



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA MECATRÓNICA**

AUTORES: CÉSPEDES SOTOMAYOR, JAVIER ALEJANDRO

HIDALGO CARVAJAL, DIEGO XAVIER

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA LEVA ELECTRÓNICA DE
MOVIMIENTOS REPROGRAMABLES PARA EL LABORATORIO
DE MECANISMOS Y VIBRACIONES DEL DECEM DE LA
UNIVERSIDAD DE FUERZAS ARMADAS - ESPE”**

DIRECTOR: ING. OLMEDO SALAZAR, FERNANDO

CODIRECTOR: ING. IBARRA JÁCOME, ALEXANDER

SANGOLQUÍ, SEPTIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA****CERTIFICADO**

ING. FERNANDO OLMEDO (DIRECTOR)
ING. ALEXANDER IBARRA (CODIRECTOR)

CERTIFICAN:

Que el trabajo titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA LEVA ELECTRÓNICA DE MOVIMIENTOS REPROGRAMABLES PARA EL LABORATORIO DE MECANISMOS Y VIBRACIONES DEL DECEM DE LA UNIVERSIDAD DE FUERZAS ARMADAS - ESPE”**, realizado por los señores Javier Alejandro Céspedes Sotomayor y Diego Xavier Hidalgo Carvajal, ha sido guiado, revisado periódicamente y cumple con las normas estatutarias establecidas en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Debido a que el trabajo de investigación mencionado ha cumplido con todos los requisitos académicos y legales, se recomienda su publicación.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (PDF).

Autorizan a los señores Javier Alejandro Céspedes Sotomayor y Diego Xavier Hidalgo Carvajal que lo entreguen al Ing. Francisco Terneus, en su calidad de Director de la Carrera.

Sangolquí, Septiembre de 2014

Ing. Fernando Olmedo Salazar
DIRECTOR

Ing. Alexander Ibarra Jácome
CODIRECTOR

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

NOSOTROS, JAVIER ALEJANDRO CÉSPEDES SOTOMAYOR,
DIEGO XAVIER HIDALGO CARVAJAL

DECLARAMOS QUE:

El proyecto denominado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA LEVA ELECTRÓNICA DE MOVIMIENTOS REPROGRAMABLES PARA EL LABORATORIO DE MECANISMOS Y VIBRACIONES DEL DECEM DE LA UNIVERSIDAD DE FUERZAS ARMADAS - ESPE”**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Septiembre de 2014

Javier Alejandro Céspedes Sotomayor
C.C. No. 171937178-1

Diego Xavier Hidalgo Carvajal
CC. No. 171482288-7

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA****AUTORIZACIÓN**

NOSOTROS, JAVIER ALEJANDRO CÉSPEDES SOTOMAYOR, DIEGO
XAVIER HIDALGO CARVAJAL

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución el trabajo denominado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA LEVA ELECTRÓNICA DE MOVIMIENTOS REPROGRAMABLES PARA EL LABORATORIO DE MECANISMOS Y VIBRACIONES DEL DECEM DE LA UNIVERSIDAD DE FUERZAS ARMADAS - ESPE”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Septiembre de 2014

Javier Alejandro Céspedes Sotomayor
C.C. No. 171937178-1

Diego Xavier Hidalgo Carvajal
CC. No. 171482288-7

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi padre, Patricio, por sus consejos, su ayuda, su apoyo incondicional durante toda mi vida, por ser un ejemplo de lucha y perseverancia; a mi madre, Concepción, por su entrega, su comprensión y su cariño que me ha brindado en los momentos buenos y en los momentos difíciles.

Javier Alejandro Céspedes Sotomayor

Dedico este trabajo a mis padres, Francisco y Silvana, quienes con su ejemplo de perseverancia, humildad, honestidad, integridad, amor y apoyo incondicional han inculcado en mí un espíritu de lucha, lealtad y compromiso, el cual me ha permitido alcanzar todas las metas profesionales y personales que me he propuesto.

A mi hermano, David, quien con su carácter valiente y emprendedor, ha sido una guía fundamental en mis decisiones las cuales han marcado el curso de mi camino.

Diego Xavier Hidalgo Carvajal

AGRADECIMIENTO

A mi padre, Patricio, por su apoyo a lo largo de mis estudios y por ser un ejemplo de vida.

A mi madre, Concepción, por su comprensión y por su apoyo que me ha ayudado a seguir adelante.

A mi hermano, Diego, por ser mi guía y más que un hermano por ser mi amigo.

A mi hermana, Karina, por su cariño y su respaldo en todos estos años.

A todos mis familiares, por todos los buenos momentos que hemos pasado.

A mis profesores, por sus enseñanzas tanto profesionales como para mi formación como personas.

A todos mis amigos, que en algún momento difícil me mostraron su apoyo y su confianza, por los momentos gratos que pasamos.

Javier Alejandro Céspedes Sotomayor

A Dios, por brindarme sabiduría en todas y cada una de mis decisiones, y por darme fuerza para enfrentar momentos adversos.

A mis padres, Francisco y Silvana, que con su inmensurable esfuerzo y paciencia, permitieron que alcance una meta más en mi vida. A mi hermano, David, quien gracias a sus experiencias de vida, supo aconsejarme en todo momento en temas académicos y personales.

A mis amigos, quienes han sido una compañía invaluable a lo largo de mi vida, apoyándome en momentos buenos y aún más en momentos malos.

A mis profesores, quienes supieron impartirme enseñanzas profesionales, y personales y a la Universidad de Fuerzas Armadas – ESPE, por haber hecho de mí una profesional de bien, útil ante la sociedad.

Diego Xavier Hidalgo Carvajal

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO.....	i
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
CAPÍTULO 1.....	1
1 GENERALIDADES.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4. ALCANCE.....	6
1.4.1. COMPONENTES MECÁNICOS.....	6
1.4.2. COMPONENTES ELECTRÓNICOS/ELÉCTRICOS	7
1.4.3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL	8
1.5. OBJETIVOS.....	10
1.5.1. OBJETIVO GENERAL	10
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
CAPÍTULO 2.....	12
2 MARCO TEÓRICO.....	12
2.1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE MECANISMOS	12
2.1.1. GENERALIDADES.....	13
2.1.2. GRADOS DE LIBERTAD	14
2.1.3. TIPOS DE MECANISMOS	14
2.2. LEVAS	19

2.2.1.	DEFINICIÓN	19
2.2.2.	APLICACIONES.....	20
2.2.3.	CLASIFICACIÓN.....	20
2.2.3.1.	POR EL TIPO DE SEGUIDOR	20
2.2.3.2.	POR EL TIPO DE LEVA	21
2.2.3.3.	POR EL TIPO DE MOVIMIENTO DEL SEGUIDOR	22
2.2.4.	DIAGRAMAS SVAJ.....	23
2.2.4.1.	DIAGRAMAS DE POSICIÓN.....	23
2.2.4.2.	DIAGRAMAS DE VELOCIDAD, ACELERACIÓN Y SOBRE ACELERACIÓN	24
2.2.5.	LEVAS PLANAS.....	24
2.2.5.1.	MOVIMIENTO CON VELOCIDAD UNIFORME	24
2.2.5.2.	MOVIMIENTO ARMÓNICO	25
2.2.5.3.	MOVIMIENTO CICLOIDAL.....	27
2.2.5.4.	MOVIMIENTO POLINOMIAL.....	28
2.2.6.	PARÁMETROS DE DISEÑO DE CURVAS DE POSICIÓN	29
2.3.	AUTOMATIZACIÓN MECATRÓNICA	30
2.3.1.	GENERALIDADES.....	30
2.3.2.	SISTEMAS DE CONTROL.....	31
2.4.	INSTRUMENTACIÓN MECATRÓNICA.....	35
2.4.1.	MEDICIÓN DE VELOCIDAD ANGULAR	36
2.4.2.	MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO LINEAL	38
2.5.	ACTUADORES.....	39
2.5.1.	TIPOS DE ACTUADORES.....	40
2.5.2.	ACTUADORES ELÉCTRICOS	40
2.5.2.1.	SERVOMOTORES	40
2.5.2.2.	ACTUADORES DYNAMIXEL	41
2.5.2.3.	DYNAMIXEL MX-64T	42
2.6.	CONTROLADORES	43
2.6.1.	MICROCONTROLADORES.....	43

