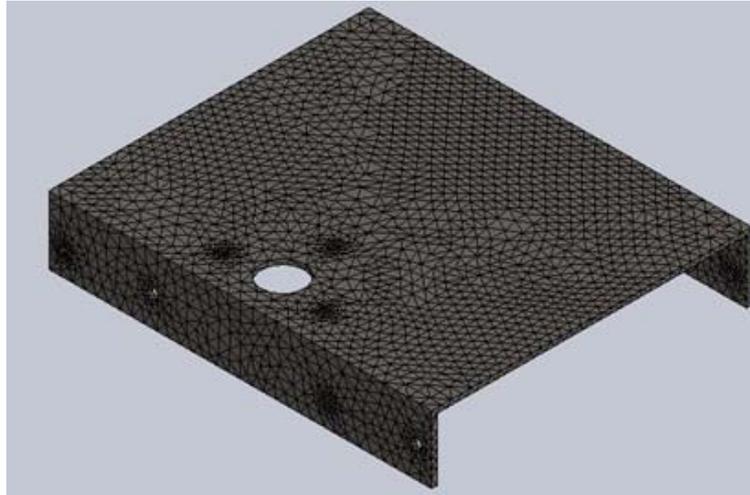


Figura 3.32 Mallado, Carro eje X - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Los resultados de la simulación que se han obtenido se muestran a continuación.

#### **4.3.4.1. Resultado del estudio de Tensión de von Mises**

En la se puede ver el resultado de la simulación dando un esfuerzo von Mises máximo 15.016.937 (N/m<sup>2</sup>).

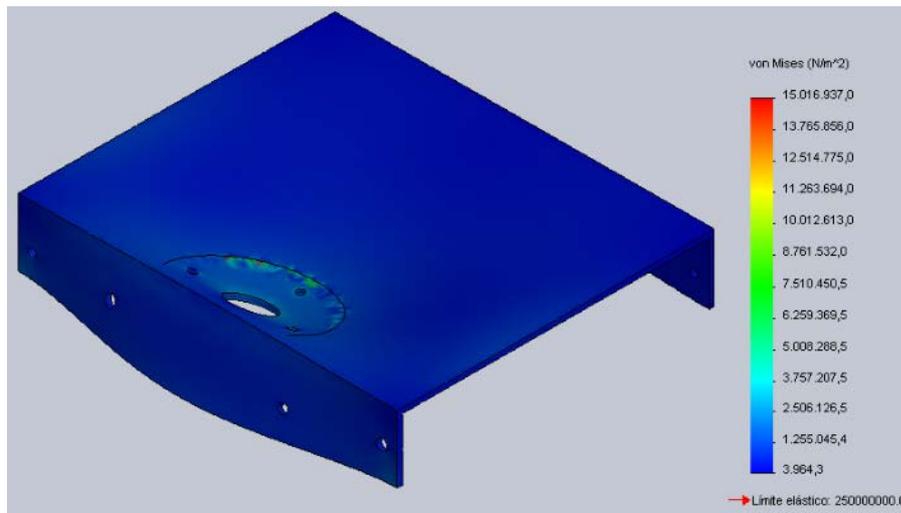


Figura 3.33 Resultado del estudio Von Mises – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Para que el diseño se valide se debe cumplir con la Ecuación 3-1.

Como dato se puede ver que el máximo esfuerzo real es de 16 Mpa y la resistencia a la fluencia  $S_y$  es de 250 Mpa.

Por lo que cumpliendo con la condición de la Ecuación 3-2 se demuestra que:

$$16Mpa \leq 250Mpa$$

Ecuación 3-5

De esta manera se puede concluir que el diseño es satisfactorio ya que cumple la condición de la Ecuación 3-5.

#### 4.3.4.2. Resultado del estudio URES – Desplazamiento.

En la figura se puede observar que la máxima deflexión que puede soportar el componente es de 0.009mm. Se considera un diseño satisfactorio ya que el riesgo al desplazamiento estático es nulo.

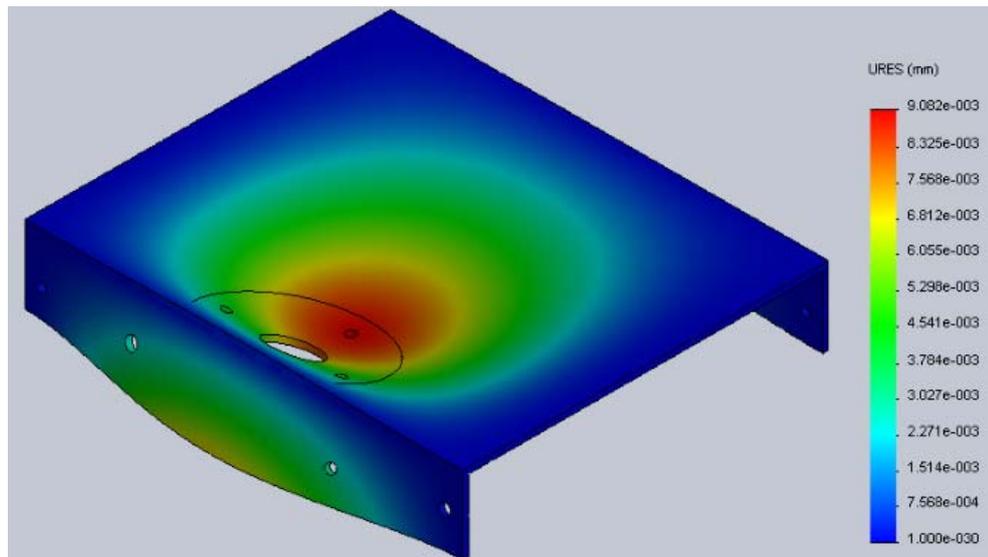


Figura 3.34 Resultados del estudio, URES - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

#### 4.3.4.3. Factor de seguridad.

El mínimo factor de seguridad que se ha obtenido es de 16.65, lo que indica que el soporte es confiable. Se considera un elemento satisfactorio ya que las tensiones y deformaciones a las que se somete el componente son las esperadas. El diseño se considera adecuado.

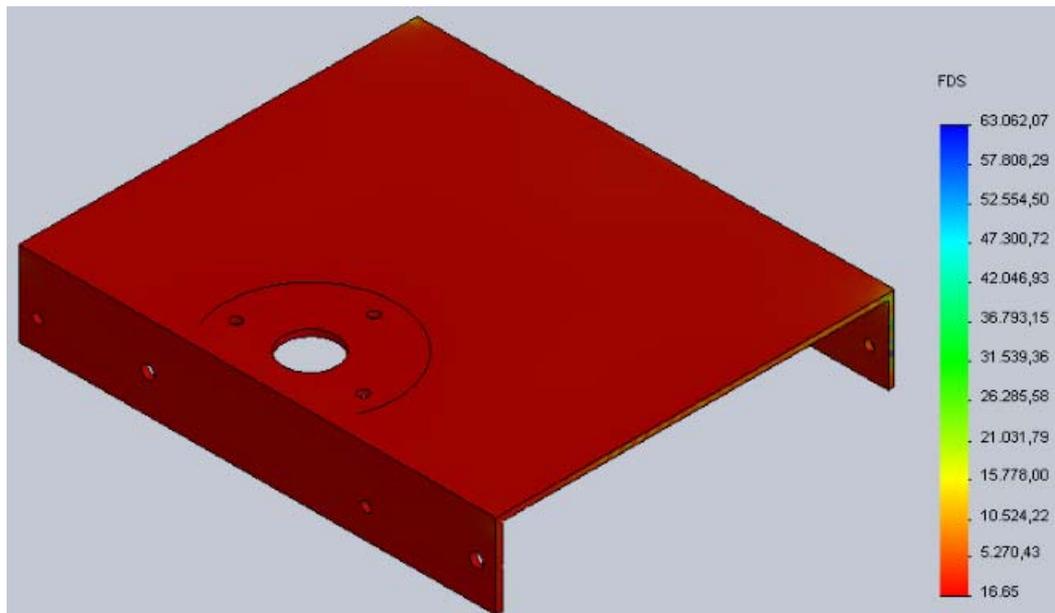


Figura 3.35 Factor de seguridad, Carro eje X - Solidworks.  
(Fuente: Propia).

#### 4.4. Diseño de Mecanismos

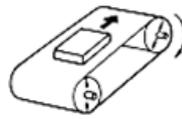
Al comprobar la resistencia y deformación máxima de los elementos estructurales se pudo empezar a dimensionar los mecanismos de transmisión de movimiento relacionados con cada estructura analizada.

##### 4.4.1. Estructura Guía Eje X

###### 4.4.1.1. Determinación de Potencia Requerida

Para determinar la potencia que necesita generar el motor para mover la cámara y su soporte se empezó por determinar la inercia del sistema.

El siguiente modelo matemático simplifica este trabajo sumando las inercias parciales de cada parte del mecanismo.



$$J_{sist} = J_1 + J_2 + J_3 + J_4$$

Ecuación 3-6

Donde J1 es la inercia del primer cilindro/engrane, J2 es la inercia debido al segundo cilindro/engrane, J3 es la inercia debida a al objeto que se desplaza y J4 es la inercia debido a la banda. El resultado final con las inercias parciales del modelo matemático es el siguiente:

$$J_{sist} = \left( \frac{M_1 D_1^2}{8} + \frac{M_2 D_2^2}{8} \cdot \frac{D_1^2}{D_2^2} + \frac{M_3 D_1^2}{4} + \frac{M_4 D_1^2}{4} \right) \cdot 10^{-6} Kg \cdot m^2$$

Ecuación 3-7

Donde M1 y M2 son las masa de los engranes/rodillos, M3 es la masa del objeto desplazándose, M4 es la masa de la correa y D1 y D2 corresponden a los diámetros de los engranes.

El valor de masa de cada elemento se obtiene a partir de la estimación que realiza el programa SolidWorks. Los datos generados por el programa CAD se presentan en **Anexo B**.

En función de los parámetros de la ecuación Ecuación 3-7, los datos a reemplazar son los siguientes:

$$M_1 = M_2 = 0.1 Kg$$

$$M_3 = 3 Kg$$

$$M_4 = 0.05 \text{ Kg}$$

$$D_1 = D_2 = 100 \text{ mm}$$

Reemplazando los valores en la ecuación Ecuación 3-7 se conoce que la inercia de la estructura guía del Eje X es la siguiente:

$$J_{\text{sist}} = 7.875 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

Ecuación 3-8

Multiplicando la inercia por la aceleración angular se obtiene el torque requerido por el motor y con esto la potencia final. En la sección 3.1 se definió la velocidad máxima en 2.5 m/s con una aceleración estimada de 12.5 m/s<sup>2</sup> (aceleración en 0.20 segundos). Por lo tanto el cálculo del torque del motor es el siguiente:

La velocidad angular es igual a:

$$\omega = \frac{v}{D_1/2} \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$$

Sabiendo que la velocidad máxima es de  $v = 2.5 \text{ m/s}$  y diámetro de 9cm (0.09) se obtiene:

$$\omega = \frac{2.5}{0.09/2} = 55.55 \text{ rad/s}$$

Para tener el torque se necesita la aceleración angular por lo que este dato es igual a:

$$\alpha = \frac{\omega}{\Delta t} = \frac{55.55 \text{ rad/s}}{0.20 \text{ s}} = 277.778 \text{ rad/s}^2$$

El torque del sistema es igual a  $T = J_{sist} \cdot \alpha$  lo que se obtiene que el torque del sistema es igual a:

$$T = 2.18 \text{ Nm}$$

$$T = 2.18 \text{ Nm} \cdot \frac{\text{Kg}}{9.81 \text{ N}} \cdot \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}$$

$$T = 22.29 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

Ecuación 3-9

Con este último dato se calcula la potencia que necesita el motor al multiplicarlo con la velocidad angular del sistema.

$$P = T \cdot \omega$$

$$P = 121.099 \text{ W}$$

$$P = 0.16 \text{ HP}$$

Ecuación 3-10

Finalmente con estos datos se debe ingresar a las tablas y gráficos de pre-ingeniería del proveedor para seleccionar el tipo de correa necesaria para la aplicación. Teniendo en cuenta el coeficiente de factor de servicio que indica el proveedor es de 1.2 - (ven **Anexo C**) - la potencia a considerar es la siguiente:

$$P = 0.16 \text{ HP} \cdot FS$$

$$P = 0.2 \text{ HP}$$

Ecuación 3-11

#### 4.4.1.2. Selección de correa

Un mecanismo de correa dentada con un engrane - o polea dentada - se dimensionan en función de 2 parámetros principales:

- ✓ La velocidad lineal del sistema y
- ✓ La potencia generada por el elemento motriz.

Es recomendable empezar el diseño por la correa dentada. La variedad de dimensiones para ese elemento puede ser muy limitado en el mercado nacional, mientras que las poleas dentadas se pueden construir a las medidas que sean necesarias en función del paso y dimensiones de la correa seleccionada.

De la sección previa se obtiene el valor de Potencia (1HP) y la velocidad (60 rad/s = 571 RPM) para ingresar con estos datos al gráfico de selección de tipo de correa. Del gráfico se obtiene la siguiente opción (ver Figura 3.36).

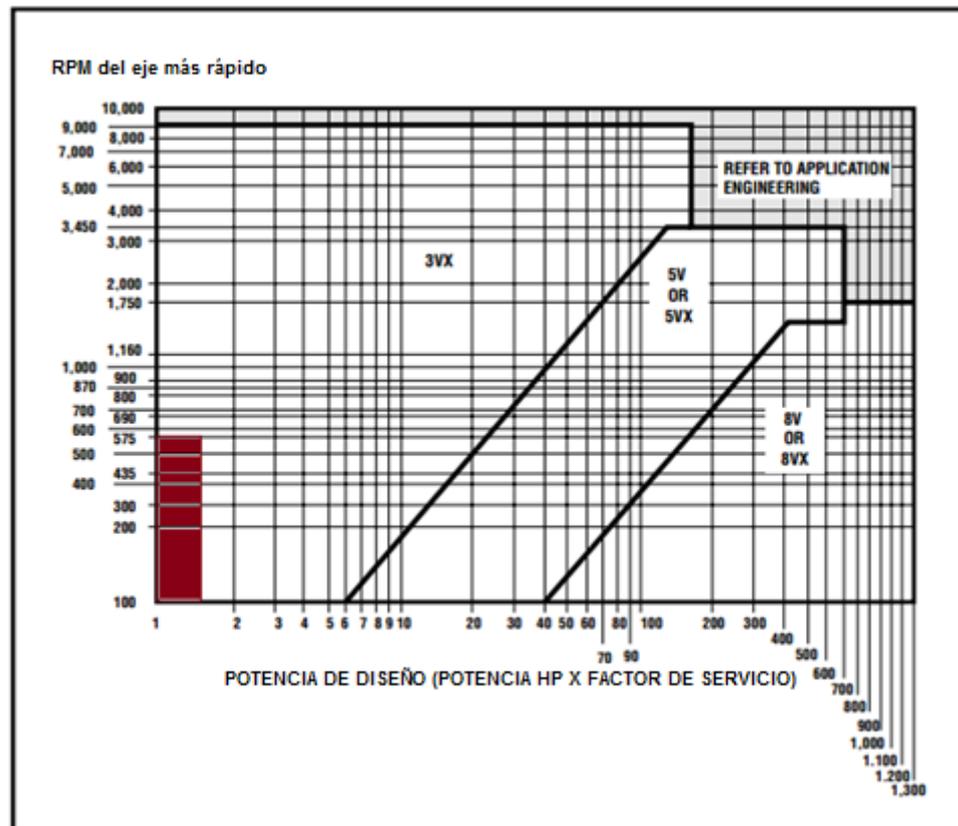


Figura 3.36. Correas Dentadas de Alta y Súper Alta Potencia.  
(Fuente: (Carlisle, 2013)).

La grafica indica que la correa debe ser del tipo 3VX. Analizando detalladamente los resultados, se ratifica que las consideraciones de este proyecto no son de alta potencia, sino más bien con un enfoque de rapidez y estabilidad.

Puesto que la longitud de recorrido sobre el eje X es de 1.40 m, la correa debe tener una longitud aproximada de 2.8 m. Tal especificación es difícil de encontrar en el mercado local, por lo que se prioriza encontrar una correa que tenga esta característica en primera instancia. Esta decisión se toma analizando el resultado de la selección del tipo de correa. Según la potencia y velocidad del mecanismo, el tipo de polea es la más baja dentro de la

clasificación de correas dentadas, por lo que este requerimiento no será difícil de satisfacer.

Con esta premisa la correa seleccionada es la *1700H – 100, Heavy 1/2-inch (H) Pitch Standard Timing Belt* de Jason Industrial Inc (Ver Figura 3.37). Las especificaciones completas se encuentran en el **Anexo D**.



Figura 3.37 Correa dentada seleccionada 1700H – 100.  
(Fuente: (Jason Industrial Inc., 2013)).