2.6.2.	MICRO CONTROLADOR ATMEGA2560	44
2.6.3.	CONTROLADOR OPEN CM9.04.....	45
2.7.	SEÑALES	46
2.7.1.	TIPOS DE SEÑALES	46
2.7.2.	CONVERSIÓN ANÁLOGO/DIGITAL (ADC).....	48
2.7.3.	CONVERSIÓN DIGITAL/ANÁLOGO (DAC).....	49
2.8.	SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL.....	50
2.8.1.	MATLAB™	50
2.8.2.	INTERFACES GRÁFICAS DE USUARIO (GUI)	51
CAPÍTULO 3.....		52
3	DISEÑO MECATRÓNICO.....	52
3.1.	DISEÑO DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS	52
3.1.1.	DISEÑO DEL MECANISMO DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA SERVOMOTOR-CREMALLERA	52
3.1.2.	DISEÑO DEL TREN DE ENGRANES.....	53
3.1.3.	DISEÑO DE LOS ENGRANES	55
3.1.3.1.	SISTEMA DE DIENTES.....	55
3.1.3.2.	FUERZAS EN LOS ENGRANES	56
3.1.3.3.	DETERMINACIÓN DEL ANCHO DE CARA	56
3.1.3.4.	FACTOR DE SEGURIDAD EN LA ETAPA PIÑÓN- CREMALLERA	60
3.1.3.5.	FACTOR DE SEGURIDAD EN LA ETAPA DE REDUCCIÓN ...	61
3.1.4.	DISEÑO DE LOS EJES	65
3.1.5.	DISEÑO DE LAS CHAVETAS	77
3.1.6.	SELECCIÓN DE LOS RODAMIENTOS.....	79
3.1.7.	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE	83
3.1.8.	SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	85
3.2.	DISEÑO DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS Y ELECTRICOS....	88
3.2.1.	SELECCIÓN DEL SERVOMOTOR.....	88
3.2.2.	DISEÑO DE LA TRANSMISIÓN DE DATOS.....	91

3.2.3.	DISEÑO DE LA FUENTE DE PODER (ETAPA DE POTENCIA) ..	96
3.3.	SELECCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	99
3.3.1.	MEDICIÓN DE LA POSICIÓN DEL ACTUADOR.....	99
3.4.	DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL.	101
3.4.1.	SELECCIÓN DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN.....	101
3.4.2.	SISTEMA DE CONTROL DEL MECANISMO	102
3.4.3.	MODELAMIENTO DEL SENSOR DE POSICIÓN.....	104
3.5.	DISEÑO DEL CONTROL Y HMI.....	106
3.5.1.	PANTALLA PRINCIPAL	106
3.5.2.	ADQUISICIÓN DE SEÑALES Y CONTROL DE POSICIÓN	110
3.5.3.	VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS.....	111
CAPÍTULO 4	113
4	IMPLEMENTACIÓN	113
4.1.	IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO	113
4.2.	IMPLEMENTACIÓN DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS	115
4.3.	PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	119
CAPÍTULO 5	122
5	PRUEBAS Y RESULTADOS.....	122
5.1.	DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS	122
5.2.	PRUEBAS Y RESULTADOS DE COMPONENTES MECÁNICOS ...	123
5.3.	PRUEBAS Y RESULTADOS DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS	126
5.4.	PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL.....	130
5.5.	PRUEBAS Y RESULTADOS DEL HMI.....	133
5.6.	PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO.....	134
CAPÍTULO 6	140
6	ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO	140
6.1.	COSTOS DE MATERIA PRIMA	140
6.2.	COSTOS DE EQUIPOS, MATERIALES Y HERRAMIENTAS	141

6.3. COSTOS DE MANO DE OBRA.....	142
6.4. COSTO TOTAL	143
CAPÍTULO 7	144
7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	144
7.1. CONCLUSIONES	144
7.2. RECOMENDACIONES.....	146
BIBLIOGRAFÍA.....	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Módulo de Levas del Laboratorio de Mecanismos.....	1
Figura 1.2 Comparación leva mecánica vs leva mecatrónica	4
Figura 1.3 Componentes mecánicos de la Leva Electrónica	6
Figura 1.4 Componentes electrónicos de la Leva Electrónica	7
Figura 1.5 Sistema de Control	8
Figura 2.1 Nomenclatura de los dientes de engranes rectos.....	16
Figura 2.2 Mecanismo Generador de función	17
Figura 2.3 Grúa de Amantillado	18
Figura 2.4 Mecanismo generador de movimiento	18
Figura 2.5 Seguidor de rodillo.....	20
Figura 2.6 Seguidor de cara plana.....	21
Figura 2.7 Leva de placa para velocidades bajas.....	21
Figura 2.8 Leva cilíndrica.....	21
Figura 2.9 Leva de cara	22
Figura 2.10 Leva de cuña	22
Figura 2.11 Esquema de un seguidor de movimiento traslatorio	22
Figura 2.12 Esquema de un seguidor de movimiento oscilatorio.....	23
Figura 2.13 Diagrama de desplazamiento del seguidor de una leva de placa..	24
Figura 2.14 Comportamiento cinemático de una leva con velocidad uniforme .	25

Figura 2.15 Etapa de ascenso en el movimiento armónico	26
Figura 2.16 Etapa de descenso en el movimiento armónico	27
Figura 2.17 Etapa de ascenso en el movimiento cicloidal	27
Figura 2.18 Etapa de descenso en el movimiento cicloidal	28
Figura 2.19 Esquema general de un sistema de control.....	34
Figura 2.20 Esquema con dos estrategias de control	35
Figura 2.21 Diagrama de un Instrumento	36
Figura 2.22 Tacómetro mecánico	36
Figura 2.23 Tacómetro centrífugo.....	36
Figura 2.24 Tacómetro AC.....	37
Figura 2.25 Tacómetro DC	37
Figura 2.26 Tacómetro de frecuencia	37
Figura 2.27 Potenciómetro resistivo.....	38
Figura 2.28 Transductores de inductancia variable	38
Figura 2.29 Transductores Electro-ópticos	39
Figura 2.30 Transductor Ultrasónico.....	39
Figura 2.31 Servomotor Industrial.....	41
Figura 2.32 Esquema de componentes de un actuador DYNAMIXEL.....	41
Figura 2.33 Actuador DYNAMIXEL MX-64T	43
Figura 2.34 Esquema de un Microcontrolador	44
Figura 2.35 Microcontrolador ATMEGA 2560 y placa ARDUINO MEGA 2560.	45
Figura 2.36 Controlador OpenCM 9.04.....	46
Figura 2.37 Señal Analógica	47
Figura 2.38 Señal Digital	47
Figura 2.39 Conversión ADC	49
Figura 2.40 Aplicación creada mediante GUI	51
Figura 3.1 Tren de engranes.....	53
Figura 3.2 Diente de un engrane	57
Figura 3.3 Factor de concentración K_t	58
Figura 3.4 Sensibilidad de la muesca	59

Figura 3.5 Factor geométrico de 70 a 25 dientes.....	63
Figura 3.6 Factor geométrico de 25 a 70 dientes.....	64
Figura 3.7 Esquema del eje 1	66
Figura 3.9 Diagramas de fuerza cortante y momento flector del eje 1.....	67
Figura 3.8 Diagrama de cuerpo libre del eje 1	66
Figura 3.10 Factores de concentración de esfuerzos en flexión en la sección del engrane 1	69
Figura 3.11 Factores de concentración de esfuerzos en torsión en la sección del engrane 1	70
Figura 3.12 Esquema del eje 1	73
Figura 3.13 Diagrama de cuerpo libre del eje 2	73
Figura 3.14 Diagrama de fuerza cortante y momento flector del eje 2.....	74
Figura 3.15 Fuerza en una chaveta	78
Figura 3.16 Soporte de los Rodamientos. Diseñado en Solidworks™	84
Figura 3.17 Mesa de Soporte. Diseñado en Solidworks™	84
Figura 3.18 Guía de la Cremallera. Diseñado en Solidworks™	84
Figura 3.19 Placa de la Cremallera. Diseñado en Solidworks™	85
Figura 3.20 Mecanismo Ensamblado. Diseñado en Solidworks™	85
Figura 3.21 Motor Dynamixel MX64-T	89
Figura 3.22 Salida de un filtro RC pasa bajas.....	92
Figura 3.23 Diseño esquemático del filtro RC. Elaborado en Proteus	94
Figura 3.24 Convertidor de Voltaje DC a voltaje AC. Elaborado en Proteus	96
Figura 3.25 Fuente de 12V-4A. Elaborado en Proteus	97
Figura 3.26 Sección Transversal de la pisa vs. Corriente.....	98
Figura 3.27 Sección transversal vs Ancho de pista	98
Figura 3.28 Sensor SHARP GP2Y0A41SK0F	100
Figura 3.29 Placa Arduino MEGA 2560	102
Figura 3.30 Diagrama de bloques del controlador PID del motor Dynamixel MX-64T	103
Figura 3.31 Posición del Motor	104

Figura 3.32 Curva del Sensor SHARP en base a PWM	105
Figura 3.33 Curva del Sensor SHARP en base a Distancia	105
Figura 3.34 Linealización del Sensor SHARP	106
Figura 3.35 Pantalla Principal de la HMI	107
Figura 3.36 Indicador de que el sistema está listo para usar	107
Figura 3.37 Ventana para agregar intervalos	108
Figura 3.38 Ventana de Ayuda	109
Figura 3.39 Ejemplo de guías durante la ejecución de la interfaz	110
Figura 3.40 Pantalla de visualización del comportamiento del mecanismo	111
Figura 4.1 Eje 2 ensamblado completamente	113
Figura 4.2 Pieza diseñada para acoplar el eje 1 al eje del motor	114
Figura 4.3 Ensamble del segundo eje y verificación de espacio para cremallera	114
Figura 4.4 Placa cilíndrica de duralón y sensor ensamblado	115
Figura 4.5 Circuitos impresos de la fuente de voltaje y filtro de señales	116
Figura 4.6 Caja de acrílico para elementos electrónicos	117
Figura 4.7 Primer sub ensamble de la caja de acrílico	118
Figura 4.8 Sujeción de PCBs al piso intermedio	118
Figura 4.9 Ensamble de elementos electrónicos en el nivel inferior de la caja	118
Figura 4.10 Ensamble de la caja de acrílico y elementos electrónicos	119
Figura 5.1 Primer movimiento de prueba	135
Figura 5.2 Datos adquiridos del movimiento de prueba 1	136
Figura 5.3 Segundo movimiento de prueba	136
Figura 5.4 Datos adquiridos del movimiento de prueba 2	137
Figura 5.5 Tercer movimiento de prueba	137
Figura 5.6 Datos adquiridos del movimiento de prueba 3	138
Figura 5.7 Cuarto movimiento de prueba	139
Figura 5.8 Datos adquiridos del movimiento de prueba 4	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Características de los engranes.....	15
Tabla 2.2 Definiciones importantes de Sistemas de Control.....	32
Tabla 2.3 Sensores para medición de velocidad angular	36
Tabla 3.1 Características de los dientes de los engranes.....	55
Tabla 3.2 Características de la cremallera.....	86
Tabla 3.3 Características de los engranes.....	86
Tabla 3.4 Características de los ejes	86
Tabla 3.5 Características de las chavetas	87
Tabla 3.6 Características de los rodamientos	87
Tabla 3.7 Comparación de los motores	88
Tabla 3.8 Características del motor Dynamixel MX-64T	89
Tabla 3.9 Comparación entre modos de transmisión de datos.....	95
Tabla 3.10 Características de los sensores de medición de desplazamiento...	99
Tabla 3.11 Características del sensor ultrasónico HC-SR04	101
Tabla 3.12 Características de Arduino MEGA 2560	102
Tabla 3.13 Relación entre pendiente y ganancia.....	103
Tabla 6.1 Costos de Materia Prima.....	140
Tabla 6.2 Costo de equipos del módulo de leva electrónica.....	141
Tabla 6.3 Costo de materiales del módulo.....	141
Tabla 6.4 Costo de herramientas menores del módulo	142
Tabla 6.5 Costos de Mano de Obra.....	142

RESUMEN

Las levas son elementos importantes en algunas máquinas en donde se requiere realizar movimientos verticales con curvas suaves, esto es para evitar el desgaste de los elementos mecánicos producido por vibraciones y golpeteos que disminuyan la vida útil de las máquinas. Uno de los inconvenientes que poseen los mecanismos leva-seguidor es el costo elevado de fabricación que se requiere para las levas por lo que es conveniente elaborar un sistema en el que se pueda configurar los movimientos verticales. La leva electrónica permite realizar movimientos reprogramables, lo cual significa que se pueden elaborar un número infinito de levas con un mismo mecanismo y que además permite realizar movimientos combinados que muy difícilmente se puede conseguir con la leva tradicional. El mecanismo de la leva electrónica consta de una cremallera movida por un piñón el cual está adaptado a un motor al que se le controla su posición angular mediante programación y el uso de software en el que el usuario pueda reconfigurar los movimientos. El módulo construido será utilizado en el laboratorio de Mecanismos y Vibraciones para las diferentes prácticas, el mecanismo posee una caja de engranes en el que se aumenta la velocidad lineal de la cremallera y que está adaptado al motor Dynamixel el cual es controlado mediante la placa OPENCM 9.04-b y los datos son transmitidos mediante la señal PWM del Arduino Mega 2560 hacia el controlador; el usuario interactúa con el HMI elaborado en MATLAB por lo que el presente proyecto es para fines didácticos.

PALABRAS CLAVE:

- **LEVA ELECTRÓNICA**
- **MOVIMIENTOS REPROGRAMABLES**
- **MECANISMO LEVA-SEGUIDOR**
- **MECANISMO MOTOR-CREMALLERA**
- **CONTROL DE POSICIÓN**

ABSTRACT

The cams are important elements in some machines where it is required to perform vertical movements with gentle curves, this is to prevent wear of mechanical parts caused by vibration and rattling that reduce the useful life of the machines. One of the drawbacks that have the cam-follower mechanisms is the high manufacturing cost required for the cams so it is desirable to develop a system that can be configured vertical movements. The electronic cam allows reprogrammable movements, which means you can draw an infinite number of cams with the same mechanism also allows combined movements which can hardly be achieved with traditional cam. The electronic cam mechanism comprises a rack driven by a pinion which is adapted to an engine that its angular position is controlled by programming and the use of software on the user to reconfigure the movements. The built module will be used in the laboratory Mechanisms and vibrations for different practices, the mechanism has a gearbox in which the linear speed of the rack is increased and which is adapted to the engine Dynamixel which is controlled by the plate OpenCM 9.04- by the data is transmitted by the PWM signal from the microcontroller Mega 2560 to the controller; the user interacts with the HMI developed in MATLAB so this project is for educational purposes.

CAPÍTULO 1

1 GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

El laboratorio de Mecanismos y Vibraciones tiene el propósito de aplicar los conocimientos teóricos adquiridos en las materias de Mecanismos y Vibraciones en la práctica, mediante el uso de los equipos presentes en el mismo.

En el laboratorio de Mecanismos y Vibraciones se encuentran varios módulos en su mayoría de funcionamiento puramente mecánico, por lo que se encuentran desactualizados del momento tecnológico actual. Para el caso del estudio de mecanismos de levas planas, el laboratorio cuenta con un módulo que permite observar el comportamiento de un seguidor, el cual se acopla a la leva en estudio mediante un resorte, ver figura 1.1.



Figura 1.1 Módulo de Levas del Laboratorio de Mecanismos

Este módulo solamente permite visualizar el comportamiento de un seguidor en función de las dimensiones geométricas de la leva en estudio, es decir su movimiento depende únicamente de las levas disponibles por lo que si se quisiera implementar en el seguidor un movimiento nuevo, se debería manufacturar la leva adecuada para dicho movimiento. De igual forma los

estudiantes no pueden observar el comportamiento cinemático de la leva en análisis, ya que el módulo existente en el laboratorio no tiene un sistema de adquisición de datos adecuado para dicho propósito.

El presente proyecto pretende utilizar la tecnología necesaria para implementar un sistema de leva reprogramable, incluyendo un sistema de adquisición y control de modo automático. Este sistema se basa en un principio muy novedoso en la actualidad y muy poco aplicado en América Latina, conocido como leva reprogramable o leva electrónica, la cual permite mediante el uso de un servo motor y un sistema de engranaje cremallera, la reprogramación del movimiento en un efector o seguidor mediante el uso de un software. De igual forma el presente proyecto permitirá a los estudiantes apreciar el comportamiento cinemático de varias configuraciones de la leva electrónica observando que se producen iguales resultados que en los mecanismos de levas planas.

El único proyecto afín que existe actualmente en el laboratorio de Mecanismos y Vibraciones es el Equipo de análisis de Levas elaborado en el 2007, el cual se describió en párrafos anteriores, sin embargo se encuentra totalmente desactualizado con las posibilidades tecnológicas actuales en cuanto se refiere a utilidad y procesos de aprendizaje.

Otro proyecto que pretende modernizar el laboratorio de Mecanismos y Vibraciones de la Universidad de Fuerzas Armadas – ESPE, al igual que profundizar en el tema de vibraciones es el Equipo de laboratorio para estudiar vibraciones mecánicas y sistemas rotativos, elaborado en el año 2012 por dos estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Realizando un estudio exhaustivo de varias fuentes bibliográficas y recursos de búsqueda por internet, no se encontraron módulos que utilicen el principio de la leva electrónica para procesos de aprendizaje, por lo cual la implementación de este sistema en la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE, daría una

ventaja a los estudiantes principalmente de Ingeniería Mecatrónica, mostrándoles una de las aplicaciones de los conocimientos adquiridos en la carrera, y la utilidad de la elaboración de productos totalmente mecatrónicos como lo es la leva electrónica o reprogramable.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

A lo largo del desarrollo y aplicación de la Ingeniería Mecánica, las levas han sido elementos fundamentales para la generación de movimientos, automatización entre otras aplicaciones. Por esta razón durante muchos años el diseño de las mismas se ha perfeccionado de tal forma que las levas resultantes cumplan con su función de forma totalmente efectiva.

Sin embargo, a pesar de que las levas han aportado mucho a la Ingeniería en general, estas tienen limitaciones. La principal limitación es que una vez que una leva ha sido manufacturada para generar un movimiento en su respectivo seguidor, esta no tendrá posibilidad alguna de generar otro movimiento en el mismo. Por ejemplo, en ocasiones las levas son utilizadas en procesos de producción de ciertos productos. Evidentemente la necesidad de producción de dichos productos varía a lo largo del tiempo, sin embargo los procesos en sí no pueden hacerlo debido a que el diseño de sus elementos mecánicos no lo permiten.

El presente trabajo pretende generar un producto totalmente mecatrónico, el cual permita generar un movimiento en un seguidor, el mismo que generaría una leva ordinaria, pero considerando que dicho movimiento es reprogramable dependiendo de la aplicación que tenga el mismo, ver figura 1.2.