Las especificaciones necesarias para este diseño son las siguientes:

- Longitud total: 4.16 m (170 in)
- Paso: 1.27 mm (1/2 in)
- Ancho: 13 mm (La mitad de la correa)

#### **4.4.1.3. Diseño de Polea Dentada**

En función de lo explicado en la Sección 2.5.5.3 y la Ecuación 2-2 se puede diseñar la polea dentada con el número de dientes de la polea, el diámetro de la misma y el paso necesario.

La correa tiene un paso de  $\frac{1}{2}$  in y el diámetro máximo de la polea puede ser de 201 mm (Ver Figura 3.38), pero mientras mayor sea el diámetro mayor será la inercia del sistema (revisar Ecuación 3-7) y no puede ser un

diámetro pequeño porque no permitiría un acople correcto de los dientes de la correa y de la polea dentada.

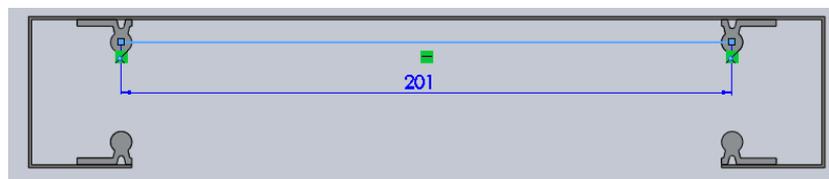


Figura 3.38 Espacio requerido para la instalación de la correa- Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Tomando estas consideraciones se decide mantener un rango de 70 mm a 100 mm el diámetro de la polea dentada. Reemplazando estos valores en la Ecuación 2-2 se obtiene el siguiente número de dientes de la polea dentada:

$$N = \frac{\pi \cdot d_p}{p_c} = \frac{\pi \cdot 90 \text{ mm}}{12.7 \text{ mm}} = 22 \text{ dientes}$$

Finalmente los parámetros de diseño de la polea son los siguientes:

- Paso: ½ in
- Ancho de cara: ½ in
- Diámetro de paso: 90 mm

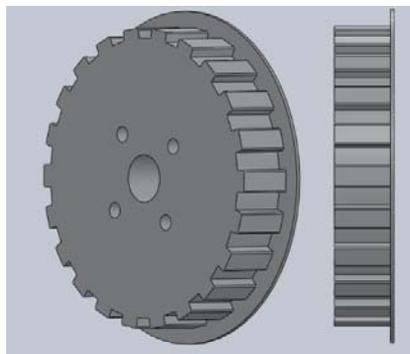


Figura 3.39 Polea dentada Eje X – Solidworks.  
(Fuente: Propia).

El material utilizado para la polea dentada es el aluminio para satisfacer el objetivo del sistema correa-engrane ya que en base de pruebas se pudo confirmar que el enganche que se produce con un material liviano en los dientes con la correa es más fuerte que con un material pesado. El ahorro en peso de material es de 1.8 kg lo que es resulta satisfactorio para no producir peso al sistema y el motor no consuma más que su corriente nominal (1.5 A).

#### 4.4.1.4. Determinación de Longitud de Correa

La longitud completa de la correa dentada es de 4.16m originalmente. Para esta aplicación esta longitud debe reducirse. Utilizando la Ecuación 2-8 se calcula la longitud exacta de la correa dentada en función de la posición de los ejes de rotación.

$$L_p = 2(125) + \frac{\pi}{2}(9 + 9) + \frac{(9 - 9)^2}{4(125)} = 278.27 \text{ cm}$$

Ecuación 3-12

#### 4.4.2. Estructura Guía Eje Y

El análisis realizado en la sección 4.4.1.1 se debe replicar con la estructura Guía del Eje Y. A continuación se presenta las ecuaciones necesarias con los cambios de variables correspondientes a esta estructura.

##### 4.4.2.1. Determinación de Potencia Requerida

$$M_1 = M_2 = 0.035 \text{ Kg}$$

$$M_3 = 13 \text{ Kg}$$

$$M_4 = 0.01 \text{ Kg}$$

$$D_1 = D_2 = 33 \text{ mm}$$

$$J_{sist} = \left( \frac{M_1 D_1^2}{8} + \frac{M_2 D_2^2}{8} \cdot \frac{D_1^2}{D_2^2} + \frac{M_3 D_1^2}{4} + \frac{M_4 D_1^2}{4} \right) \cdot 10^{-6} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{sist} = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

Sabiendo que la velocidad en el eje Y es de  $v = 1 \text{ m/s}$  y diámetro de 3.3cm (0.033) se obtiene

$$\omega = \frac{1}{0.033/2} = 60.60 \text{ rad/s}$$

Para tener el torque se necesita la aceleración angular por lo que este dato es igual a:

$$\alpha = \frac{\omega}{\Delta t} = \frac{60.60 \text{ rad/s}}{1 \text{ s}} = 60.60 \text{ rad/s}^2$$

El torque del sistema es igual a  $T = J_{sist} \cdot \alpha$  lo que se obtiene que el torque del sistema es igual a:

$$T = 0.212 \text{ Nm}$$

$$T = 2.18 \text{ Nm} \cdot \frac{\text{Kg}}{9.81 \text{ N}} \cdot \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}$$

$$T = 2.16 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

Ecuación 3-13

Con este último dato se calcula la potencia que necesita el motor al multiplicarlo con la velocidad angular del sistema.

$$P = T \cdot \omega$$

$$P = 131.022 \text{ W}$$

$$P = 0.176 \text{ HP}$$

Con el dato de proveedor para la selección de correa el dato del factor de seguridad para la correa va a ser de 1.5 por lo que la potencia es igual a:

$$P = 0.176 \text{ HP} \cdot FS$$

$$P = 0.2634 \text{ HP}$$

Ecuación 3-14

#### **4.4.2.2. Selección de correa**

Los datos necesarios para ingresar a las tablas de pre-ingeniería son la potencia (0.2634 HP) y la velocidad de operación (578 RPM).

El resultado es muy parecido a la selección realizada en la previa sección:

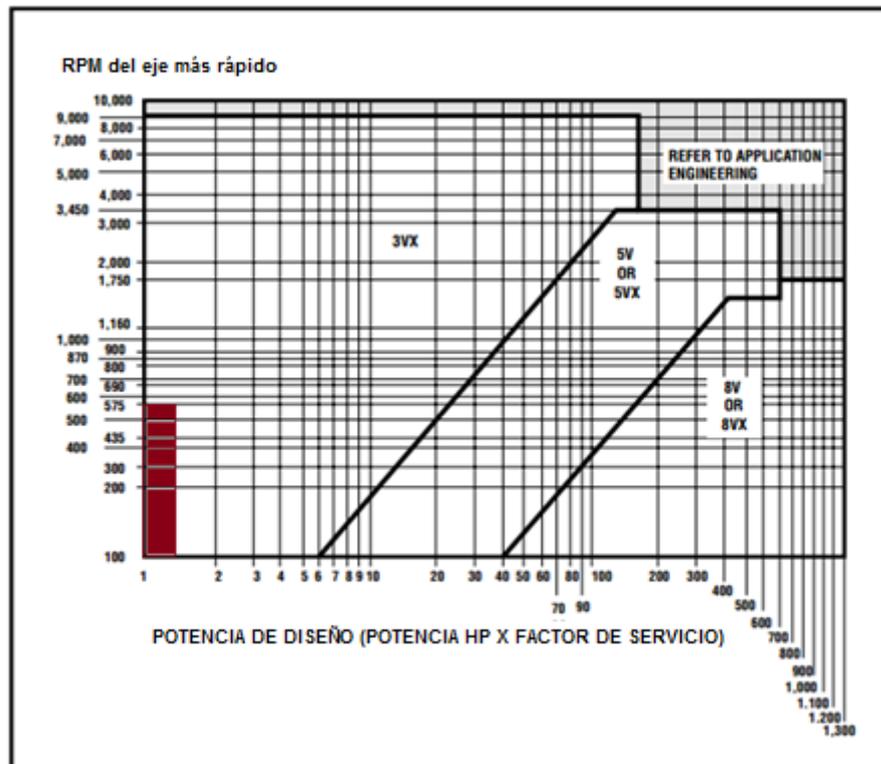


Figura 3.40 Velocidad vs Potencia.

(Fuente: (Carlisle, 2013)).

Nuevamente la selección del tipo de banda dentada resulta en un tipo de poca potencia y baja velocidad.

A diferencia del mecanismo banda-piñón de la estructura guía del Eje X, una de las consideraciones principales en este análisis no es la longitud de la correa, sino el grosor de la misma por el reducido espacio donde se ubicará el mecanismo.

Debido a que el resultado de la selección de correa define una aplicación con esfuerzos y cargas pequeñas es necesario que el enfoque de esta selección sea nuevamente en asegurar la estabilidad y movilidad del sistema.

Por esta razón la correa seleccionada es la *450L-100, Light 3/8-inch (L) Pitch Standard Timing Belt* de Jason Industrial: (Jason Industrial Inc., 2013)



Figura 3.41 Correa dentada seleccionada 450L-100.  
(Fuente: (Jason Industrial Inc., 2013)).

Las especificaciones de este elemento son las siguientes:

- Longitud total: 1.14 m (45 in)
- Paso: 9.5 mm (3/8in)
- Ancho: 13 mm (1/2 in)

#### 4.4.2.3. Diseño de Polea Dentada

El paso de la correa es de 9.5 mm y el diámetro máximo de la polea puede ser de 40 mm (Ver siguiente figura).

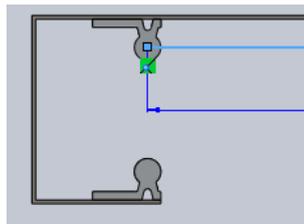


Figura 3.42 Espacio requerido para la instalación de la polea-Solidworks.  
(Fuente: Propia).

Puesto que un diámetro muy pequeño puede causar que los dientes del piñón y la correa no se enlacen correctamente se define el diámetro de la polea dentada de 33 mm. Reemplazando estos valores en la Ecuación 2-2 se obtiene el número de dientes de la polea dentada:

$$N = \frac{\pi \cdot d_p}{p_c} = \frac{\pi \cdot 33 \text{ mm}}{9.5 \text{ mm}} = 11 \text{ dientes}$$

El elemento simulado con SolidWorks tiene el siguiente aspecto:

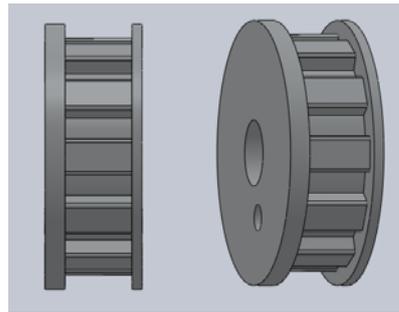


Figura 3.43 Polea dentada Eje Y-Solidworks.  
(Fuente: Propia).

En base de pruebas realizadas en el eje X el material utilizado para la polea dentada en este eje Y es el aluminio. El ahorro en peso de material es de 0.9 kg lo que es resulta satisfactorio para no producir peso al sistema y el motor no consuma más que su corriente nominal (1.5 A).

#### 4.4.2.4. Determinación de Longitud de Correa

En este caso la longitud completa de la correa dentada es de 114 cm. Para este eje de movimiento esta longitud también debe reducirse. Utilizando la Ecuación 2-8 se calcula la longitud exacta de la correa dentada:

$$L_p = 2(13.8) + \frac{\pi}{2}(3.3 + 3.3) + \frac{(3.3 - 3.3)^2}{4(13.8)} = 37.9 \text{ cm}$$

## 5. CAPITULO 5: DISEÑO ELECTRÓNICO

### 5.1 Especificaciones de funcionamiento eléctricas y electrónicas

De manera similar como se explicó en el capítulo anterior los parámetros de funcionamiento para definir el sistema mecánico, ahora es necesario mencionar aquellos parámetros que son fundamentales para diseñar el sistema electrónico.

#### 5.1.1 Especificaciones sobre ejes de movimiento

Sobre el eje X existe un desplazamiento máximo de 1.40 m. La velocidad máxima de desplazamiento que se estable es 2.5 m/s. Asumiendo que la aceleración a la velocidad máxima se realiza en 0.20 segundo, obtenemos la aceleración máxima es de 12.5 m/s<sup>2</sup>.

En el eje Y se necesita un desplazamiento máximo de 15 cm a una velocidad de 1.5m/s. Las consideraciones a tomar en cuenta son las siguientes:

- Sobre este eje se deslizará la *Estructura Guía del eje X*. La longitud de esta estructura es igual a 1.40 m lo que implica que es necesario utilizar un motor a los dos extremos para generar el movimiento adecuado. De no hacerlo así se tendría un movimiento desalineado de la estructura móvil. Al tener un movimiento descoordinado de ambos extremos se puede generar un sobrecalentamiento del motor por exceso de esfuerzo.
- El control sobre estos motores se debe realizar de tal forma que trabajen en sincronía.

La siguiente ilustración describe lo antes mencionado:

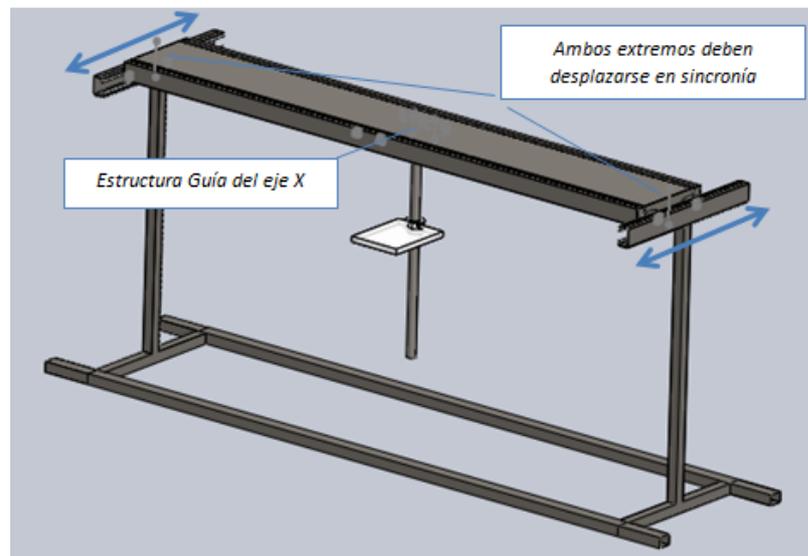


Figura 5.1 Desplazamiento sobre Eje Y - Solisworks.  
(Fuente: Propia).

### 5.1.2 Consideraciones de desplazamiento

En función de los valores de velocidad y desplazamiento máximos se deduce que la cámara recorrerá todo el tramo de desplazamiento con una rapidez máxima de 2.5 m/s, lo que implica que es necesario proteger al sistema para que no golpee contra los topes de la estructura en cada extremo. Con este propósito se incluye fines de carrera en los extremo de las rieles de desplazamiento. Los fines de carrera indicarán al control lógico cuando la cámara se encuentra muy cerca del tope para desactivar el motor.

Aunque la velocidad en el eje Y no sea la misma, es pertinente aplicar la misma consideración para evitar choques contra los extremos de la estructura.

## 5.2 Determinación de la potencia requerida del motor

En el Capítulo 2 se demostró un método gráfico para determinar el torque y potencia que necesita generar un motor para una aplicación específica. Este método se usó para determinar la potencia necesaria en un sistema analizando las diferentes condiciones de funcionamiento.

### 5.2.1 Motor conductor de movimiento sobre el eje X

Inicialmente se describe el ciclo de trabajo continuo del motor que genera el movimiento sobre el eje X. Asumiendo el ciclo de trabajo más exigente para el motor - cuando la persona trota/corre - el trabajo realizado presenta las siguiente características:

Tiempo S	Intervalo S	Velocidad m/s	Velocidad Rad/s ( $\omega=v/r$ )	Velocidad RPMS
0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
0.20	0.20	2.5	55.55	530.5
0.40	0.20	2.5	55.55	530.5
0.60	0.20	0.0	0.0	0.0

Tabla 5-1 Tabla de velocidades.  
(Fuente: Propia).

La información tabulada se representa sobre un plano cartesiano de velocidad vs tiempo (ver Figura 5.2).

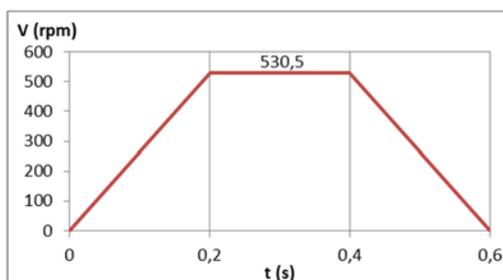


Figura 5.2 Velocidad vs Tiempo - Motor eje X.  
(Fuente: Propia).

En función del perfil de velocidades se obtiene la aceleración del sistema (ver Figura 5.3).

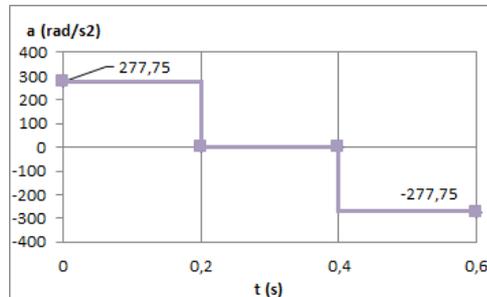


Figura 5.3 Aceleración del sistema  
(Fuente: Propia).