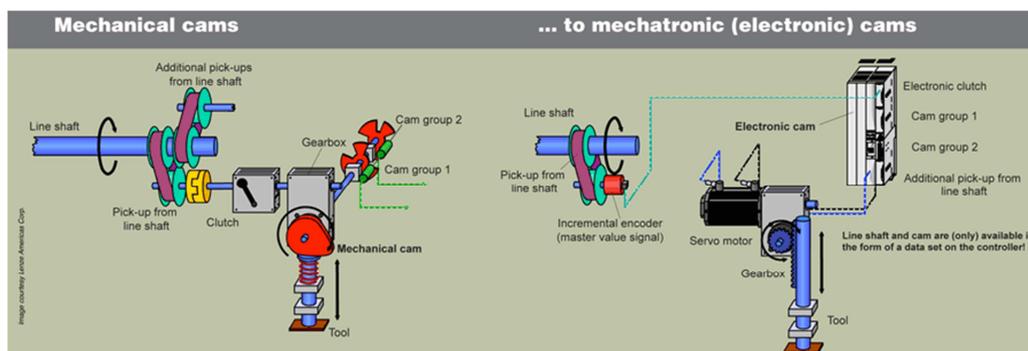


Figura 1.2 Comparación leva mecánica vs leva mecatrónica¹

Este producto tendrá varias ventajas sobre mecanismos de levas convencionales, ya que será totalmente ajustable a las necesidades de su usuario, evitando que el mismo pierda tiempo en el diseño de nuevas levas en el caso de que se requiera una variación en el mecanismo. De igual forma los costos de modificación del movimiento esperado en el seguidor serán relativamente bajos comparados con los que se necesitarían para cambiar dicho movimiento mecánicamente.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Las levas son elementos mecánicos que desempeñan funciones muy importantes en el funcionamiento de muchas máquinas, como por ejemplo en las imprentas, máquinas herramientas talladoras de engranajes, entre otras. Las levas son parte indispensable en cualquier clase de maquinaria en la que el control del tiempo y el control automático son importantes.

La cinemática de una leva permite obtener información sobre la posición, velocidad, aceleración y sobre aceleración de un seguidor o actuador acoplado a la misma, en un ciclo de rotación de la leva. Estos factores son muy importantes ya que el seguidor en una máquina real será un actuador cuyos parámetros cinemáticos son de gran importancia tanto para el proceso que desempeña la máquina como para el buen estado de la misma.

¹ (Machine Design, 2012)

El propósito de estudiar la cinemática, es realizar una comparación de la leva clásica, utilizada en el módulo actual del laboratorio que se muestra en la figura 1.1, con la leva electrónica que se va a desarrollar en este proyecto.

Las levas son elementos fundamentales en maquinaria industrial, razón por la cual han perdurado durante muchos años, sin embargo una vez que una leva ha sido manufacturada, es imposible reconfigurarla de tal forma que se obtenga un movimiento distinto al inicial en el actuador. En la actualidad gracias a los avances tecnológicos tanto en electrónica como en software y programación, es posible elaborar productos mecatrónicos que puedan reconfigurarse de tal forma que permitan ahorrar costos a nivel industrial y a nivel de aprendizaje permitan inducir a los estudiantes sobre todo de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, en las aplicaciones que pueden tener los conocimientos adquiridos a lo largo de sus estudios universitarios.

El presente proyecto tiene la finalidad de proporcionar al laboratorio de Mecanismos y Vibraciones una herramienta que se ajuste a las posibilidades tecnológicas de la actualidad y que permita a los estudiantes de las carreras de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica visualizar el funcionamiento de una leva electrónica o reprogramable a la vez que la cinemática de los mecanismos de levas planas para los que está programada, de una forma interactiva, mediante el uso de un software en el que se pueda visualizar las curvas tanto de trayectoria, velocidad, aceleración y sobre aceleración, parámetros muy importantes por las razones descritas anteriormente.

Los principios de funcionamiento del módulo didáctico que será implementado, pueden ser utilizados en un futuro para su uso industrial, lo cual representaría un aporte tecnológico significativo, ya que a nivel latinoamericano el concepto de levas electrónicas no es muy aplicado en la actualidad, de igual forma se podrían probar diferentes configuraciones de levas de forma eficiente y con un alto nivel de confiabilidad en los resultados.

1.4. ALCANCE

1.4.1. COMPONENTES MECÁNICOS

Los componentes mecánicos que constituyen el presente proyecto, se los menciona en la figura 1.3.

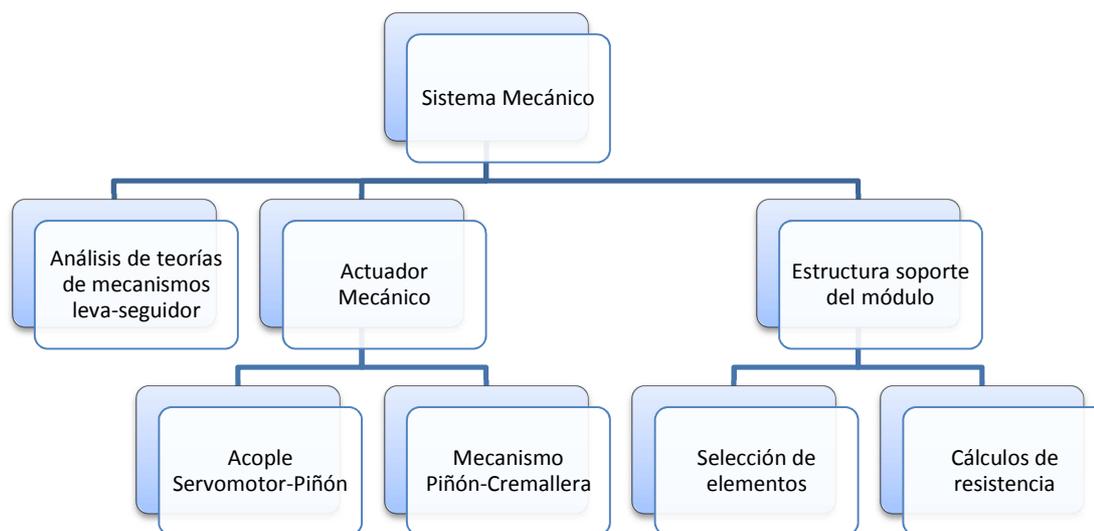


Figura 1.3 Componentes mecánicos de la Leva Electrónica

- *Análisis de las teorías de mecanismos leva-seguidor:* para aplicar los conceptos teóricos al sistema que será desarrollado para el Laboratorio de Mecanismos y Vibraciones del DECEM, basándose en:
 - Ley fundamental de las levas
 - Adquisición de señales de posición en función del tiempo.
 - Conversión de la señal de posición a velocidad y aceleración.
 - Tipos de movimientos de las levas.
 - Curvas cinemáticas de los movimientos de las levas.
- *Actuador Mecánico:*
 - *Acople Servomotor-Piñón:* Se requiere realizar un acople correcto, que permita que en el piñón se genere el torque necesario para el proyecto.

- *Mecanismo piñón-cremallera*: Este es el mecanismo, que sustituye a la construcción convencional de una leva clásica, el piñón se encarga de dar el movimiento rotatorio, mientras que la cremallera corresponde al movimiento del seguidor.
- Estructura soporte del módulo
 - Diseño de la estructura de soporte para todas las partes mecánicas.
 - Selección de elementos mecánicos necesarios para la implementación del módulo.
 - Cálculo de la resistencia para el soporte de las partes mecánicas.

1.4.2. COMPONENTES ELECTRÓNICOS/ELÉCTRICOS

Los componentes electrónicos que constituyen el presente proyecto, se los menciona en la figura 1.4.

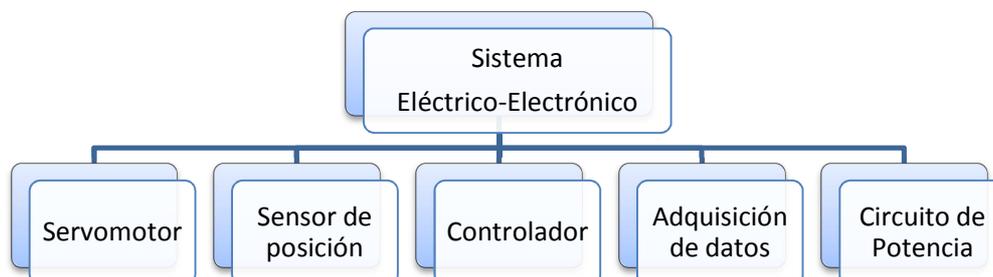


Figura 1.4 Componentes electrónicos de la Leva Electrónica

- *Servomotor*: Selección e implementación de un Servomotor, que será utilizado para proporcionar el movimiento rotativo con gran precisión, y generando el torque necesario para aplicaciones industriales.
- *Sensor de Posición*: Selección y Adquisición de un sensor que permita medir con la mayor exactitud posible la posición del seguidor.
- *Controlador*: El controlador que se va a requerir en el presente proyecto, debe cumplir con las siguientes características:

- Vinculación con el software que será utilizado para desarrollar la interfaz y el control de la aplicación, MATLAB.
- Varios canales de entrada análoga, necesarios para acoplar las señales proporcionadas por los sensores.
- Canales de salida para controlar la señal de posición que irá al motor.
- Disponibilidad del dispositivo en el mercado.
- *Adquisición de datos:* Conexiones necesarias del sensor de posición a la etapa de adquisición de datos del controlador.
- *Circuito de Potencia:* Diseño e implementación del circuito de potencia para el funcionamiento del servomotor, con conexión al controlador.

1.4.3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL

Una vez encontrado el parámetro fundamental que deberá ser controlado en el sistema de leva electrónica, que es la posición, se ha determinado que el sistema de control óptimo que garantice un tiempo de respuesta mínimo y una alta precisión es un controlador PID (ver figura 1.5), el cual se enfoca en el error producido como la diferencia entre el set point o valor de posición deseado y posición actual del eje del motor, de tal forma que se aplique una corrección, la misma que permitirá al sistema auto ajustarse y generar el comportamiento esperado para el seguidor.

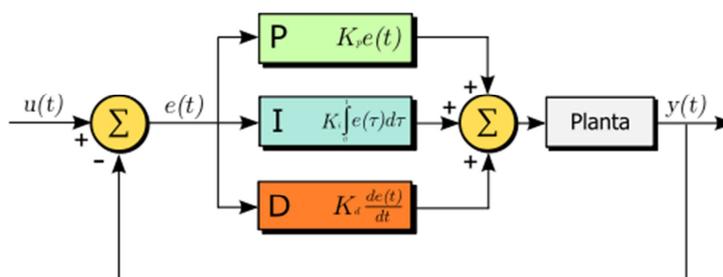


Figura 1.5 Sistema de Control ²

² (Electronica Pascual, 2010)

En este sistema es muy importante al igual que establecer el set point o referencia de la posición para el eje del servomotor, por lo tanto para la cremallera o seguidor, establecer las máximas desviaciones que se pueden producir en la posición, es decir el máximo error que puede tener el eje del motor para que el comportamiento del seguidor sea el esperado por el usuario. El controlador PID generalmente está incluido en el Servomotor, y la comunicación entre la etapa de control y la etapa de potencia será mediante un micro controlador AVR.

1.4.4. SOFTWARE PARA IMPLEMENTACIÓN, ANÁLISIS Y SIMULACIÓN

Los programas que se usarán durante el desarrollo de la tesis se detallan a continuación:

- Software SOLIDWORKS para diseño CAD/CAE, el cual permitirá el diseño de los elementos mecánicos del módulo de laboratorio, así como la simulación de los mismos para determinar los esfuerzos y demás parámetros mecánicos a los que se verán expuestos cuando entren a operación.
- Software Proteus Professional ISIS para la simulación de los circuitos electrónicos y eléctricos que serán utilizados en el módulo de leva electrónica.
- Software Proteus Professional ARES para la elaboración de los PCBs que se encargarán del comportamiento electrónico y eléctrico del módulo.
- Matlab, para el establecimiento de una interfaz HMI de control y adquisición de datos.
- Software ROBOTIS, para la programación del controlador OPENCM del motor Dynamixel.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir una leva electrónica de movimientos reprogramables para el laboratorio de mecanismos y vibraciones del DECEM de la universidad de Fuerzas Armadas - ESPE.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar, dimensionar y seleccionar todos los componentes mecánicos, electrónicos y de instrumentación que formarán parte del módulo de laboratorio, de tal forma que tenga una duración prolongada, mostrando de forma didáctica la sinergia de las diversas áreas que involucra la ingeniería Mecatrónica.
- Comprobar que mediante un diseño mecatrónico bien realizado se puede generar un módulo de leva electrónica muy versátil con la capacidad de cumplir las funciones de cualquier leva plana ordinaria y de adaptarse a cualquier necesidad de un usuario, sin verse restringido por complejidad de fabricación o costos.
- Seleccionar un modo adecuado de transmisión de datos entre los controladores electrónicos del módulo y la interfaz de usuario, de tal forma, que este sea totalmente funcional y a la vez económico.
- Utilizar elementos tecnológicos de vanguardia en la elaboración del módulo de leva electrónica, de tal forma que los estudiantes de ingeniería Mecánica y Mecatrónica observen las ventajas que brindan los mismos cuando se los emplea correctamente.
- Determinar las ecuaciones de trayectoria de varios mecanismos de levas planas, las cuales permitirán posteriormente obtener las distintas configuraciones de levas requeridas por el usuario, obteniendo el movimiento deseado en el actuador o efector.

- Realizar una interfaz agradable al usuario la cual permita visualizar todos los datos procesados que definen el comportamiento cinemático del seguidor.
- Elaborar los manuales de usuario que permitirán un correcto manejo del módulo de los estudiantes, así como la revisión periódica que permitirá un funcionamiento óptimo del mismo.

CAPÍTULO 2

2 MARCO TEÓRICO

2.1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE MECANISMOS

- Un mecanismo es un conjunto de elementos mecánicos y/o electrónicos, los cuales reciben una energía mecánica de entrada y mediante la configuración de sus componentes realizan un trabajo o cumplen una función específica.
- Un mecanismo es un conjunto de elementos mecánicos que desempeñan una función determinada en una máquina. El conjunto de funciones de los mecanismos en una máquina será el necesario para que la misma realice una tarea deseada.

Eslabones o miembros

Se denomina eslabones o miembros de un mecanismo a los cuerpos que forman un par.

Pares Cinemáticos

Es un acoplamiento móvil de dos cuerpos sólidos que se encuentran en contacto. Un par cinemático no puede estar compuesto por cuerpos que al estar en contacto no puedan moverse el uno respecto al otro.

La movilidad de un miembro no depende del material del que está hecho el segundo miembro, ni de la forma de éste que no entra en contacto con el primero.

Cadena cinemática

Es el sistema de eslabones unidos en los pares cinemáticos.

Mecanismo

Se denomina mecanismo al sistema de eslabones unidos recíprocamente y destinados a realizar un movimiento requerido.

En términos de ingeniería, un mecanismo se define como una cadena cinemática cerrada con un eslabón fijo.

Máquina

Es el mecanismo o conjunto de mecanismos destinados a realizar un trabajo útil, relacionado con la producción, la transformación de energía o el transporte.

Esquemas cinemáticos

Sirven de guía para el análisis cinemático de cualquier mecanismo existente. En un esquema cinemático todos los miembros del dispositivo en estudio deben ser representados por eslabones de pares cinemáticos.

2.1.1. GENERALIDADES

Muchas de las actividades a nivel industrial e incluso artesanal requieren de la ayuda de máquinas y mecanismos, los cuales constituyen un pilar fundamental en dichas actividades.

En el campo de la ingeniería sea cual sea su especialidad, el empleo de máquinas y mecanismos es una necesidad, por lo que durante la evolución de la ingeniería mecánica, se han implementado mecanismos más robustos y más flexibles con las necesidades de sus usuarios. Este aporte en gran medida se debe a la evolución de la ingeniería electrónica y al evidente aporte de la ingeniería Mecatrónica.

Teoría de los mecanismos y máquinas

Es una rama dentro de la Ingeniería Mecánica que sirve para estudiar las relaciones entre la geometría y movimientos de los elementos de un mecanismo o conjunto de mecanismos, al igual que los esfuerzos que se generan durante dichos movimientos.

2.1.2. GRADOS DE LIBERTAD

Los grados de libertad o movilidad de un mecanismo se define como el número de parámetros de entrada que es necesario controlar para que dicho mecanismo se comporte de una forma deseada, y llevar a un punto del mismo a una posición en particular.

2.1.3. TIPOS DE MECANISMOS

La mejor forma de clasificar los mecanismos es mediante su funcionalidad, en cuyo caso los mecanismos se clasifican en:

Mecanismos transmisores de movimiento

Estos mecanismos se utilizan para transmitir movimientos de giro entre ejes que se encuentran alejados a cierta distancia. Estos mecanismos se conforman por un eje conductor, un eje conducido y otros elementos que se ajustan a los mismos, y los cuales dependen del mecanismo en particular.

Engranés Rectos

Los engranes rectos son ruedas dentadas que se caracterizan por tener dientes paralelos a su eje de rotación y se emplean cuando se requiere la transmisión de movimiento rotatorio entre ejes paralelos.

Existen varios parámetros que deben considerarse para el diseño de un engrane recto, estos se detallan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1

Características de los engranes

Círculo de paso	Es un círculo teórico en el cual se basan los cálculos para el diseño de un engrane, y supone que sobre el mismo se encuentran los puntos de los dientes que harán contacto para la transmisión de movimiento y potencia.
Diámetro de paso	Es el diámetro del círculo de paso.
Paso circular	Es la distancia medida sobre el círculo de paso entre dos puntos adyacentes correspondientes de dos dientes.
Módulo	Es un índice de tamaño de los dientes de un engrane en unidades del SI.
Paso diametral	Es el recíproco del módulo y se utiliza en unidades del sistema inglés.
Addendum	Es la distancia radial entre la cresta de un diente y el círculo de paso del engrane.
Dedendum	Es la distancia radial entre el fondo de un diente y el círculo de paso del engrane.
Círculo de raíz	Es el círculo que pasa por la parte inferior de los dientes de un engrane y los puntos de inicio del dedendum.
Altura	Es la suma del addendum y el dedendum de un diente.
Círculo de claro	Es un círculo tangente al círculo de la raíz de un engrane acoplado.
Claro	Es la cantidad por la que el dedendum de un engrane excede al addendum de su engrane acoplado.
Ancho de cara	El ancho de cara es el espesor que tienen los dientes y por lo tanto el engrane. El mismo que permitirá que los dientes no se rompan cuando son sometidos a esfuerzos.