Analizando el gráfico claramente se identifica que la máxima aceleración se encuentra en el primer tramo del ciclo de funcionamiento. Para poder finalizar con el cálculo del torque del sistema, resta obtener el valor de la inercia de los componentes. En la sección 4.4.1.1 del capítulo 4 se especifica este valor como  $7.875 \times 10^{-3} \text{ Kg m}^2$ .

Finalmente el torque que requiere el motor es de:

$$T = 277.75 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \cdot 7.875 \cdot 10^{-3} \text{Kg} \cdot \text{m}^2 = 2.18 \text{ Nm}$$

$$T=22.29 \text{ Kg cm.}$$

Lo que implica que el motor debe obtener una velocidad mínima de 530 rpm con un par mínimo de 22.29 Kg. cm.

Con el dato de torque necesario se eligió el servo HK15338 para cumplir con los requerimientos de torque y velocidad.



Figura 5.4 Servomotor HK15338.  
(Fuente: (HobbyKing, 2014)).

Las especificaciones del motor son las siguientes:

- Torque: 19.80kg @ 4.8v, 25kg @ 7v
- Peso: 175g
- Velocidad: 0.23 / 60deg @ 4.8v, 0.20 / 60 deg @ 6v
- Voltaje: 4.8v~7v

### 5.2.2 Motor conductor de movimiento sobre el eje Y

Evaluando el ciclo de trabajo de los motores que guían el movimiento sobre el eje Y, se determina que no cumple un ciclo determinado y repetitivo, sino más bien un trabajo esporádico. Para elegir el motor en este eje se aplicó únicamente el análisis de velocidad y aceleración máxima de funcionamiento.

Como se especificó en el Capítulo 3, la velocidad máxima de desplazamiento en este eje es de 1 m/s para recorrer una distancia máxima de 15 cm. La respuesta para el desplazamiento sobre este eje no necesita ser rápida, ya que según el peso del sistema en el eje se alcanza una velocidad de 1m/s en 1 segundo, por lo que obtenemos una aceleración de  $1\text{m/s}^2$ .

Con la información de la polea dentada de la sección 4.4.2.3, se identifica que el radio de giro será la mitad del diámetro de paso de la polea, es decir, 16,5 mm.

En estas condiciones la velocidad angular es de 60.60 rad/s y la aceleración de 60.60 rad/s<sup>2</sup>.

Puesto que la inercia calculada del sistema es de  $3.5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  se obtiene un torque igual a:

$$T = 60.60 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \cdot 3.5 \cdot 10^{-3} \text{Kg} \cdot \text{m}^2$$

$$T = 0.212 \text{ Nm}$$

$$T = 0.212 \text{ Nm} \cdot \frac{\text{Kg}}{9.81 \text{ N}} \cdot \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}$$

$$T = 2.16 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

El torque que se necesita en este eje es bastante bajo y en base a pruebas realizadas no se escogió un motor dc por sus pequeñas dimensiones con pequeños torques. Por este motivo se escogió utilizar el mismo motor que genera el movimiento sobre el eje X ya que se puede regular la potencia para que genere un torque bajo a un voltaje menor. Este servomotor posee un eje de metal de un diámetro de 7mm. Este diámetro y el eje dentado que posee el servomotor permiten acoplar con mayor facilidad la polea dentada que guiará el movimiento de la correa. Ver Figura 5.5.



Figura 5.5 Ejes metálicos - Servomotor HK15338  
(Fuente: Propia).

A continuación se presentan las dimensiones estructurales del servomotor por la cuales se decidió utilizar este tipo de servomotor:

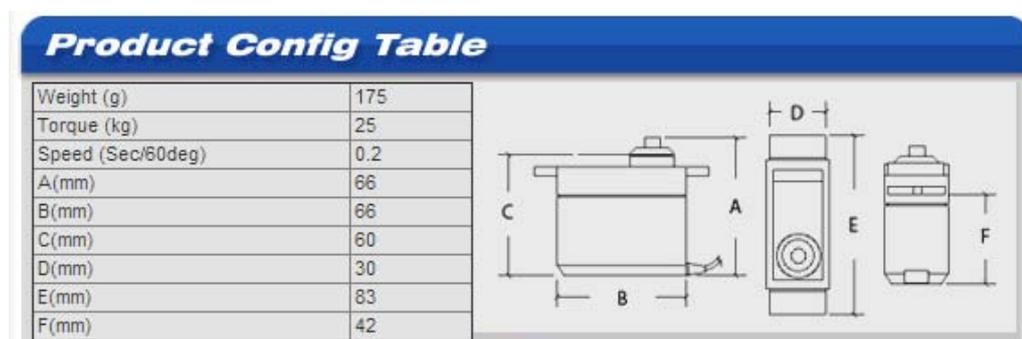


Figura 5.6 Dimensiones de Motor HK1538.  
(Fuente: (HobbyKing, 2014).

### 5.3 Diseño de circuito de control

El circuito de control necesita cumplir las siguientes funciones de mando:

- Control de giro y velocidad del Motor Sobre el Eje X
- Control de giro del Motor sobre el Eje Y
- Generación de señales eléctricas a partir de la activación de los Fines de Carrera mecánicos.
- Regulación de voltaje para señales de control.

### 5.3.1 Fuente de Energía

La función principal es alimentar todo el sistema sin causar daño alguno a los componentes electrónicos, motivo por el cual la selección de la fuente dependió principalmente del consumo de energía que los motores van a requerir para su funcionamiento.

Cada motor consume teóricamente 1.5 A para su funcionamiento pero el mayor consumo de energía de esta aplicación se genera cuando los tres motores funcionan simultáneamente llegando a un consumo de 2,6 A y en el arranque 3.3 A.

En pruebas de funcionamiento del motor del eje X se verifica que el mayor consumo de corriente se genera cuando el motor arranca. En esta situación el motor consume un pico de corriente de 2.2 A. Luego del arranque este motor no consume más de 1.5 A.

En las pruebas de funcionamiento de los motores para el eje Y el pico de corriente no es alto pues, como se vio en la sección 5.2, el torque necesario para mover la estructura es mínimo, por consiguiente la corriente máxima de funcionamiento para estos motores es de 1.1 A.

En cuanto al voltaje que necesita proporcionar la fuente hacia los motores, las especificaciones de los mismos indican un voltaje de trabajo referencial de 7 VDC. En base a pruebas y especificaciones dadas por el

proveedor se indicó que el voltaje de trabajo es de 12 VDC para tener una velocidad considerada y que incluso voltajes menores a este (7 VCD como indica el fabricante) no lograban accionar al motor.

En base a estas pruebas, la fuente de energía se eligió en base a las siguientes características:

- Voltaje DC de 12V
- Corriente DC de 3 A

Bajo estas especificaciones la fuente de energía seleccionada se la puede ver en la Figura 5.7.



Figura 5.7 Fuente de energía seleccionada 12V 3 A.

(Fuente: (e-bay, s.f.)).

Las características son las siguientes:

- Entrada: AC 110-240V 50/60 Hz
- Salida: 12V 3A
- Adaptador con Plug modelo US
- Uso interno únicamente.

### 5.3.2 Circuito para controlar el Giro de los motores

En base a la corriente que consumen los motores el integrado para elaborar la configuración electrónica y controlar los motores debe soportar un amperaje DC máximo de 4A y un voltaje de trabajo de 12v.

A base de pruebas y por evitar recalentamiento en el sistema el circuito que se eligió es el L298 por su protección contra calentamientos, amperaje máximo de 4A y voltaje de operación de hasta 46v. El circuito de configuración se lo puede ver Figura 5.8. (Detalles técnicos del circuito se pueden ver en el **Anexo I**).

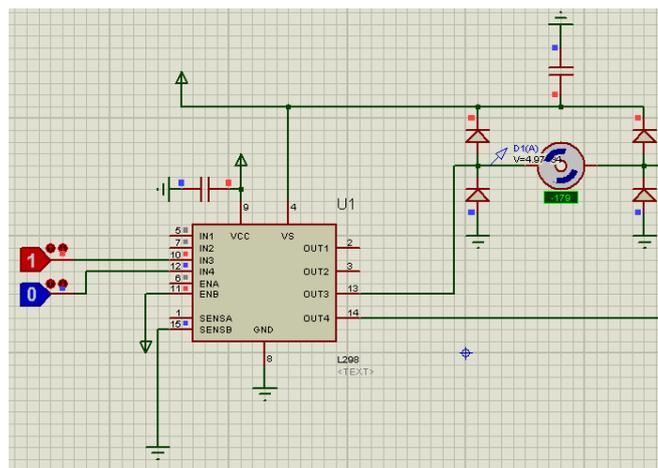


Figura 5.8 Circuito configuración Puente H - Isis 7 Professional  
(Fuente: Propia).

El circuito incluye diodos de potencia para controlar el paso de corriente al motor en cada cambio de giro. La selección de diodos de potencia 1N5408 permite que el motor consuma hasta 3A. Aunque en pruebas de funcionamiento el motor llega a picos de 2A en el arranque, se utiliza elementos de mayor amperaje para evitar un recalentamiento de los mismos.

Los capacitores de 100nF permiten mantener el voltaje de alimentación estable en cada cambio de giro. Los pines considerados para esta conexión tiene la siguiente función (ver Tabla 5-2).

Pines	Descripción
Pin 1, Pin 15, Pin 8	Conexión a tierra
Pin 10, Pin 12	Entradas para el control de giro
Pin 11, Pin 4	Voltaje de alimentación al motor
Pin 13, Pin 14	Salidas al motor
Pin 9	Voltaje de alimentación al circuito

Tabla 5-2 Descripción de pines - Puente H.  
(Fuente: Propia).

El integrado dispone de cuatro pines para las señales de control. Cada par de pines puede controlar un motor diferente. Como salida tiene 2 pares de pines de potencia para cada motor DC. Para que exista el cambio de sentido de giro es necesario ingresar señales lógicas de 0V o 5V para activar el movimiento según la configuración que se puede ver en la Tabla 5-3.

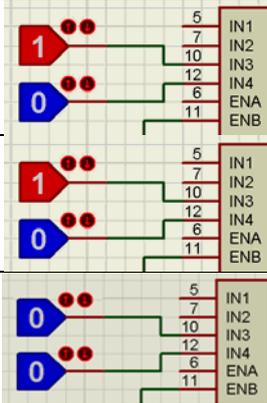
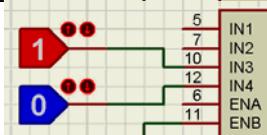
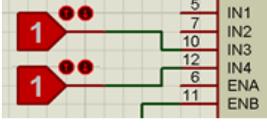
Señales de Control	Control de Giro
	Cambio de sentido de Giro.
	Cambio de sentido de Giro.
	No existe variación en el sentido de giro del motor.
	No existe variación en el sentido de giro del motor.

Tabla 5-3 Configuración para generar giro a motor.  
(Fuente: Propia).

El circuito de control de los motores se puede ver en la Figura 5.9.

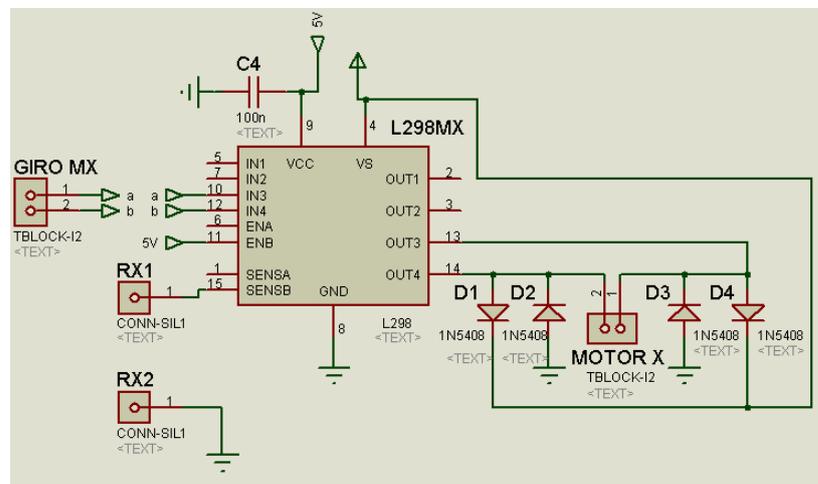


Figura 5.9 Circuito configuración Puentes H con borneras - Isis 7 Professional. (Fuente: Propia).

En el pin 15 del circuito se deja abierta la opción de incluir una resistencia de potencia en el circuito físico/baquelita. Esta resistencia cumple la función de limitar la potencia con la que se alimenta al motor, es decir, limita la velocidad máxima del motor. Esta consideración se aplica principalmente a los motores del Eje Y para limitar su velocidad a 1 m/s.

### 5.3.2.1 Control de Velocidad por Modulación de Pulsos

Una ventaja adicional del circuito integrado L298 es la capacidad de trabajar con una señal de PWM. Para cumplir esta función existen dos opciones que presenta el circuito integrado:

- La señal de PWM ingresa por un pin de *Enable* o
- La señal de PWM ingresa por medio del pin de alimentación del integrado.

En esta aplicación la señal de control de velocidad ingresa por el pin 10 del L298. El otro pin de control se maneja con una señal digital.

#### 5.4 Diseño de Placa Electrónica

Para el diseño de la placa electrónica se considera restringir el voltaje de trabajo de 5v. Para esto se utiliza el circuito Lm7805 para regular la entrada que proporciona la fuente de 12v a 5v mediante un regulador de voltaje. (Más detalles técnicos del circuito se pueden ver en el **Anexo J**).

El circuito de aplicación del circuito se muestra en la Figura 5.10.

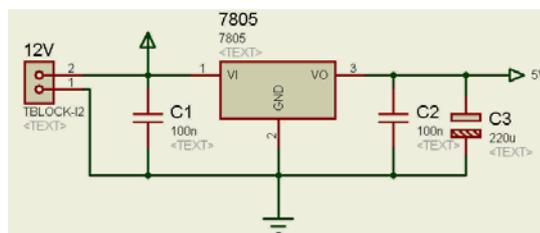


Figura 5.10 Circuito configuración Lm7805 - Isis 7 Professional.  
(Fuente: Propia).

El circuito para generar una señal eléctrica a partir del accionamiento de los fines de carrera se puede ver en la Figura 5.11.

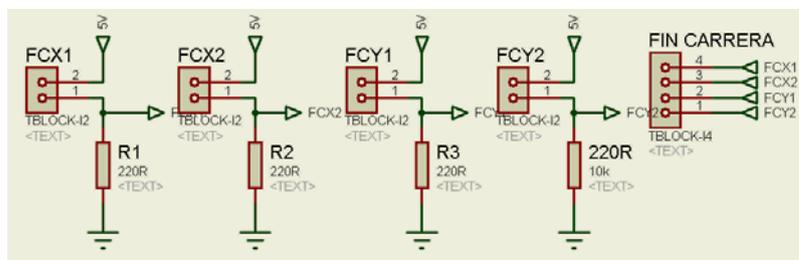


Figura 5.11 Circuito configuración señales para fines de carrera - Isis 7 Professional.  
(Fuente: Propia).

En base a estas especificaciones el diseño de la tarjeta electrónica se realiza apoyándose de la normativa IPC 2221. La placa electrónica tendrá las siguientes características:

- Las líneas de tierra y voltaje deben ubicarse muy cercanas entre sí.
- La distribución de energía para circuitos digitales debe hacerse al inicio y no al último como suele acostumbrarse en circuitos análogos. Todas las interconexiones, incluyendo la tierra y voltaje deben terminar en un borde o área de referencias en la placa.
- Mantener los componentes sensibles al calor y la radiación lo más apartados posibles (utilizando disipadores de calor).

En base a esas características los elementos sobre la placa se ve en la Figura 5.12.

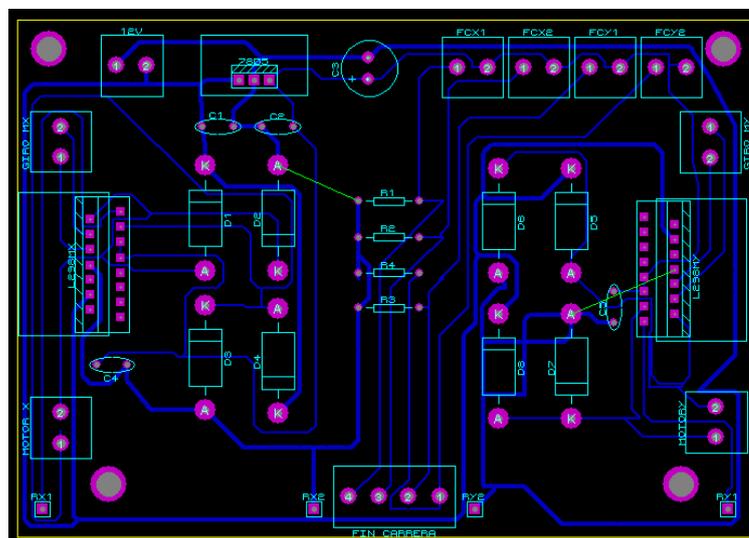


Figura 5.12 Diseño de la placa electrónica Ares Professional.  
(Fuente: Propia).