En la figura 2.1 se pueden observar los parámetros de un engrane recto mencionados anteriormente.

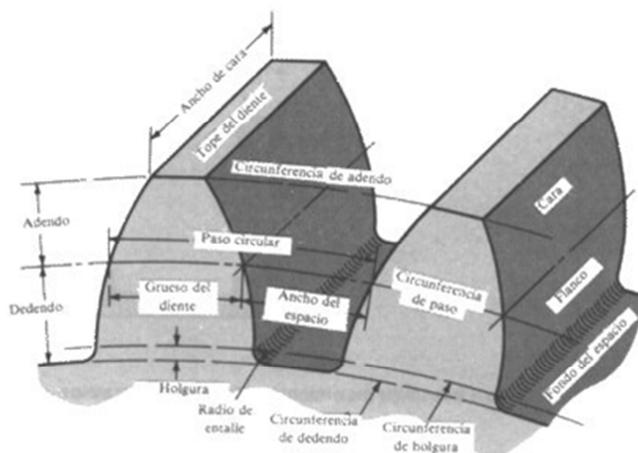


Figura 2.1 Nomenclatura de los dientes de engranes rectos³

Tren de Engranes

Los engranes en general además de transmitir movimiento, permiten la transmisión de potencia mecánica, la cual resulta del producto del torque por la velocidad angular. En un tren de engranes, es decir en un acoplamiento de los mismos, en el cual se supone que cada uno de los engranes se encuentra sobre un eje de rotación, la velocidad de giro de cada de los engranes dependerá de cuál de los dos sea el conductor, es decir el que imprime velocidad al sistema, y del número de dientes de ambos engranes.

En un tren de engranes es importante un parámetro denominado valor del tren que no es más que la relación entre el producto de los números de dientes conductores sobre el producto de los conducidos. La velocidad del engrane y por lo tanto del eje conducido resultará del producto entre el valor del tren y la velocidad inicial aplicada al sistema. Lo mencionado se resume en las siguientes ecuaciones:

³ (Shigley & Uicker, 2001)

$$e = \frac{\text{producto de los números de dientes impulsores o conductores}}{\text{producto de los números de dientes impulsados o conducidos}} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$nL = e * nF \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde nL representa la velocidad del último engrane del tren, e el valor del tren y nF la velocidad del primer engrane del tren.

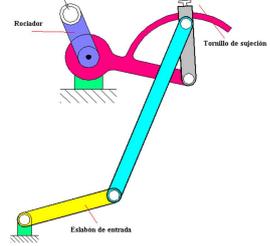
La variación de la velocidad angular entre los ejes de rotación del sistema involucra una variación en el torque de cada uno de los mismos. Por lo tanto en etapas de reducción, es decir en las que la velocidad del eje conducido sea menor que la del eje conductor, el torque será mayor, y viceversa.

Mecanismos transformadores de movimiento

Estos mecanismos se encargan de tomar un movimiento de entrada a los mismos, y producir otro tipo de movimiento a la salida de los mismos. Los mecanismos que se encuentran dentro de este grupo se describen a continuación:

Tabla 2.2

Tipos de mecanismos

Tipo de mecanismo	Ilustración	Descripción
Mecanismo generador de función	 <p data-bbox="635 1765 1023 1816">Figura 2.2 Mecanismo Generador de función⁴</p>	<p data-bbox="1086 1496 1417 1832">Consiste en un conjunto de eslabones en el que el movimiento relativo (o fuerzas) entre eslabones conectados a tierra es de interés. La figura es un eslabonamiento impulsor para un aspersor rotativo</p>

⁴ (Olmedo, 2011)

CONTINÚA →

Mecanismo generador de trayectoria



Figura 2.3 Grúa de Amantillado⁵

En este tipo de mecanismos interesa solamente la trayectoria de un punto trazador de trayectoria sobre el eslabón acoplador. La grúa de amantillado a nivel es un eslabonamiento que genera aproximadamente un movimiento de línea recta del punto trazador de trayectoria. (Olmedo, 2011)

Mecanismo generador de movimiento

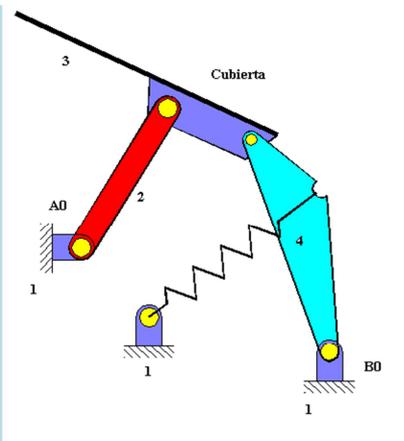


Figura 2.4 Mecanismo generador de movimiento⁶

En este tipo de mecanismos es de interés el movimiento total del eslabón acoplador. Es de gran importancia su trayectoria en x y de un punto cualquiera para su orientación.

De acuerdo al tipo de movimiento que realizan, los mecanismos se clasifican en:

⁵ (Olmedo, 2011)

⁶ (Olmedo, 2011)

Planos

Este tipo de mecanismos tiene la característica de que sus eslabones y sus puntos forman curvas que se encuentran en un solo plano o en planos paralelos entre sí.

Esféricos

En estos mecanismos, los eslabones tienen algún punto estacionario o fijo y otro que describe un movimiento esférico.

Espaciales

En este tipo de mecanismos, no existe restricción alguna respecto a los movimientos relativos de los eslabones.

2.2. LEVAS

2.2.1. DEFINICIÓN

Un mecanismo de leva, en su forma más sencilla, es un mecanismo de tres eslabones con un par superior. Este mecanismo se emplea en la mayoría de los casos para transformar el movimiento giratorio del eslabón conductor en movimiento del eslabón conducido según la ley dada.

Una leva es un elemento mecánico que va sujeto a un eje y tiene un contorno con forma especial. De este modo, el giro del eje hace que el perfil o contorno de la leva toque, mueva, empuje o conecte una pieza conocida como seguidor.

Al diseñar un mecanismo de leva, es conveniente determinar la ley del movimiento del eslabón conducido o seguidor, teniendo en cuenta el papel que debe cumplir este mecanismo una vez que se encuentre instalado.

2.2.2. APLICACIONES

Existe una amplia variedad de aplicaciones de los mecanismos de levas, y se los puede encontrar en muchas máquinas industriales por ejemplo:

- El sistema de alimentación de gases en motores de combustión interna.
- Las prensas y válvulas controladas mecánicamente utilizan levas para llenar y sellar líquidos.
- Mecanismos para controlar movimientos intermitentes (indexadores).
- Válvulas de control de caudal empleadas en laboratorios de saneamiento de agua potable.
- Se las encuentra en tornos automáticos.
- Se las utiliza para el embrague y desembrague del sistema de centrifugado de algunas lavadoras.
- Automatización de secuencias de interruptores de control en equipos eléctricos.

2.2.3. CLASIFICACIÓN

2.2.3.1. POR EL TIPO DE SEGUIDOR

Seguidor de rodillo

El seguidor de rodillo presenta fricción de rodadura lo que permite una mayor duración de la leva, ver figura 2.5.

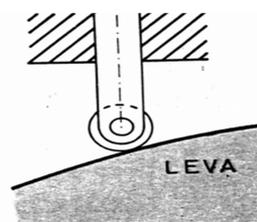


Figura 2.5 Seguidor de rodillo⁷

⁷ (Universidad Nacional de Rosario, 2006)

Seguidor de cara plana

El seguidor de cara plana es mucho más compacto y por esta razón es utilizado profusamente en los motores de combustión interna, ver figura 2.6.

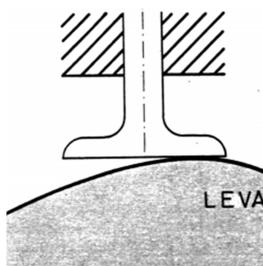


Figura 2.6 Seguidor de cara plana⁸

2.2.3.2. POR EL TIPO DE LEVA

Tabla 2.3

Tipos de Leva

Tipo de Leva	Ilustración	Descripción
Leva de placa	<p>Figura 2.7 Leva de placa para velocidades bajas⁹</p>	El cuerpo de este tipo de levas tiene la forma de un disco con el contorno de la leva formando sobre la circunferencia, por lo general la línea de acción del seguidor es perpendicular al eje de la leva y hace contacto con la leva con ayuda de un resorte.
Leva cilíndrica	<p>Figura 2.8 Leva cilíndrica¹⁰</p>	Leva de tipo axial con forma cilíndrica con una o más ranuras labradas sobre el cilindro, el cual al girar produce el desplazamiento del seguidor en dirección paralela al eje de giro de la leva.