Los elementos que mayor calor generan- los integrados L298- se ubican en extremos opuestos con disipadores de calor en cada uno de ellos. Las

borneras de salida y entrada de señales se asignan por grupos y se ubican en los bordes de la tarjeta. La conexión a la fuente de alimentación se la realiza de igual manera sobre un extremo de la placa electrónica.

#### 5.4.1 Definición de espesor de conductores

La normativa IPC 2221 también define el ancho correcto del conductor en función de la temperatura de funcionamiento del circuito y el amperaje máximo.

Estos dos datos se deben ingresar en las gráficas que proporciona la Norma en mención. Para esta aplicación se toma como amperaje máximo la cantidad de amperios que suministra la fuente de voltaje (3 Amperios) y una temperatura máxima de funcionamiento de 20 °C.

El siguiente gráfico interpola la información para determinar cuál debe ser la sección transversal del conductor.

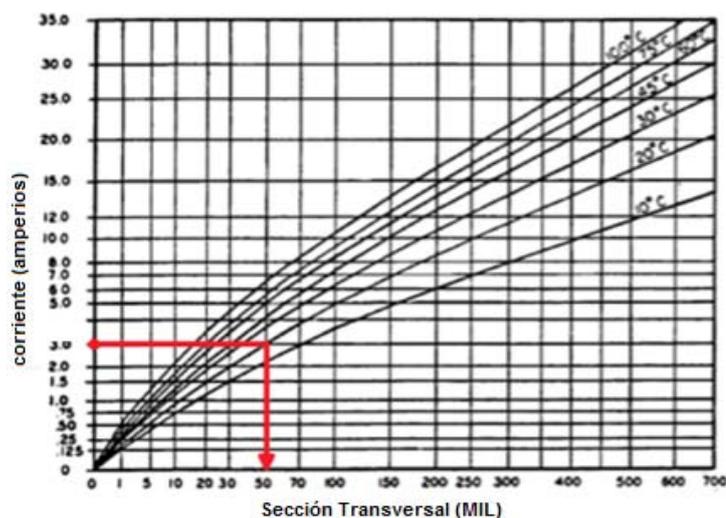


Figura 5.13 Tabla para determinar la sección transversal del conductor.  
(Fuente: Propia).

Este dato es necesario para ingresarlo en una segunda gráfica de pre-ingeniería. Cruzando esta información con el grosor del cobre laminado se puede obtener el ancho del conductor para esta placa electrónica. Ver Figura 5.14.

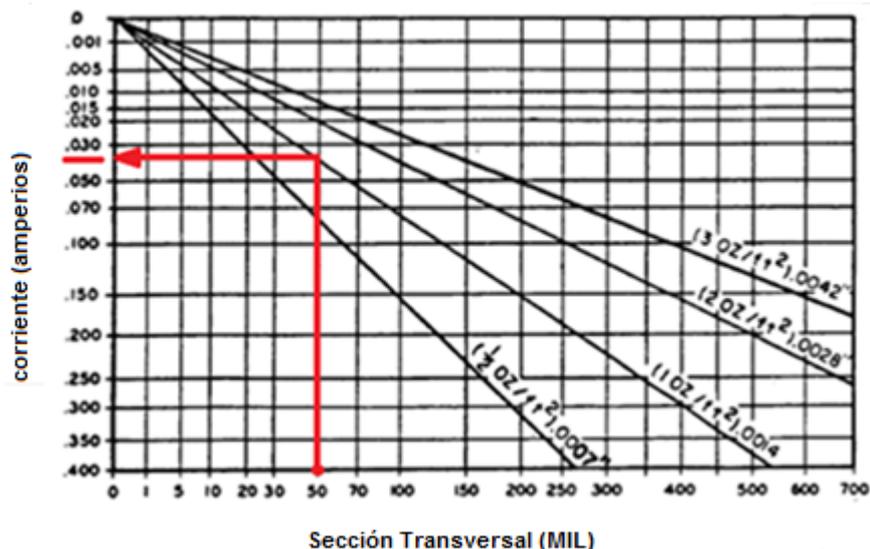


Figura 5.14 Tabla para determinar el ancho de pista de la placa electrónica.  
(Fuente: Propia).

El ancho del conductor debe ser de 0.030 plg. Esta información se define en los parámetros de diseño del software CAD con el cual se va a crear la placa electrónica. En la Figura 5.15 muestra el ingreso de estos valores (0.030 plg para los conductores potencia y 0.020 plg para los conductores de señales):

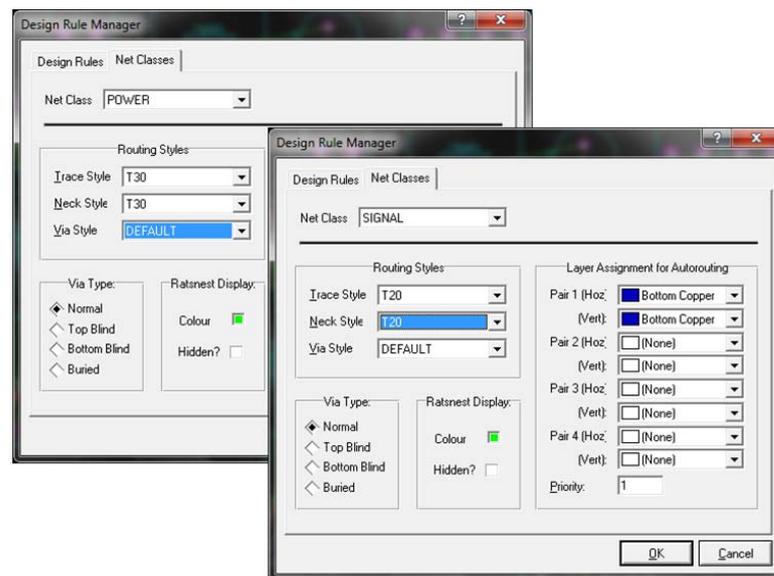


Figura 5.15 Ingreso de datos según diseño establecido- Ares Profesional.  
(Fuente: Propia).

## 5.5 Diseño de Gabinete de control

El diseño del gabinete de control se hizo en base a las dimensiones de la placa electrónica y a la altura que se le da instalando la tarjeta de adquisición dentro del mismo. Por esa razón el gabinete contendrá tanto la tarjeta de adquisición de datos y la tarjeta electrónica.

Para ello se utilizó una caja de plástico con medidas 165mm x 120mm x 65mm y se ubicó en un espacio de 200mm en la parte posterior de la estructura principal como se puede ver en la Figura 5.16.



Figura 5.16 Caja instalada en el sistema.  
(Fuente: Propia).

Al gabinete llegara todo el cableado tanto de los motores y fines de carrera lo que se aprovecha el espacio al conectar las señales de la DAQ y la tarjeta electrónica.

### 5.5.1 Ubicación de la placa electrónica

La ubicación de la tarjeta electrónica será en el centro sujeta con tuercas y pernos como se puede ver en la Figura 5.17.

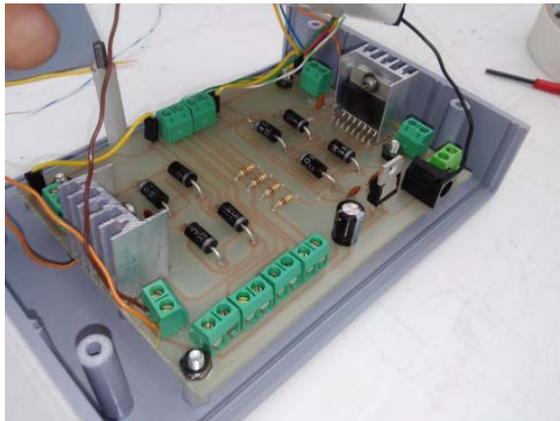


Figura 5.17 Ubicación de la placa electrónica.  
(Fuente: Propia).

Adicional a esto la tarjeta de adquisición se ubica en la parte superior de la tarjeta electrónica como se ve en la Figura 5.18.

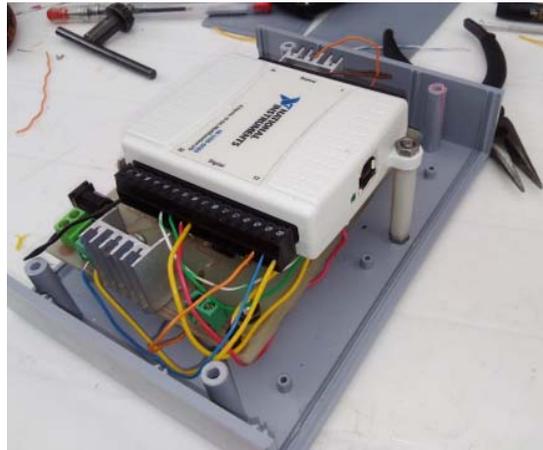


Figura 5.18 Ubicación de la Daq.  
(Fuente: Propia).

Al momento de conectar las señales de control y de mando se ahorra espacio y se evita mucho cableado gracias al diseño de la placa al poner borneras para cada señal. De esta manera no existe complicación al ubicar la tarjeta de adquisición en el mismo gabinete (ver en la Figura 5.19).



Figura 5.19 Caja de control instalada.  
(Fuente: Propia).

## 6. CAPITULO 6: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

### 6.1. Sistema de adquisición de datos.

La tarjeta NI DAQ 6009 es parte fundamental del sistema de adquisición de datos. Según las características mencionadas en la sección 2.4.1 se utilizarán de la tarjeta los canales que se describen en la Tabla 5-4.

<b>Canales</b>	<b>Descripción</b>
Un canal analógico de salida AO.	Se necesitó un canal analógico ya que el control de uno de los motores se lo realizó mediante Modulación de Ancho de Pulso PWM.
Siete canales digitales, entre ellos cuatro canales fueron configurados como entradas digitales y tres canales fueron configurados como salidas digitales.	Los cuatro canales digitales permiten limitar el movimiento del sistema mediante la lectura de fines de carrera que serán ubicados tanto en el eje x, y. Los tres canales de salida servirán para poder enviar la señal de control de giro a los motores con el puente H, mencionado en la sección 5.3.2.

Tabla 5-4 Descripción de canales usados de la My Daq.  
(Fuente: Propia).

#### 6.1.1. Configuración de puertos de la DAQ 6009

Para probar el funcionamiento de la My DAQ se utilizó el programa Measurement and Automation Explorer mencionado en la sección 2.3.1. El programa administra los periféricos que estén conectados al computador como se puede ver en la Figura 5.20 en donde reconoce la tarjeta NI usb 6009.

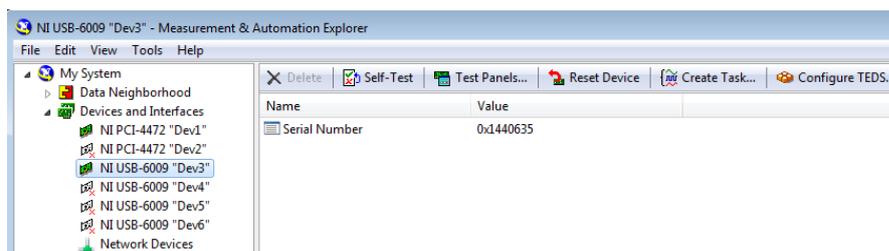


Figura 5.20 My Daq NI usb 6009 – MAX (Labview).  
(Fuente: Propia).

Para ver sus puertos y su ubicación en la tarjeta se tiene la opción Device Pinouts, para tener una referencia visual para las terminales de E/S del dispositivo. Ver Figura 5.21.

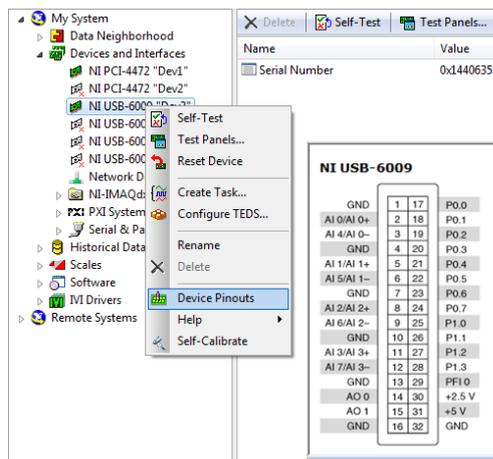


Figura 5.21 Device Pinouts - NI My Daq (Labview).  
(Fuente: Propia).

Como se puede ver en la Figura 5.20 se dispone de un menú con la opción de Reset Device y Self Test, esto permite que antes de comenzar a programar se puedan limpiar las referencias que tenga el dispositivo, ruta o tarea que esté relacionada con la tarjeta (Ver Figura 5.22) y verificar si el controlador Ni-daqMX es capaz de comunicarse exitosamente con el dispositivo (Ver Figura 5.23).

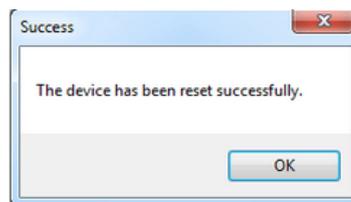


Figura 5.22 Ventana una vez después de resetear el dispositivo con éxito-Labview.  
(Fuente: Propia).

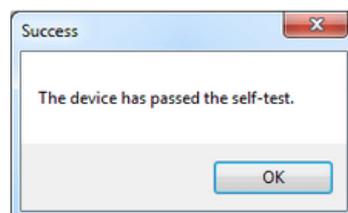


Figura 5.23 Ventana una vez después que el driver de la Daq este correctamente instalado-Labview.  
(Fuente: Propia).

## 6.2. Instrumentación virtual – Daq Assistant

Una vez probado el dispositivo, se procede a utilizarlo en Labview por medio del Daq Assistant. Con el asistente se configura los puertos antes mencionados de acuerdo a las necesidades del sistema.

Para ello se abre un VI nuevo de labview y se selecciona Daq Assistant en las paletas de medición del software. Ver Figura 5.24.

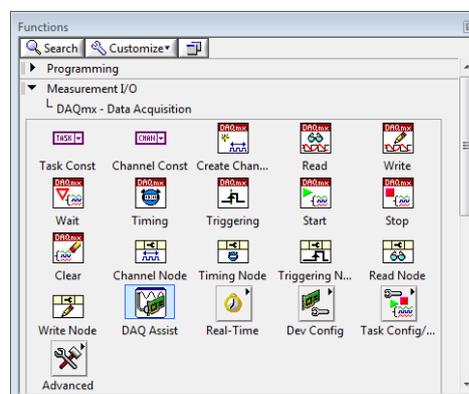


Figura 5.24 Daq Assistant - Labview.  
(Fuente: Propia).

Se configura los canales de la Daq siguiendo los pasos del asistente. En este caso se configuró siete puertos digitales (tres de salida y cuatro de entrada).

### 6.2.1. Configuración de puertos digitales de entrada

Se configura el asistente de la DAQ para adquirir señales digitales y elegimos Line Input (configuración de puertos por canal). Ver Figura 5.25



Figura 5.25 Daq Assistant Line Input – Digital Input (Labview).  
(Fuente: Propia).

Estos puertos son utilizados para limitar el movimiento mediante la señal que van a proporcionar los fines de carrera. Para ello se configuró los cuatro puertos de la Daq como se puede ver en la Figura 5.26.

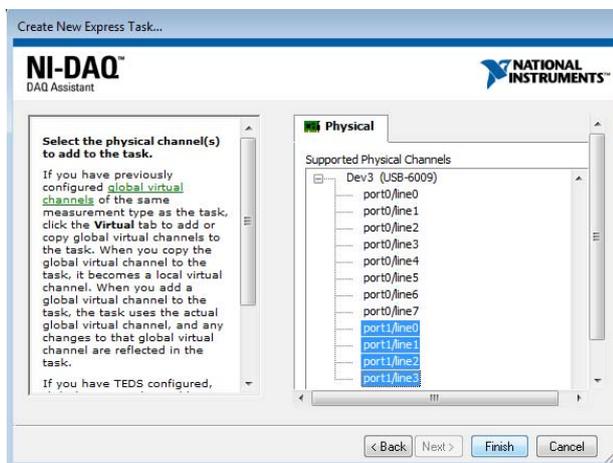


Figura 5.26 Puertos digitales de entrada (Labview).  
(Fuente: Propia).

Una vez configurado el Daq Assistant con los cuatro puertos se necesita desagrupar el array que se genera en una dimensión a un grupo de elementos de un mismo tipo, para ello se seleccionó el **“Array to cluster”** y se usó indicadores booleanos para usarlos posteriormente en la programación. Ver Figura 5.27.

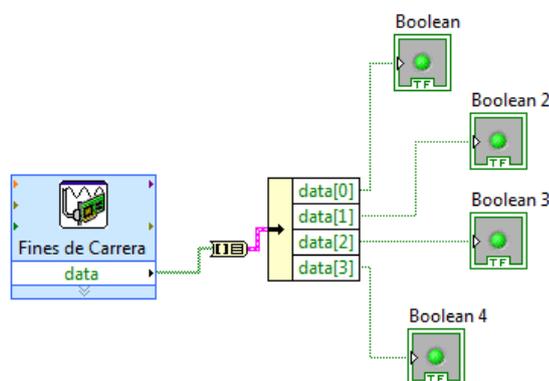


Figura 5.27 Configuración de Puertos digitales - Fines de Carrera (Labview).  
(Fuente: Propia).

### 6.2.2. Configuración de puertos digitales de salida

Se genera señales digitales y para ello se configura los puertos por canal (Line Output). Ver Figura 5.28.

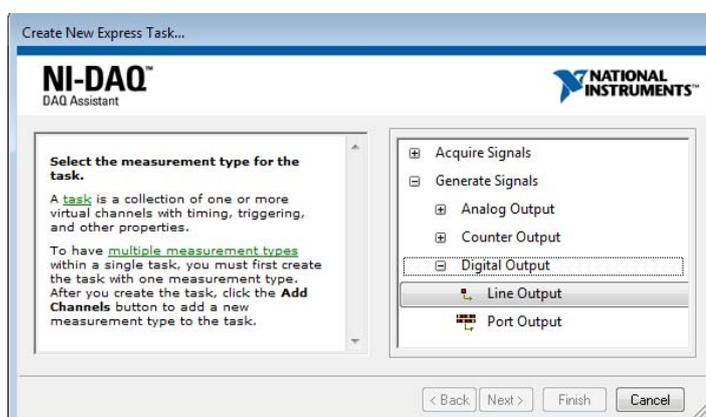


Figura 5.28 Daq Assistant Line Input – Digital Output (Labview).  
(Fuente: Propia).

Estos puertos son utilizados para generar una señal digital que controlará el giro de los motores. El puerto0.line 0 y el puerto0.line 1 son configurados para generar movimiento en el eje Y, y el puerto0.line 2 es configurado para generar movimiento en el eje X. Ver Figura 5.29.

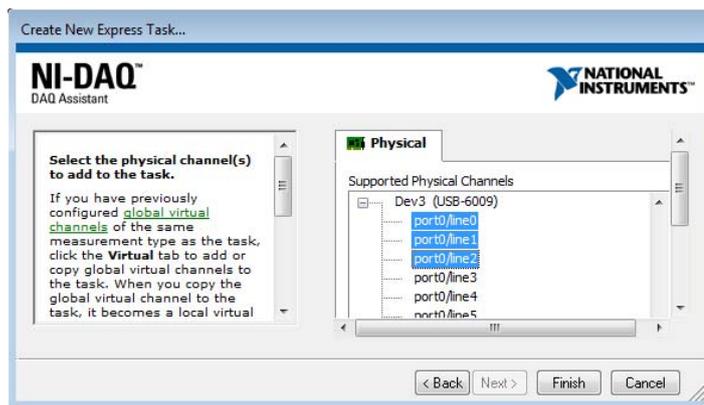


Figura 5.29 Puertos digitales de Salida (Labview).  
(Fuente: Propia).

Una vez configurado el Daq Assistant con los tres puertos se necesita realizar el proceso opuesto a lo que se hizo en la programación de los puertos digitales, para ello lo que se requiere utilizar son controles booleanos que ingresen a la Daq Assistant por medio de un “**Build Array**” para que posteriormente se pueda usar el mando tanto manual como automático de los puertos. Ver Figura 5.30.

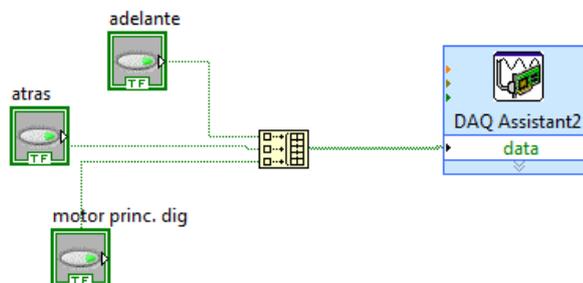


Figura 5.30 Configuración de Puertos digitales - Control Motores (Labview).  
(Fuente: Propia).

### 6.2.3. Configuración del Puerto Analógico

Se genera señales analógicas mediante la configuración de un puerto de salida analógica de voltaje. Ver Figura 5.31.

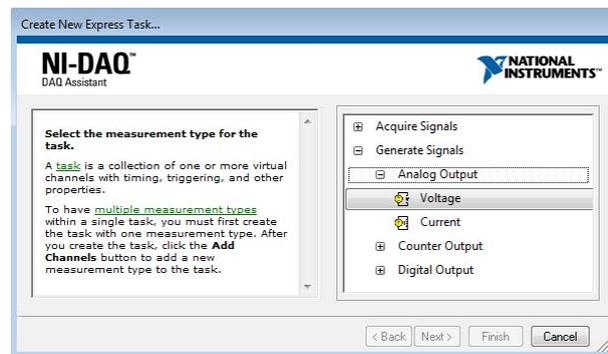


Figura 5.31 Daq Assistant Generate Voltaje – Analog Output (Labview).  
(Fuente: Propia).

El puerto configurado AO.0 cómo se puede ver en la Figura 5.32 es configurado para controlar el motor principal del eje x mediante Pwm que será controlado para generar el movimiento en el eje X.

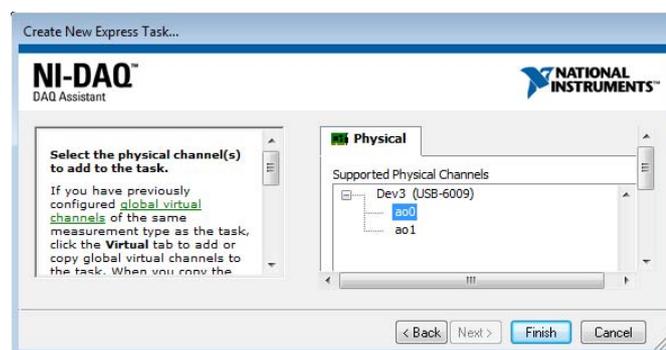


Figura 5.32 Puertos Analógico de Salida (Labview).  
(Fuente: Propia).

### 6.3. Procesamiento de imágenes.

Para el procesamiento de imágenes se usó el Vision Assistant que se menciona en la sección 362.3.2. Este asistente está ubicado en la paleta de labview de Visión and Motion. Ver Figura 5.33

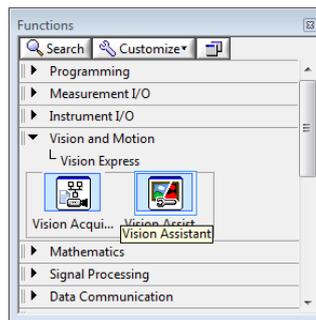


Figura 5.33 Vision Assistant – Labview.  
(Fuente: Propia).

Los grupos de funciones están representados en la barra de herramientas como se puede ver en la Figura 5.34. Las características se detallan en el capítulo 2 sección 2.3.2.



Figura 5.34 Funciones de procesamiento de imágenes (Labview).  
(Fuente: Propia).

Para el procesamiento de las imágenes el sistema debe ser capaz de identificar el objeto y localizarlo en el entorno, lo cual dependerá inicialmente de una imagen con el patrón que debe reconocer. La imagen se la carga en el asistente como imagen original tal y como se ve en la Figura 5.35.



Figura 5.35 Image Original Cargada al sistema.  
(Fuente: Propia).

El patrón a reconocer es una cinta con luz led para que el paciente se pueda colocar en la zona de estudio por medio de una cinta ajustable como se ve en la Figura 5.36.



Figura 5.36 Cinta ajustable con luz led.  
(Fuente: Propia).

La cantidad de lúmenes que proporciona la luz es de 20 a 1500A por metro. Tomando en cuenta que la distancia del patrón a la cámara es de 1 a 1.5 metros aproximadamente resulta satisfactorio el reflejo que la cinta produce ya que la cámara es 25% más sensible a la luz del ambiente lo que permite trabajar en lugares oscuros.

Una vez cargada la imagen se utiliza la opción **Color Threshold** ubicada dentro de la función **Color** mencionada en la sección 2.3.2 para seleccionar el rango de pixeles que el patrón va a tener cuando sea reconocido. La configuración de los parámetros se ve en la Figura 5.37.

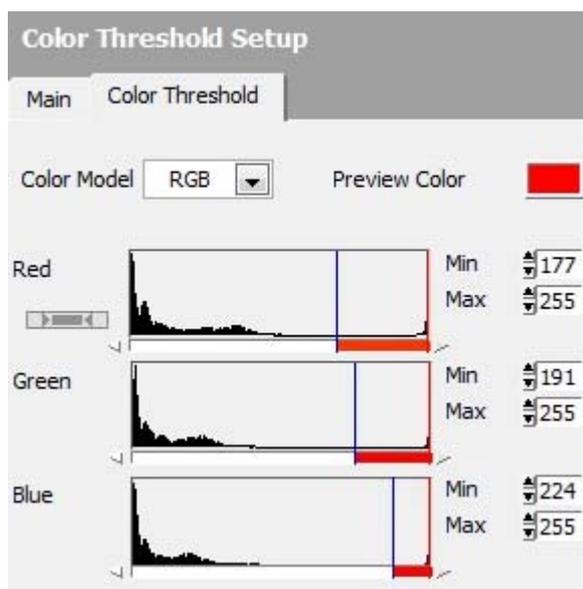


Figura 5.37 Configuración para Color Threshold.  
(Fuente: Propia).

Los parámetros configurados hacen que los colores se separen y de esta manera se reconozca únicamente al patrón en el entorno. La detección del parámetro y configuración de esta función depende de la iluminación en el ambiente.

Una vez configurado la función en color Threshold el patrón es reconocido como se ve en la Figura 5.38.



Figura 5.38 Patrón reconocido con Color Threshold.  
(Fuente: Propia).

Para el reconocimiento del patrón en tiempo real se necesitó que se transforme la imagen a escala de grises con la **funcion Lookup Table** y se usó la opción de **Equalize** para cumplir con el objetivo de tener una imagen en blanco y negro. Ver Figura 5.39.

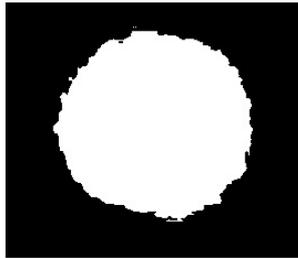


Figura 5.39 Imagen en blanco y negro del patrón a reconocer.  
(Fuente: Propia).

Con la imagen en blanco y negro se utilizó el **Geometry Matching** para identificar el patrón a través de una plantilla y limitar el perímetro de la figura que el software detecta. Para identificar el patrón se ignoran las áreas alrededor de la imagen con color rojo como se ve en la Figura 5.40.

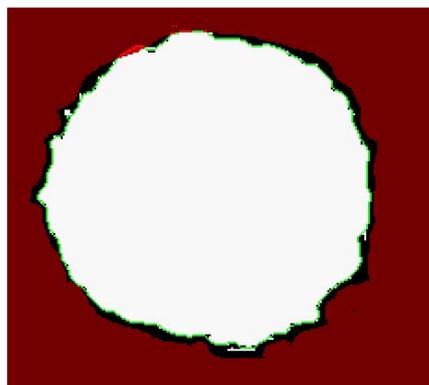


Figura 5.40 Imagen Limitadas Por regiones.  
(Fuente: Propia).

El asistente permite reconocer algunas características del patrón dentro del tamaño de la imagen dada anteriormente. Características como

coordenadas, angulos y escalas son identificadas por el software como se ve en la Figura 5.41.

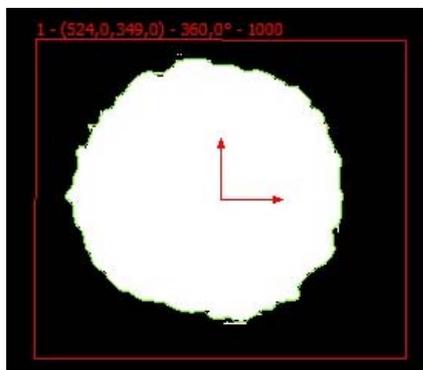


Figura 5.41 Imagen del patrón reconocida en el ambiente.  
(Fuente: Propia).

Terminado con la función de **geometry matching** el patrón tendrá las siguientes características para ser reconocido. Ver Figura 5.42.

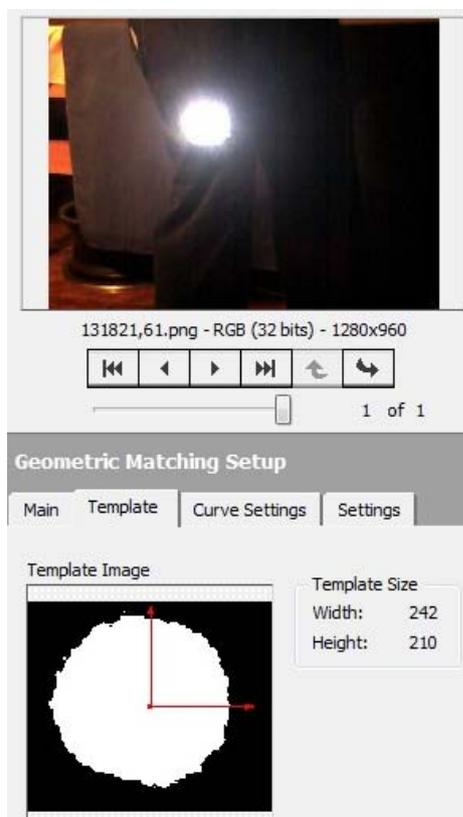


Figura 5.42 Ancho y Alto del patrón.  
(Fuente: Propia).

Se finaliza el asistente activando la opción de Matches para usar las coordenadas del patrón dentro del entorno en la programación. En la Figura 5.43 se puede observar que la opción de matches está dentro de la función geometry matching usada en el asistente para utilizar las coordenadas reales al momento de ejecutar el programa.

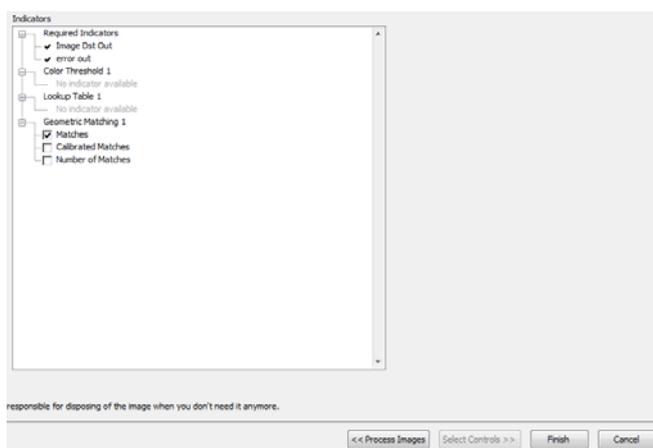


Figura 5.43 Matches - Geometry Matches.  
(Fuente: Propia).

#### 6.4. Adquisición de imágenes.

Para el procesamiento de imágenes se usó el NI Vision Acquisition mencionado en la sección 2.3.2 ubicado en la paleta de labview de Visión and Motion. Ver Figura 5.44.

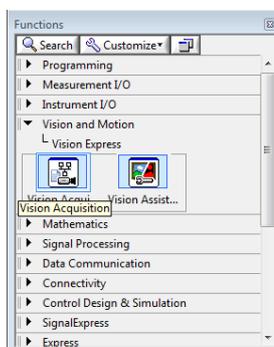


Figura 5.44 Vision Acquisition - Vision and Motion (Labview).  
(Fuente: Propia).

Una vez elegida la cámara en el asistente se usó una adquisición de imágenes de manera continua. Ver Figura 5.45.

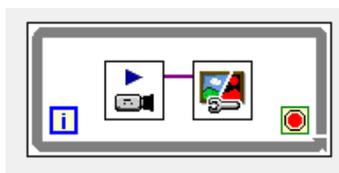


Figura 5.45 Continuous Acquisition – Labview.  
(Fuente: Propia).

Se configuró la imagen en un tamaño de 640 x 480 a 32 bits RGB y terminando con el asistente se puede ver el código a usarse posteriormente. Ver Figura 5.46.

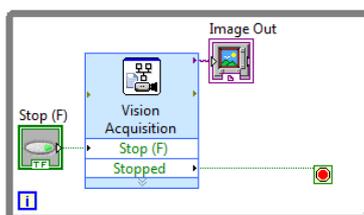


Figura 5.46 Asistente de Visión Finalizado.  
(Fuente: Propia).

A continuación se va a usar el **Imaq Create** y el **Set color pixel**. El uno ayuda a crear una localidad de memoria para una imagen mientras que el otro permite configurar los pixeles de la imagen generada.

Para cada uno se crean constantes de configuración tal y como se ve en la Figura 5.47.



Figura 5.47 Parámetros configurados en Labview.  
(Fuente: Propia).

Con el asistente de visión finalizado se procede a trabajar con la imagen en programación, como se ve en la Figura 5.48.