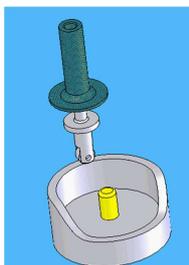
⁸ (Universidad Nacional de Rosario, 2006)

⁹ (Shigley & Uicker, 2001)

¹⁰ (Shigley & Uicker, 2001)

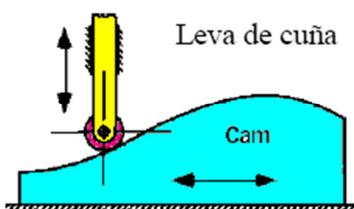
CONTINÚA →

Leva de cara

Figura 2.9 Leva de cara¹¹

Leva de tipo axial con forma de un cilindro el cual tiene una sección oblicua respecto a su eje, sobre la cual se apoya el seguidor el cual se mueve en dirección paralela al eje de giro de la leva.

Leva de cuña

Figura 2.10 Leva de cuña¹²

Este tipo de leva es similar a la leva de placa, pero generalmente es animada con un movimiento de traslación.

2.2.3.3. POR EL TIPO DE MOVIMIENTO DEL SEGUIDOR

Leva de seguidor traslatorio

En este caso el seguidor tiene su movimiento restringido a un movimiento lineal alternativo que dependerá de las propiedades geométricas de la leva, ver figura 2.11.

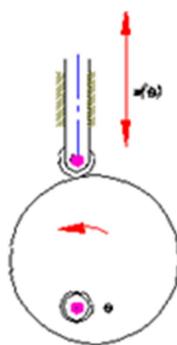


Figura 2.11 Esquema de un seguidor de movimiento traslatorio¹³

¹¹ (Olmedo, 2011)

¹² (Olmedo, 2011)

Leva de seguidor oscilatorio

El seguidor solamente se encuentra restringido en un su extremo de tal forma que el movimiento que se genera en el mismo refleja un movimiento giratorio que dependerá de las propiedades físicas de la leva, ver figura 2.12.

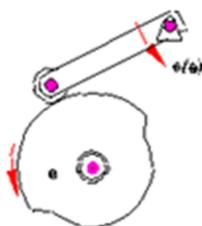


Figura 2.12 Esquema de un seguidor de movimiento oscilatorio¹⁴

2.2.4. DIAGRAMAS SVAJ

Son gráficas que muestran la posición, velocidad, aceleración y sobre aceleración del seguidor en un ciclo de rotación de la leva. Se utilizan para comprobar que el diseño propuesto cumple con la ley fundamental del diseño de levas.

2.2.4.1. DIAGRAMAS DE POSICIÓN

La representación matemática de la función que relaciona el desplazamiento del seguidor con la posición angular de la leva, se denomina diagrama cinemático, y la función recibe el nombre de función de desplazamiento, se muestra en la figura 2.13. Por otra parte, el desplazamiento del seguidor puede ser tanto lineal como angular.

¹³ (Olmedo, 2011)

¹⁴ (Olmedo, 2011)

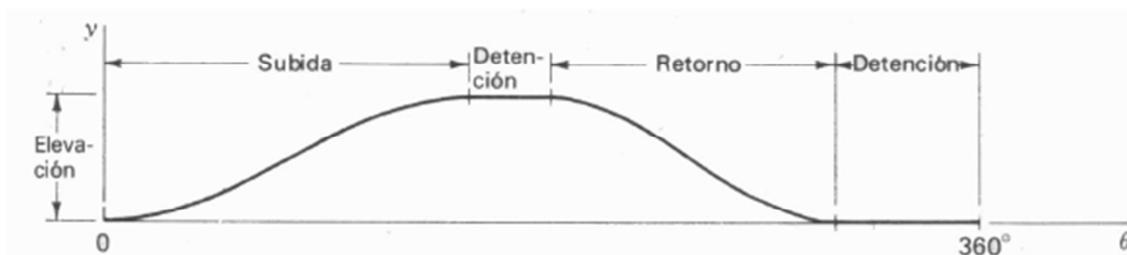


Figura 2.13 Diagrama de desplazamiento de una leva de placa¹⁵

En un diagrama de desplazamientos se puede identificar una porción de la gráfica conocida como subida en la cual el movimiento del seguidor es hacia afuera del centro de la leva. La subida máxima se conoce como elevación. Los períodos durante los cuales el seguidor se encuentra en reposo se conocen como detenciones y el retorno es el período en el que el movimiento del seguidor es hacia adentro de la leva.

2.2.4.2. DIAGRAMAS DE VELOCIDAD, ACELERACIÓN Y SOBRE ACELERACIÓN

Los diagramas de velocidad, aceleración y sobre aceleración se obtienen mediante la primera, segunda y tercera derivada del diagrama de posición.

2.2.5. LEVAS PLANAS

Los desplazamientos del seguidor pueden ser diseñados de acuerdo a ciertas leyes de desplazamiento, las cuales se detallan a continuación:

2.2.5.1. MOVIMIENTO CON VELOCIDAD UNIFORME

Este movimiento presenta aceleraciones infinitas al inicio y al final del movimiento, por lo que actuarían fuerzas muy altas que generan golpes fuertes y vibraciones.

¹⁵ (Miranda, 2003)

Es por esto que una ley de movimiento lineal se usa sólo en tramos de las fases de retorno, y en la ley de movimiento se introducen modificaciones en las transiciones de fase. Se puede realizar un redondeo por curvas tangentes, éste se hace en los puntos de inflexión, ver figura 2.14.

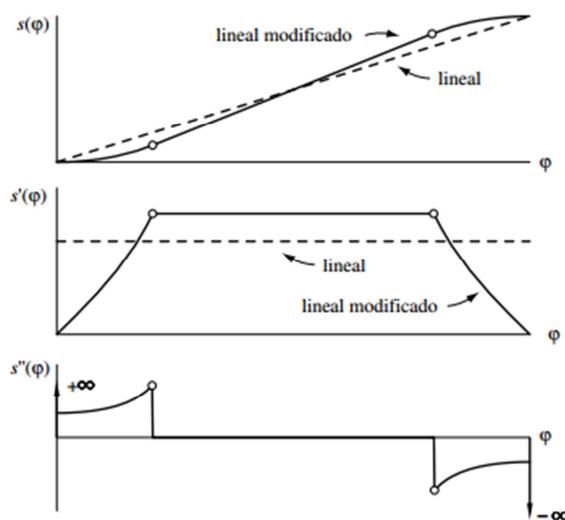


Figura 2.14 Comportamiento cinemático de una leva velocidad uniforme¹⁶

2.2.5.2. MOVIMIENTO ARMÓNICO

El movimiento armónico se puede describir mediante las siguientes ecuaciones:

$$Y = \frac{L}{2} * (1 - \cos(\frac{\pi\theta}{\beta})) \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$$Y' = \frac{\pi L}{2\beta} * \text{sen}(\frac{\pi\theta}{\beta}) \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$Y'' = \frac{\pi^2 L}{2\beta^2} * \text{cos}(\frac{\pi\theta}{\beta}) \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Estas ecuaciones presentan derivadas que son continuas y no tienen puntos en los que existan cambios bruscos de pendiente. Por esta razón este

¹⁶ (Universidad Tecnológica de Pereira)

tipo de movimiento es una muy buena elección cuando se requieren levas de alta velocidad.

A continuación se puede observar en la figura 2.15 el comportamiento de este movimiento para el caso del ascenso.

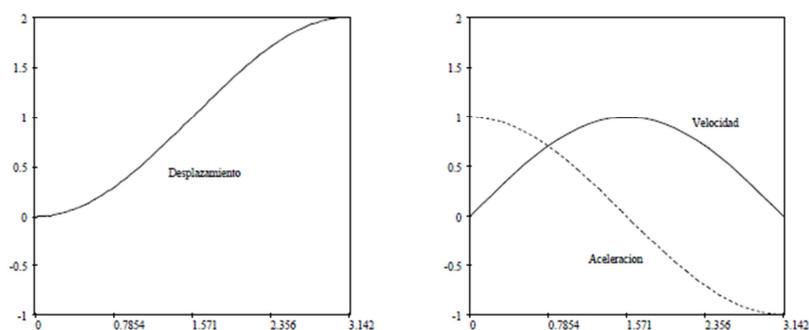


Figura 2.15 Etapa de ascenso en el movimiento armónico¹⁷

Para el caso del descenso, las ecuaciones que rigen este movimiento son las siguientes:

$$Y = \frac{L}{2} * (1 + \cos(\frac{\pi\theta}{\beta})) \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$Y' = -\frac{\pi L}{2\beta} * \text{sen}(\frac{\pi\theta}{\beta}) \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$Y'' = -\frac{\pi^2 L}{2\beta^2} * \text{cos}(\frac{\pi\theta}{\beta}) \quad \text{Ecuación 2.8}$$

En la figura 2.16 se puede observar el comportamiento de este movimiento para el caso del descenso.