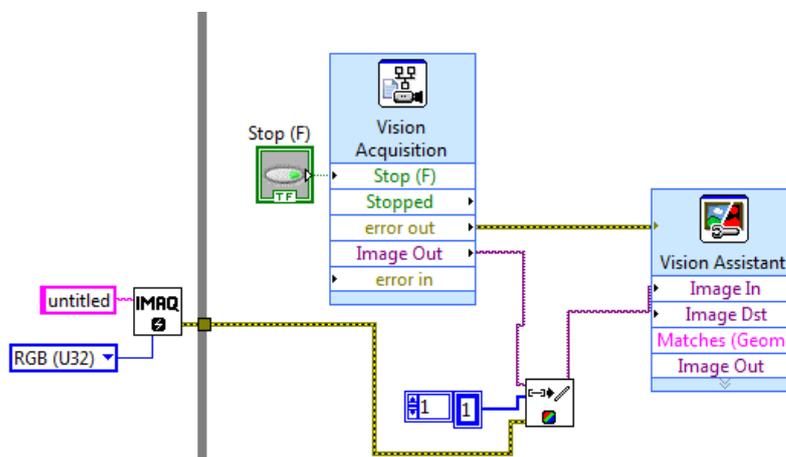


Figura 5.48. Conexión de Visión Acquisition y Visión Assistant.  
(Fuente: Propia).

El reconocimiento va a depender de las coordenadas que arroje el software una vez detectado el patrón, por lo que el dato de las coordenadas se las obtiene con “**Unduble by name**”; con él se usa cada coordenada según la localización de la imagen dentro del Vision Assistant. Ver Figura 5.49.

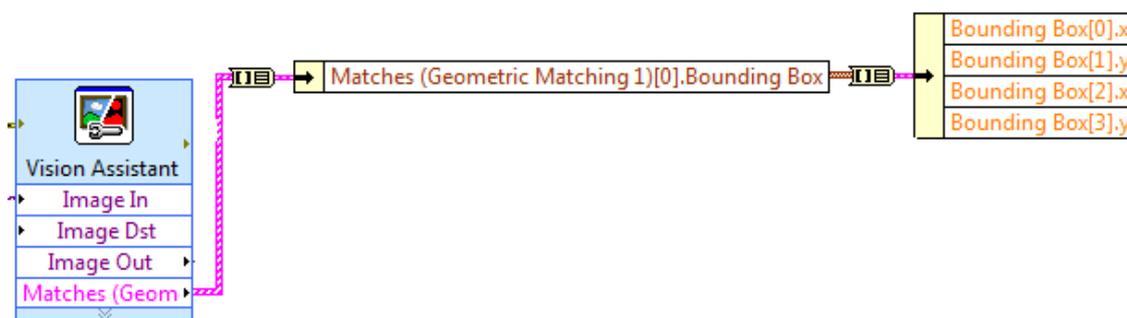


Figura 5.49 Unduble by name para sacar las coordenadas.  
(Fuente: Propia).

Se usó **Built array** para poder volver a agrupar las coordenadas y la coincidencia del patrón se identifica a través de **Overlay Rectangle** que no es más que un recuadro que identifica la imagen y la sigue siempre que el software la detecta. La configuración de conexión se lo puede ver en la Figura 5.50.

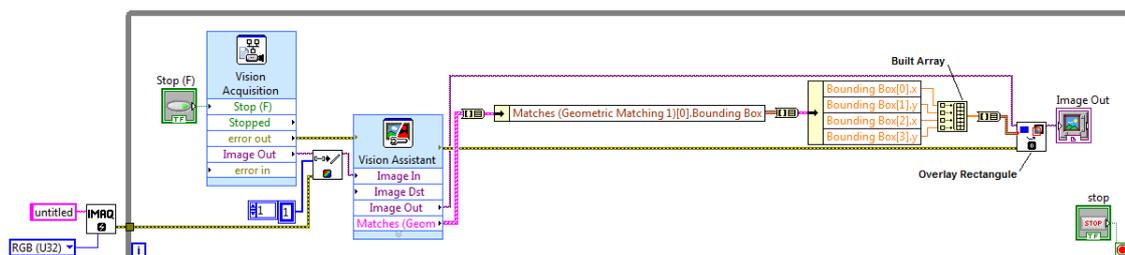


Figura 5.50 Conexión para adquirir y procesar la imagen (Labview).  
(Fuente: Propia).

## 6.5. Control Fuzzy

Para generar la lógica difusa se utilizó el bloque de **Fuzzy Controller** en conjunto con **File Path** y **Load Fuzzy System**, los mismos que se encargan de cargar la lógica difusa al controlador. La conexión se lo puede ver en la Figura 5.51.

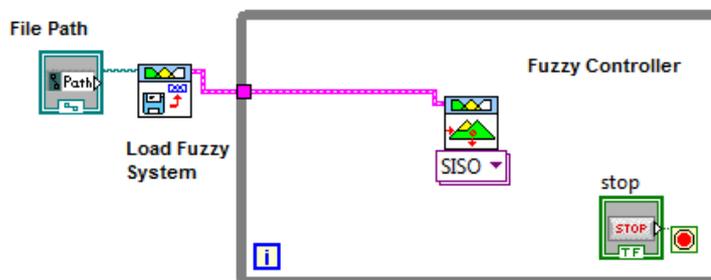


Figura 5.51 Bloque Fuzzy Controller – Labview.  
(Fuente: Propia).

### 6.5.1. Lazo de control

El lazo de control que se genera en el sistema depende de los componentes de visión artificial para capturar un patrón en movimiento. Físicamente el sistema se compone de las partes que se puede ver en la Figura 5.52.

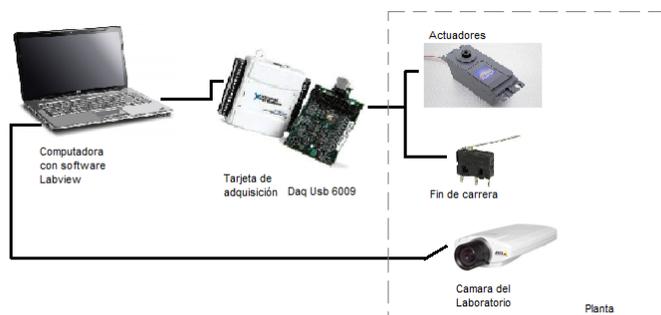


Figura 5.52 Componentes del sistema.  
(Fuente: Propia).

Para lograr que las partes trabajen conjuntamente con el software la computadora deberá tener instalado los drivers que se requiere para trabajar con la tarjeta de adquisición de datos y la cámara de video (Ver Figura 5.23).

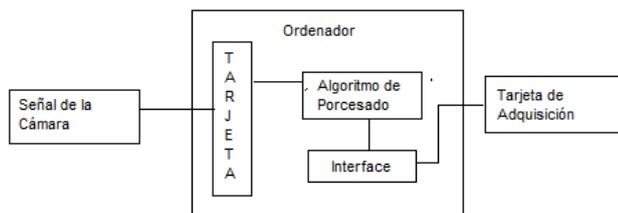


Figura 5.53 Componentes de visión artificial.  
(Fuente: Propia).

Internamente la computadora debe tener una tarjeta de video para capturar la imagen en tiempo real. El computador procesará el programa para enviar las señales de control mediante su interfaz a la tarjeta de

adquisición Daq Usb 6009. El software se encargará de enviar el ancho de pulso controlando la velocidad de los actuadores en el eje X, eje Y. Alguna de las funciones del software en el sistema se puede ver en la Figura 5.54.



Figura 5.54 Funciones de labview en el sistema.  
(Fuente: Propia).

La cámara en el sistema siempre estará detectando las coordenadas del patrón dentro del entorno por lo que se convierte en el sensor del sistema para identificar la posición del paciente. Las coordenadas son detectadas y comparadas en el software para ingresar al controlador difuso una vez procesado la señal de video por la tarjeta del computador. La señal del control ingresa por programación como variable del PWM para generar movimiento. La salida del PWM se dirige a la tarjeta de adquisición de datos por una salida analógica. La misma se dirige a la tarjeta electrónica para controlar la potencia dada al motor y evitar pérdidas de corriente y recalentamiento de la placa. Una vez controlada la potencia la señal se dirige a los actuadores para generar el proceso de generación de movimiento automático cuando el sistema detecte al patrón. El dato de la posición realimenta al sistema de información con las coordenadas que siempre está detectando la cámara. El lazo de control de puede ver en la Figura 5.55.

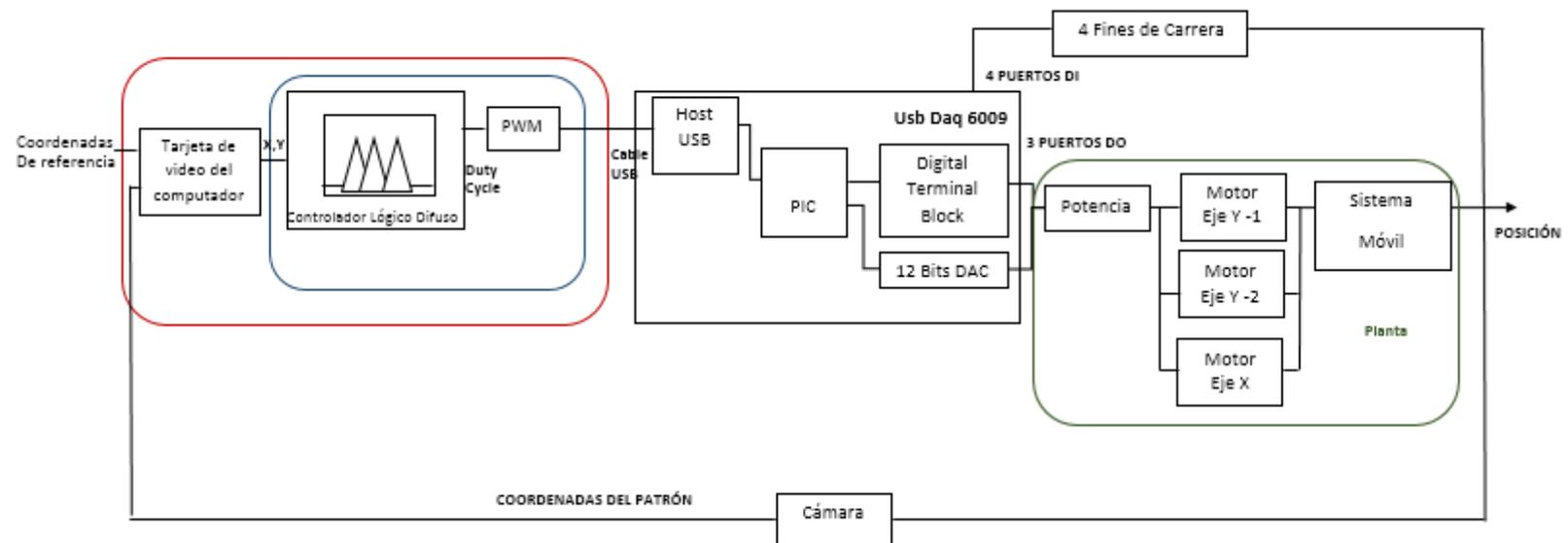


Figura 5.55 Lazo de Control.  
(Fuente: Propia).

La tarjeta de adquisición se encarga de enviar la señal recibida de los fines de carrera instalados en el sistema, lo que ayuda al software a restringir el movimiento cuando recibe la señal booleana de cada uno de ellos.

### 6.5.2. Lógica Fuzzy en labview

Para la lógica difusa se trabaja con una membresía triangular porque se necesita que el parámetro modal este dentro de un rango establecido de acuerdo a la distancia del sistema. Es recomendable trabajar con una membresía triangular ya que el sistema no exige trabajar con rangos exactos, como el sistema siempre va a detectar el patrón los rangos establecidos han sido elaborados en base a pruebas de funcionamiento, además se busca simplificar el control y que el sistema responda de la mejor manera ya que se trata de un patrón a reconocer en movimiento.

Se realiza la lógica difusa en labview ingresando en la dirección que se ve en la Figura 5.56.

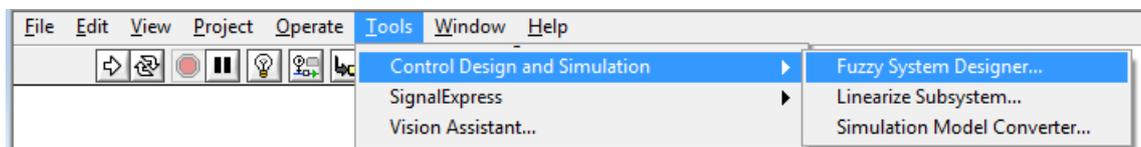


Figura 5.56 Fuzzy System Designer (Labview).  
(Fuente: Propia).

### 6.5.3. Variables del sistema

Las variables del sistema como variable de entrada "**Desp. X**" y variable de salida "**Duty Cycle**" se puede ver en la Figura 5.57.

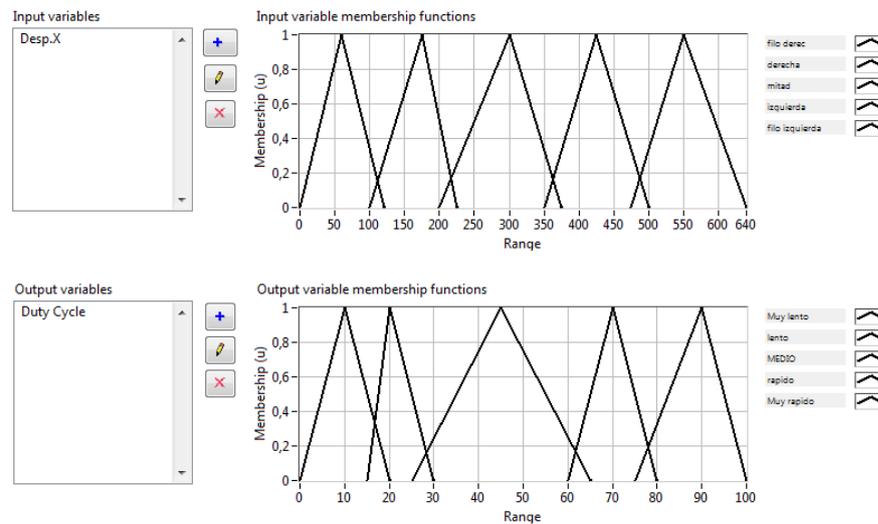


Figura 5.57 Variables de entrada y de Salida en Memb. Triangular (Labview).  
(Fuente: Propia).

#### 6.5.4. Variable de Entrada

La variable de entrada es el dato de pixeles que se configuró anteriormente para una imagen de 640 x 480. En este caso la variable de entrada ha sido configurada de acuerdo a pruebas de funcionamiento en el rango de 0 a 640 pixeles. Esto permite ubicar al patrón dentro del entorno y poder controlar al sistema para que se mueva a velocidad variable automáticamente según las reglas de la lógica difusa.

Como se puede ver en la Figura 5.58, las variables de entrada son cinco y su nombre depende de la ubicación y tramo en el que el patrón se reconoce. La pantalla se divide en cinco partes lo que permite ubicar al patrón según su posición en el entorno.

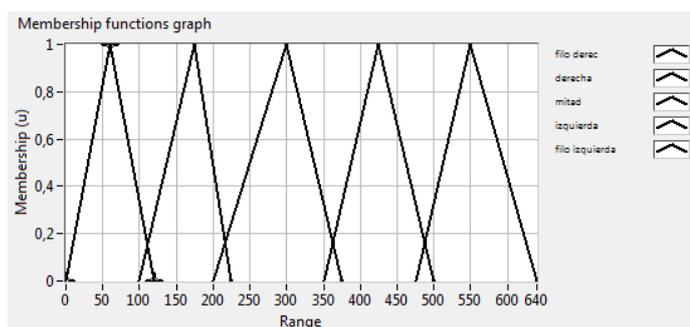


Figura 5.58 Membresías de las Variables de Entrada (Labview).  
(Fuente: Propia).

Los puntos en donde las membresías son configuradas se los ve en la Tabla 5-5.

Variable de Entrada	Puntos-Membresía Triangular		
Filo derecha	0	60	120
Derecha	100	175	225
Mitad	200	300	375
Izquierda	350	425	500
Filo Izquierda	475	550	640

Tabla 5-5 Puntos de cada membresía V. entrada.  
(Fuente: Propia).

### 6.5.5. Variables de Salidas

La variable de salida es el dato del duty cycle del sistema. Este parámetro va a determinar el movimiento correcto del sistema a velocidad variable. Para ellos se ha configurado de acuerdo a pruebas para que se obtenga mínima vibración y velocidades de 2 y 3m/s cumpliendo con el objetivo planteado. El rango de la variable está configurada de 0 a 100 como dato específico dentro de la programación del sistema.

Las variables de salida son cinco y sus nombres y función depende de la velocidad que se requiera dar al sistema para que según la ubicación del

parámetro la cámara siempre lo siga. El nombre de las variables depende de la velocidad que se quiera dar al sistema. Ver Figura 5.59.

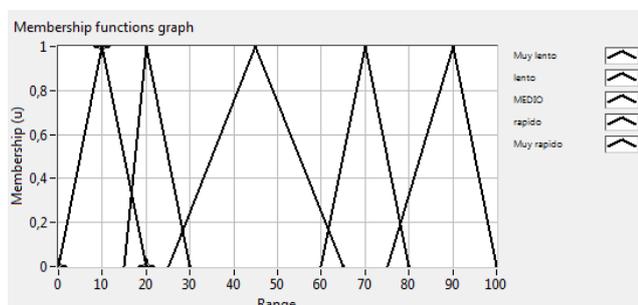


Figura 5.59 Membresías de las Variables de Salida (Labview).  
(Fuente: Propia).

Los puntos en donde las membresías son configuradas se los ve en la Tabla 5-6.

Variable de Salida	Puntos-Membresía Triangular		
Muy Lento	0	10	20
Lento	15	20	30
Mitad	25	45	65
Rápido	60	70	80
Muy Rápido	75	90	100

Tabla 5-6 Puntos de cada membresía V. Salida.  
(Fuente: Propia).

### 6.5.6. Reglas de Configuración Lógica Difusa

Las reglas en el controlador son configuradas para que según las variables de entrada y salida del sistema la cámara siga al patrón a la velocidad que el paciente ejecute su marcha. Las reglas se las puede ver en la Figura 5.60.

Se usa como método de defuzificación el centro de área ya que transforma la salida difusa en un número real lo que indica el centro de

gravedad de cualquier área de un conjunto difuso. Además es el más utilizado en proyectos netamente de control con lógica difusa.

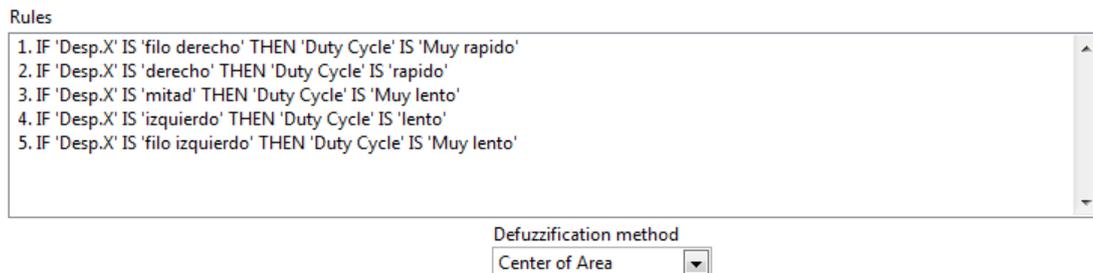


Figura 5.60 Reglas del controlador Fuzzy (Labview).  
(Fuente: Propia).

Estas reglas comparan en todo momento la posición del patrón dentro del entorno para que la cámara siempre lo siga. Cuando el paciente inicia el examen la cámara detectará al patrón de izquierda a derecha a medida que el paciente avance. Entonces el paciente con el patrón siempre que se encuentre frente al frente con la cámara el sistema no se moverá e irá “Muy lento”, el movimiento de la cámara será casi nulo mientras que si el paciente avanza significa que el patrón pasa de la mitad a un extremo derecho lo que quiere decir que la cámara deberá ir “Muy rápido” para ubicar y seguir nuevamente la marcha del paciente.

La idea principal del sistema es seguir en todo momento al paciente cuando se inicie el examen a una velocidad máxima establecida de 2.5 m/s y velocidad promedio de 1,5 m/s. Para ello las reglas de la lógica difusa corroboran con el objetivo planteado dentro de los rangos de las variables de entrada y salida seleccionados anteriormente.

## 6.6. PWM

El control de los sistemas se lo realizó a través de Pwm en la programación de Labview. Para ello se utiliza la salida del puerto analógico de la tarjeta Ni Daq 6009 configurada en la sección 0.

Las gráficas obtenidas representan la velocidad del motor, lo que dependiendo del ancho del PWM aumenta o disminuye la velocidad.

Para ello se hizo pruebas con el duty cycle en 50%, teniendo en cuenta que los parámetros fundamentales del PWM son el periodo y el ciclo de trabajo dado por el controlador. Ver Figura 5.61.

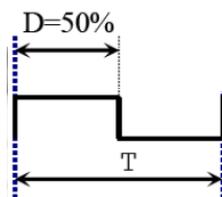


Figura 5.61 Duty Cycle del 50 %.  
(Fuente: Propia).

Para ello el dato de duty cycle se ha ido probando el más adecuado dentro de un rango de 0 al 100% para que en el arranque del motor no produzca ninguna vibración. El ciclo de trabajo y el tiempo de oscilación se programan a través de variables. En este caso el tiempo de Oscilación en una variable U32 y la salida del PWM dependerán del control que se realice en la lógica difusa. Ver Figura 5.62



Figura 5.62 Variables usadas en el programa.  
(Fuente: Propia).

Los parámetros de configuración y conexión del PWM se los ve en la Figura 5.63.

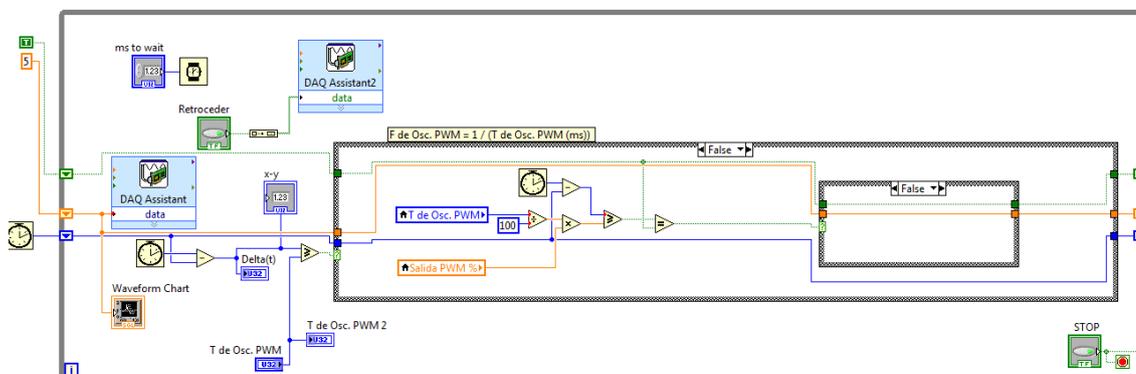


Figura 5.63 Conexión de PWM (Labview).  
(Fuente: Propia).

## 6.7. Interfaz

La interfaz de Labview se puede ver en la Figura 5.64.



Figura 5.64 Interfaz en Labview.  
(Fuente: Propia).

### 6.7.1. Controles

En los controles se tienen mandos para accionamiento Manual y Automático dependiendo de cada eje. En modo automático para el eje X la velocidad del sistema dependerá de su controlador y en modo manual la velocidad podrá ser modificada según la barra de velocidad de la Figura 5.65, adicional a esto en modo manual en el eje X se podrá retroceder cada vez que se lo requiera con el botón “retroceder” de la Figura 5.65. Para el eje Y la velocidad automática que siempre tendrá es de 1m/s y se podrá controlar con los botones “hacia atrás” y ”hacia al frente” como se ve en la Figura 5.65.



Figura 5.65 Mando Manual y Automático.  
(Fuente: Propia).

Los indicadores del sistema se los ve en la Figura 5.66. Estos indican si la posición de la cámara está en el límite cuando los fines de carrera se hayan accionados. Lo que se encenderán las luces informando en qué posición se encuentra la cámara.

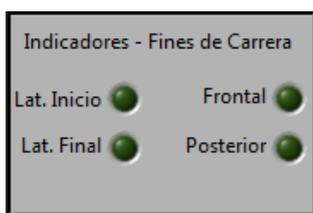


Figura 5.66 Indicadores de Fines de Carrera.  
(Fuente: Propia).

La interfaz contiene pestañas para poder ver diferentes parámetros del funcionamiento del sistema. En la Figura 5.67 se ve los indicadores para ver los datos de la distancia X, salida PWM y distancia en Z en la pantalla.

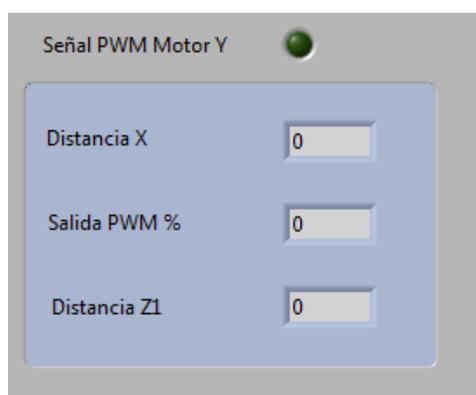


Figura 5.67 Indicadores de datos.  
(Fuente: Propia).

En otra pestaña se puede ver la salida de la señal PWM y la señal de salida del controlador cuando se detecta el patrón. Ver Figura 5.68.

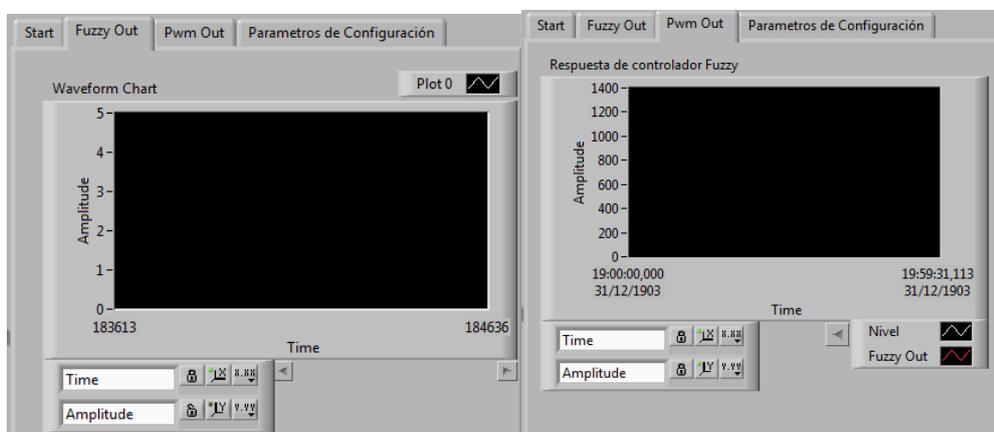


Figura 5.68 Graficas de la interfaz de Pwm y Salida del Controlador.  
(Fuente: Propia).

La última pestaña contiene parámetros de configuración para regular el tiempo de oscilación y el tiempo de retardo para que los “while” funcionen a la par. Ver Figura 5.69.

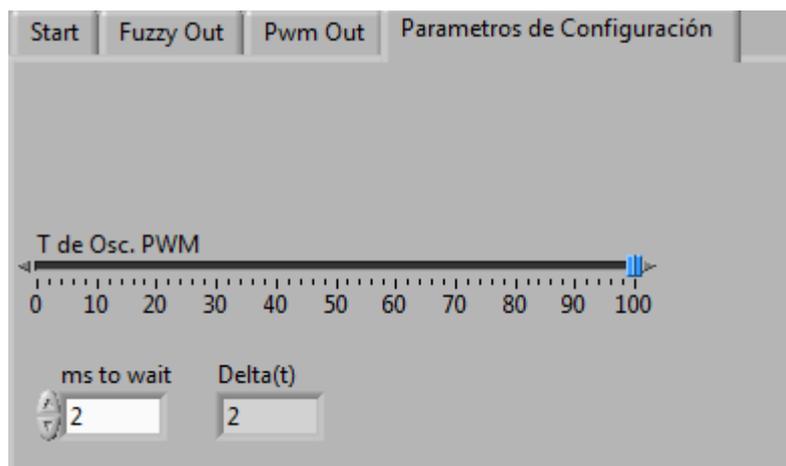


Figura 5.69 Parámetros de configuración – Interfaz.  
(Fuente: Propia).

El sistema va a tener un Stop general que apagará el todo el sistema. El botón que realiza esa función se lo ve en la Figura 5.70.



Figura 5.70 Botón de Stop – Interfaz.  
(Fuente: Propia).

La interfaz contendrá el símbolo de una carpeta como se ve en la Figura 5.71 para ingresar el archivo de la lógica difusa para que el programa funcione de acuerdo a características antes mencionadas.



Figura 5.71 Carga de archivo de la lógica difusa.  
(Fuente: Propia).

### **6.8. Seguridad del sistema**

La seguridad del sistema se realizó pensando en posibles situaciones que el sistema pueda tener además de las presentadas anteriormente. Las cuales son:

- Si el computador se apaga o el programa se reinicia la cámara regresará a la posición inicial hasta que el fin de carrera de la posición inicial se encienda.
- Una vez terminado el examen la cámara debe de topar el fin de carrera "**final**" para que el sistema pase de automático a manual y el operador regrese la cámara al punto de origen.
- Los fines de carrera limitaran el movimiento pese a que el patrón sea reconocido.
- El botón de stop detendrá el funcionamiento total en cualquier parte del sistema.

### **6.9. Programa de Labview**

La programación en labview se puede encontrar en el **Anexo G**.

## 7. CAPÍTULO 7: PRUEBAS DE ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 7.1. Introducción

Las pruebas de análisis consisten en la toma de datos para verificar que el sistema cumpla con los requerimientos de diseño y que tanto el software como el hardware funcionen correctamente. Con esto se verifica que el sistema de adquisición de datos funcione bien para que el sistema en caso de error se pueda reiniciar y no exista mayor problema.

La revisión y puesta a prueba tanto de la parte mecánica, electrónica, programación y adquisición de datos se analizará en el presente capítulo para constatar la viabilidad del proyecto.

### 7.2. Prueba del sistema mecánico

Las pruebas del sistema mecánico consisten en determinar si existe vibración en el sistema a velocidad media 1.5m/s y máxima 3 m/s del sistema. A continuación se detallan las velocidades a las que se forzó trabajar el sistema y se indica si existe vibración en el mismo. Ver Tabla 7-1.

<b>Velocidad</b>	<b>Vibración</b>
1.5 m/s	Nula
2m/s	Nula
2.5 m/s	Nula

Tabla 7-1 Prueba del sistema mecánico.  
(Fuente: Propia).

De esta manera la estructura cumple satisfactoriamente con los parámetros de funcionamiento.

### 7.2.1. Sistemas Correa dentada

El sistema de correa dentada resulta satisfactorio su uso ya que a varias velocidades el enganche del sistema no produce vibración, y en caso que se dañe o se rompa la correa dentada es de fácil instalación al sistema. En la Figura 7.1 se puede ver el sistema de correa dentada cuando el sistema va hacia atrás.



Figura 7.1 Sistema de Transmisión por correa Eje Y.  
(Fuente: Propia).

### 7.3. Prueba del sistema electrónico

El componente principal del sistema electrónico es el puente H (circuito L-298) encargado de dar el sentido de movimiento a los motores. Por eso motivo se verificará si existe calentamiento en la placa electrónica y si el disipador de calor usado es el correcto.

Velocidad	Calentamiento
1m/s	Nulo
1.5 m/s	Leve
2.5 m/s	Leve

Tabla 7-2 Prueba del sistema electrónico.  
(Fuente: Propia).

El puente H se calienta más cuando las velocidades a generar son elevadas, esto se lo controla regulando la potencia de salida del circuito hacia los motores, para esto se usó una resistencia de potencia para el eje x de 1ohmio a 1w. Con esto se logra estabilizar la potencia que consume el motor y de esta manera evitar en lo posible el calentamiento de los componentes.

### **7.3.1. Prueba del sistema de control y adquisición de datos**

La adquisición de datos se evalúa a través del Daq Assistant lo que permite saber si las señales están ingresando y generándose. Lo cual es un paso muy importante si todo funciona correctamente. En el proyecto antes de iniciar con el funcionamiento del sistema se verifica que la Daq sea reconocida por el computador y pase el auto test de verificación del funcionamiento como se habló en la sección 0 del capítulo 6. Además el control mediante la tarjeta Daq Usb 6009 se limitará el movimiento mediante la lectura de los fines de carrera instalados en el sistema.

### **7.3.2. Fin de carrera Posterior y Frontal**

En este caso se puede verificar que el sistema se detiene cuando los fines de carrera son activados, independientemente del lugar que se encuentre el sistema. El movimiento del sistema en Y, dependerá del acercamiento del patrón dentro del rango de filmación para que se aleje la cámara, motivo por el cual concluimos que los fines de carrera si cumplen con su objetivo y detiene el sistema a medida que se requiere. Ver Figura 7.2.



Figura 7.2 Fines de Carrera Frontal y Posterior.  
(Fuente: Propia).

### 7.3.3. Fines de carrera laterales

En este caso los fines de carrera laterales cuidaran al sistema impidiendo que los motores se recalienten y se quemen, además dentro de la programación se limita el movimiento para que luego del estudio de movimiento que se realice se pueda mandar a una posición inicial. Ver Figura 7.3.



Figura 7.3 Fines de Carrera Laterales Eje X.  
(Fuente: Propia).

### 7.3.4. Ubicación del gabinete de control

Las pruebas de funcionamiento han determinado la correcta ubicación del gabinete del control ya que el movimiento que genera el sistema no perjudica en nada a la ubicación de la tarjeta electrónica y la tarjeta de

adquisición de datos y como beneficio principal en caso de cambio o daño el sistema de desmantela abriendo el gabinete hacia abajo quedándonos con todo el sistema electrónico y de control para futuras inspecciones. Ver Figura 7.4.



Figura 7.4 Gabinete de control.  
(Fuente: Propia).

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño y construcción del sistema se centró en encontrar en el mercado componentes que permitan dar características propias como linealidad, rigidez y resistencia, y en su fabricación se pudo mejorar el diseño en base a pruebas técnicas que ayudaron a ser el proyecto más rentable y eficiente.

El costo es un factor importante en el diseño del sistema. Tomando en cuenta que en el mercado no se pueden encontrar sistemas que cumplan con dar movilidad lineal automática el costo del proyecto de 1800 dólares aproximadamente es menor a los precios que se encuentran en el mercado de sistemas que realizan la misma función y deben de ser importados (3500 dólares).

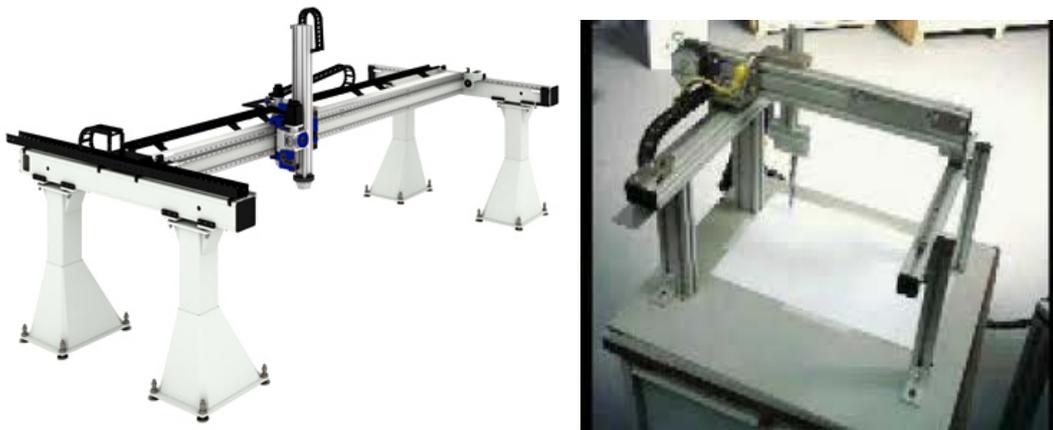


Figura 8.1 Sistemas lineales (3500 dólares)

El sistema abarca un control lógico difuso que cumple con las condiciones de funcionamiento para detectar un patrón en movimiento. La respuesta de comunicar el computador a la planta y generar el movimiento automático necesario es casi inmediato. El control se desarrolló con un computador cuyo procesador es el inter core i-5 a 2.5 ghz lo que se recomienda tener en cuenta estos datos para no perder información en tiempo real en el procesamiento de la máquina.

La rapidez máxima de 2.5 m/s resultó satisfactoria realizando pruebas de funcionamiento al final. No se pierde enfoque alguno y se concluye que es una velocidad moderada que permite dar a los actuadores un correcto funcionamiento mediante el control del sistema.

Las especificaciones de torque de 25kg.cm que proporciona el motor fue un parámetro positivo pese a que se necesitaba 12 v para hacer funcionar al motor y no 6v como indicaba el proveedor. En este caso se consideró regular el voltaje para no dañar los demás componentes de la tarjeta electrónica y a una corriente de 3A es resultado fue satisfactorio 100%.

El peso final de la estructura es de 41.5 kg lo que determina que el sistema no es pesado cumpliendo con los requerimientos planteados de realizar un sistema ligero. Los desechos que se generaron al realizar el proyecto fueron casi nulos, la mayoría del material se reutilizo para realizar pruebas de linealidad y poder fabricar los componentes de acuerdo a los planos realizados.

El principal problema para que el sistema no detecte el patrón es el cambio de iluminación en el ambiente, el sistema puede detectar sin problemas el movimiento del patrón a varias velocidades siempre que la iluminación del entorno se controle.

En el proyecto se usó como patrón a ser detectado una fuente de luz para que lo detecte el sistema de visión artificial. En base a pruebas para identificar ciertas características de patrones como forma, borde y volumen, se concluye que la fuente de luz produce menos distorsión y siempre refleja a la cámara un patrón en forma circular lo que permite reconocerlo y procesar la imagen para que el sistema siempre lo pueda reconocer.

En base a lo expuesto, se evidenció que la construcción de las guías sobre las cuales se desplaza la cámara cumple eficientemente con el objetivo planteado. Con estas guías se evita la vibración de la cámara cuando hay variaciones de velocidad, pues las llantas están apegadas a la superficie interna de las guías. Tal resultado era difícil de obtener con guías prefabricadas.

El ajuste de la altura de la cámara se puede considerar el elemento más fácil del proyecto entero. Esta solución refleja la utilización de recursos según la inversión con el cual se llevó el proyecto.

El uso de un mecanismo correa – engrane satisface totalmente a la movilidad del proyecto y se recomienda su uso totalmente para futuros proyectos de automatización. El problema consiste en encontrar correas dentadas con la distancia que se calculó (400 cm) en el diseño lo que se

recomienda tomar en cuenta que tipos de correas venden en el país y cuanto es el valor del diámetro de paso para poder realizar estos mecanismos en espacios reducidos.

Se recomienda también poder utilizar software libre para realizar el procesamiento de imágenes. Existen algunas opciones recientes de libre descarga en el internet que cumplen con los requisitos de visión artificial. De todas maneras National Instruments presenta una forma de trabajo descomplicada que permiten utilizar asistentes para el procesamiento y adquisición de imágenes.

Utilizar la tarjeta de adquisición de datos Daq usb 6009 en el sistema de adquisición dio excelente resultados. La simplicidad con la que la computadora se comunica con la planta a través de la tarjeta fue útil para realizar pruebas de funcionamiento y poder instalar y reemplazar componentes para que el funcionamiento sea eficiente.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Andrés Porras S., I. M. (2001). *Engranajes*. Cátedra de Motores y Máquinas - UCLM.
- ARTAL, C. (22 de 12 de 2003). *ARTICULOS*. Obtenido de BELEYMA, S.L:  
[http://www.fulp.ulpgc.es/articulos/vector22\\_02.pdf](http://www.fulp.ulpgc.es/articulos/vector22_02.pdf)
- Ashby, M. F. (2005). *Materials Selection in Mechanical Design* (Third Edition ed.). Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Asignatura de Gráficos en Computación*. (12 de 2010).
- Beekman, G. (1999). *Introducción a la Computación*. Recuperado el 25 de 05 de 2013, de  
[http://books.google.com.ec/books?id=x2LpPgZJlvIC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com.ec/books?id=x2LpPgZJlvIC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Candelas, F., & Corrales, J. (2007). *Servomotores*. Alicante: Universidad de Alicante - Grupo de Automática, Robótica y Visión Artificial.
- Carlisle. (2013). *Industrial V-Belt Drives Design Guide*. Daventry, Northamptonshire, Reino Unido. Obtenido de [http://www.c-rproducts.com/downloads/pdfs/Industrial\\_vbelt\\_drives\\_design%20\\_guide.pdf](http://www.c-rproducts.com/downloads/pdfs/Industrial_vbelt_drives_design%20_guide.pdf)
- Chapman, S. J. (2000). *Máquinas Eléctricas*. Colombia: McGrawHill.
- Chen, B. M. (2011). *DC Motors*. Obtenido de National University of singapore(NUS).
- College, T. U. (s.f.). *Control and Simulation in LabVIEW*. Obtenido de  
<http://home.hit.no/~hansha/documents/labview/training/Control%20and%20Simulation%20in%20LabVIEW/Control%20and%20Simulation%20in%20LabVIEW.pdf>
- Corporation, O. (2013). *Omron Industrial Automation*. Recuperado el 15 de Octubre de 2013, de Technical Guide for Inverter Selection:  
[http://www.ia.omron.com/data\\_pdf/guide/9/inverte\\_selection\\_tg\\_e\\_2\\_1.pdf](http://www.ia.omron.com/data_pdf/guide/9/inverte_selection_tg_e_2_1.pdf)
- DAQ NI USB-6008 / 6009*. (s.f.). Obtenido de  
[https://www.google.com.ec/search?q=DAQ+NI-6008/6009&rlz=1C1CHJL\\_esEC475EC475&espv=210&es\\_sm=93&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ei=i27dUrzgMpS1sATn3YC4Cw&ved=0CAkQ\\_AUoAQ&biw=898&bih=754&dpr=0.75#facrc=\\_&imgdii=\\_&imgrc=\\_kaDsdXNW9fy7M%253A%3B6DNyRVdpTx6pAM%3Bhttp%](https://www.google.com.ec/search?q=DAQ+NI-6008/6009&rlz=1C1CHJL_esEC475EC475&espv=210&es_sm=93&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ei=i27dUrzgMpS1sATn3YC4Cw&ved=0CAkQ_AUoAQ&biw=898&bih=754&dpr=0.75#facrc=_&imgdii=_&imgrc=_kaDsdXNW9fy7M%253A%3B6DNyRVdpTx6pAM%3Bhttp%)
- e-bay*. (s.f.). Obtenido de [http://www.ebay.com/itm/AC-DC-110-240V-12V-2A-transformer-led-Power-Charger-Supply-AC-DC-Adapter-US-plug-/350924201351?nma=true&si=koWtubEYSvWhZlChUByBtAUK%252Ftg%253D&orig\\_cvip=true&rt=nc&\\_trksid=p2047675.l2557](http://www.ebay.com/itm/AC-DC-110-240V-12V-2A-transformer-led-Power-Charger-Supply-AC-DC-Adapter-US-plug-/350924201351?nma=true&si=koWtubEYSvWhZlChUByBtAUK%252Ftg%253D&orig_cvip=true&rt=nc&_trksid=p2047675.l2557)

- Egomexico. (s.f.). *egomexico.com*. Recuperado el 22 de 05 de 2013, de egomexico.com:  
[http://www.egomexico.com/como\\_funciona\\_vision\\_artificial.htm](http://www.egomexico.com/como_funciona_vision_artificial.htm)
- Fabricantes servos*. (s.f.). Obtenido de <http://www.arduteka.com/wp-content/uploads/2011/12/ServoMotor-conexion.png>
- González Rey, G., & García Domínguez, M. (2010). *Ingeniería Mecánica*. Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442010000200006&script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442010000200006&script=sci_arttext)
- Hans-Petter. (11 de 02 de 2013). *Data Acquisition in LabVIEW*. Recuperado el 14 de 06 de 2013, de <http://home.hit.no/~hansha/documents/labview/training/Data%20Acquisition%20in%20LabVIEW/Data%20Acquisition%20in%20LabVIEW.pdf>
- Hermenegildo, G. R. (s.f.). *Ingeniero Industrial*. Obtenido de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html>
- HobbyKing. (2014). *HobbyKing*. Obtenido de [https://www.google.com.ec/search?q=SERVO+MOTOR+Hk15338&rlz=1C1CHJL\\_esEC475EC475&espv=210&es\\_sm=93&source=Inms&tbn=isch&sa=X&ei=EF3dUrXWJq-\\_sQTz54CAAQ&ved=0CAkQ\\_AUoAQ&biw=629&bih=419#facrc=\\_&imgdii=\\_&imgsrc=cxWmx-HhEMcl9M%253A%3B4Ucb5GRAM6cERM%3Bhttp%253A%2](https://www.google.com.ec/search?q=SERVO+MOTOR+Hk15338&rlz=1C1CHJL_esEC475EC475&espv=210&es_sm=93&source=Inms&tbn=isch&sa=X&ei=EF3dUrXWJq-_sQTz54CAAQ&ved=0CAkQ_AUoAQ&biw=629&bih=419#facrc=_&imgdii=_&imgsrc=cxWmx-HhEMcl9M%253A%3B4Ucb5GRAM6cERM%3Bhttp%253A%2)
- interempresas. (2013). *SOFTWARE DE VISIÓN ARTIFICIAL NATIONAL INSTRUMENTS VISION 8*. Recuperado el 23 de 05 de 2013, de [http://www.interempresas.net/Informatica\\_Industrial/FeriaVirtual/Producto-Software-de-vision-artificial-National-Instruments-Vision-8-20017.html](http://www.interempresas.net/Informatica_Industrial/FeriaVirtual/Producto-Software-de-vision-artificial-National-Instruments-Vision-8-20017.html)
- Izquierdo Redín, M. (2008). *Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte*. Buenos Aires;Madrid: Medica Panamericana.
- Jason Industrial Inc. (2013). *Jasonindustrial.com*. Obtenido de <http://rubberproducts.jasonindustrial.com/item/neoprene-synchronous-belts/standard-timing-belts/1700h-100?&plpver=10&origin=keyword&by=prod&filter=0>
- Jolly, A. (2005-2011). *LabVIEW, TestStand, LabWindows/CV*. Recuperado el 06 de 03 de 2013, de <http://www.ajolly.com.mx/es/desarrollo-consulta-sistema-supervisor-control-prueba-medida/19-LabVIEW-que-es.html>
- Laboratorio de Análisis de Movimiento. (2013). *La biomecánica y la tecnología al servicio de la evolución humana*. Recuperado el 19 de 05 de 2013, de <http://www.confevida.com/lam.htm>
- Lajara Vizcaino, J. R., & Pelegrí Sebastián, J. (2007). *Labview Entorno gráfico de programación*. Mexico D.F: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR S.A.

- Leal, H. (25 de 06 de 2011). Recuperado el 03 de 08 de 2013, de [http://acontecimientosactuales.bligoo.es/media/users/16/829236/files/149678/LIBRO\\_DE\\_SELECCION\\_DE\\_MATERIALES\\_.pdf](http://acontecimientosactuales.bligoo.es/media/users/16/829236/files/149678/LIBRO_DE_SELECCION_DE_MATERIALES_.pdf)
- Lerma Garcia, J. (2002). *Fotogrametría Moderna; Analítica y Digital*. Valencia: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Lesmes, J. D. (2007). Examen de la marcha. En J. D. Lesmes, *Evaluación clínico-funcional del movimiento corporal humano* (pág. 259). Bogota: Editorial Médica Internacional, 2007.
- MICROSCAN. (15 de 10 de 2010). *subido por Scribd*. Recuperado el 22 de 05 de 2013, de <http://es.scribd.com/doc/8343510/Vision-Artificial>
- Moreno de la Fuente, J. (2003). *PODOLOGÍA GENERAL Y BIOMECÁNICA*. Barcelona: Masson.
- National Instrument. (2013). *Módulo NI Vision Development*. Recuperado el 16 de 06 de 2013, de Módulo NI Vision Development
- National Instruments. (2013). *NI Vision*. Recuperado el 22 de 05 de 2013, de <http://www.ni.com/vision/esa/>
- Norton, R. L. (2005). *Diseño de Maquinaria*. Mexico D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- Olmo Castillo, M. (s.f.). *Tutorial de Introducción de Lógica Borrosa*. Obtenido de <http://www.dma.fi.upm.es/java/fuzzy/tutfuzzy/contenido3.html>
- Passariello, G., & Mora, F. (1995). *Imágenes Médicas*. Baruta: Equinoccio, Ediciones de la Universidad Simón Bolívar.
- Quilmes, U. N. (09 de 2005). *Filtrado Espacial*. Recuperado el 17 de 06 de 2013, de <http://iaci.unq.edu.ar/materias/vision/archivos/apuntes/Filtrado%20Espacial.pdf>
- Rauch-Hindin, W. (1989). *Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en la Actividad Empresarial, la*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- Reyes, L. (27 de 04 de 2011). *Notas de clase de Lucelly ReyesH*. Recuperado el 16 de 06 de 2013, de [http://fisica.udea.edu.co/~lab-gicm/Curso%20de%20Instrumentacion/2011\\_clase%20NI%20IMAQ.pdf](http://fisica.udea.edu.co/~lab-gicm/Curso%20de%20Instrumentacion/2011_clase%20NI%20IMAQ.pdf)
- Robert L. Mott, P. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México D.F.: Pearson Hall.
- Romero Sors, E., & de Anda del Muro, R. (02 de 12 de 2012). Recuperado el 09 de 09 de 2013, de <http://es.scribd.com/doc/81392971/Metodologia-de-Selecc-de-Materiales-Ashby-Tarea>
- Soriano, A. P. (2001). *Engranajes*. Cátedra de Motores y Máquinas - UCLM.

Szeliski, R. (3 de Septiembre de 2010). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. USA: Springer.

Villava, Z. (2010). *Síntesis de Mecanismos y Máquinas*. Pamplona-Navarra: IMAC: Ingeniería Mecánica Aplicada y Computacional.

*Visión artificial e interacción sin mandos*. (12 de 2010). Recuperado el 15 de 05 de 2013, de <http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/3D/VisionArtificial/aplicaciones.html>

VISIÓN ARTIFICIAL-INFAIMON S.L. (2013). *INFAIMON*. Recuperado el 13 de 06 de 2013, de <http://www.infaimon.com/catalogo-industria/software-vision-artificial-61.html>