¹⁷ (Miranda, 2003)

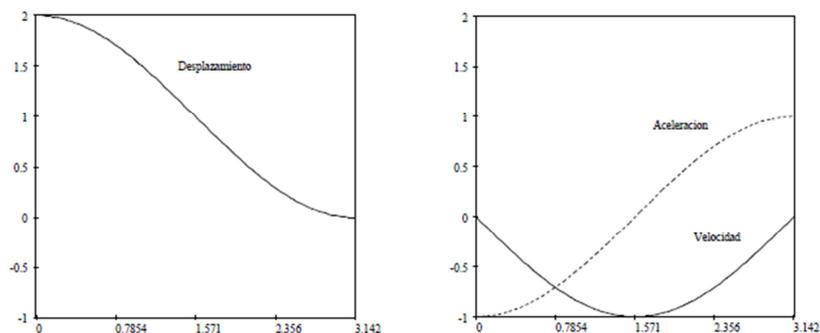


Figura 2.16 Etapa de descenso en el movimiento armónico¹⁸

2.2.5.3. MOVIMIENTO CICLOIDAL

El movimiento cicloidal se puede describir mediante las siguientes ecuaciones:

$$Y = L * \left(\frac{\theta}{\beta} - \frac{1}{2\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right) \right) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$Y' = \frac{L}{\beta} * (1 - \cos\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right)) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

$$Y'' = \frac{2\pi L}{\beta^2} * \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right) \quad \text{Ecuación 2.11}$$

En la figura 2.17 se puede observar el comportamiento de este movimiento para el caso del ascenso.

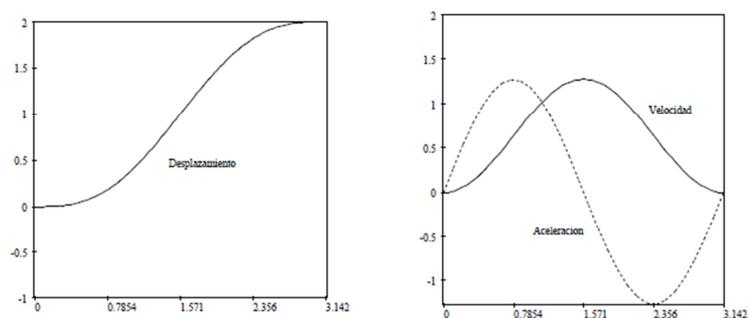


Figura 2.17 Etapa de ascenso en el movimiento cicloidal¹⁹

¹⁸ (Miranda, 2003)

Para el caso del descenso, las ecuaciones que rigen este movimiento son las siguientes:

$$Y = L * \left(1 - \frac{\theta}{\beta} + \frac{1}{2\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right)\right) \quad \text{Ecuación 2.12}$$

$$Y' = -\frac{L}{\beta} * \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right)\right) \quad \text{Ecuación 2.13}$$

$$Y'' = -\frac{2\pi L}{\beta^2} * \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi\theta}{\beta}\right) \quad \text{Ecuación 2.14}$$

En la figura 2.18 se puede observar el comportamiento de este movimiento para el caso del descenso.

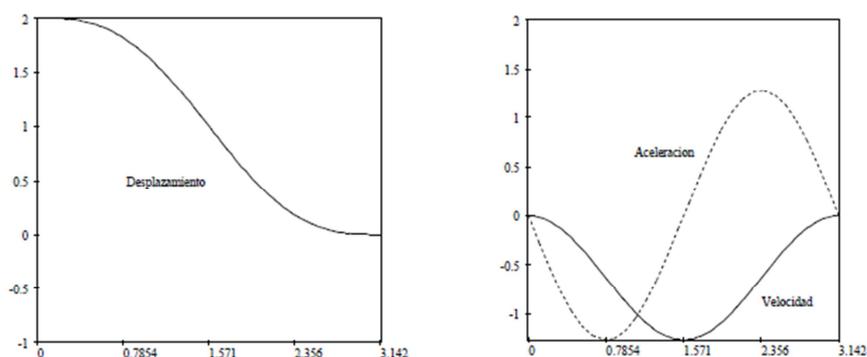


Figura 2.18 Etapa de descenso en el movimiento cicloidal²⁰

2.2.5.4. MOVIMIENTO POLINOMIAL

El movimiento polinomial se utiliza cuando los movimientos descritos anteriormente no describen del todo el movimiento del seguidor que se requiere. En este caso es posible diseñar una leva mediante el uso de ecuaciones polinomiales que se aproximen al comportamiento que se espera en el seguidor.

¹⁹ (Miranda, 2003)

²⁰ (Miranda, 2003)

Las ecuaciones del movimiento polinomial son de la forma:

$$Y = C_0 + C_1 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right) + C_2 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^2 + C_3 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^3 + \dots \quad \text{Ecuación 2.15}$$

En donde al igual que en todos los movimientos, Y representa el desplazamiento del seguidor, θ es el ángulo de giro de la leva, β es el recorrido total de la leva en una sección en específico, y se cumple la relación de que $\frac{\theta}{\beta}$ se encuentra entre 0 y 1. Para determinar los valores de las constantes se requieren condiciones de frontera, y finalmente obtener un sistema de ecuaciones de orden $n+1$, es decir por ejemplo para un movimiento polinomial de tercer grado como la ecuación descrita anteriormente, se requerirán 4 ecuaciones ya que se tienen 4 constantes a determinar.

La velocidad, aceleración y sobre aceleración se obtendrán de la misma forma que se realizó en movimientos anteriores, es decir mediante la primera, segunda y tercera derivada de la ecuación polinomial seleccionada.

2.2.6. PARÁMETROS DE DISEÑO DE CURVAS DE POSICIÓN

Como se pudo observar anteriormente, existe una gran variedad de levas, cuya selección dependerá exclusivamente de los requerimientos del diseñador. Sin embargo se deben tomar ciertas consideraciones al momento del diseño. Primeramente se debe recordar que una leva es un elemento mecánico que tiene un solo grado de libertad debido a que es impulsado por un movimiento rotatorio de entrada totalmente conocido, que generalmente tiene una velocidad constante.

En el eje de las ordenadas siempre se ubicará la salida del seguidor, es decir el desplazamiento que se requiere del mismo, y en el eje de las abscisas se ubicará el ángulo de giro de la leva, considerando el movimiento del seguidor en una sola vuelta de dicha leva. En el caso de un seguidor de movimiento lineal como el que se pretende simular en la presente investigación,

generalmente se utiliza una escala de 1:1 entre los ejes del diagrama de desplazamiento.

De igual forma como se pudo observar en la sección de diagramas de desplazamiento, estos diagramas constan de generalmente cuatro etapas, dos de detención, una de subida y otra de bajada. Es necesario determinar el intervalo de ángulo de giro de la leva en los que se requieren estas etapas. Por último es necesario determinar el tipo de movimiento que se requiere entre estas etapas, lo cual dependerá exclusivamente de la aplicación que tendrá la leva en funcionamiento y es el paso clave en el correcto dimensionamiento de la misma.

2.3. AUTOMATIZACIÓN MECATRÓNICA

2.3.1. GENERALIDADES

A lo largo de la historia, los seres humanos han buscado formas para realizar sus tareas de forma más sencilla y eficiente. A nivel industrial, el mejoramiento de los sistemas de producción, lo cual implica minimizar productos defectuosos, garantizar la seguridad del talento humano involucrado en dichos sistemas y maximizar la producción, ha sido el objetivo de cualquier empresario. En la actualidad es posible cumplir con dicho objetivo gracias a los beneficios que brinda la tecnología de vanguardia y a la evolución de los sistemas mecánicos ampliamente utilizados en todo tipo de aplicación industrial.

La automatización es un sistema donde se transfieren tareas realizadas habitualmente por seres humanos a sistemas conformados por elementos mecánicos, electrónicos, computarizados, entre otros, los cuales ayudan a reducir el esfuerzo físico y mental que debe realizar una persona para llevar a cabo dichas tareas.

Objetivos de la automatización

- Mejorar la productividad, reduciendo costes de producción y mejorando la calidad de la misma.
- Mejorar las condiciones de trabajo del talento humano, evitando trabajos que demanden gran esfuerzo físico y mental de personas, y por lo tanto garantizando su seguridad.
- Regular la producción de productos, minimizando pérdidas.

La ingeniería Mecatrónica fruto de la sinergia de la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica en Control, Programación, Desarrollo de software, se encuentra ampliamente relacionada con la automatización. Gran parte de los sistemas automatizados en la actualidad han sido el resultado de la implementación de controladores electrónicos y eléctricos sobre sistemas mecánicos previamente funcionales a nivel industrial. La automatización Mecatrónica por otro lado surge como la siguiente etapa de la automatización, en la cual se busca diseñar sistemas mecánicos automatizados electrónicamente totalmente flexibles, es decir sistemas mecatrónicos desde un principio.

2.3.2. SISTEMAS DE CONTROL

El control automático ha desempeñado un papel fundamental en el avance de la ingeniería y la ciencia. El control automático se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de manufactura. Por ejemplo, el control automático es esencial en el control numérico de las máquinas-herramienta de las industrias de manufactura, en el diseño de sistemas de pilotos automáticos en la industria aeroespacial, y en el diseño de automóviles y camiones en la industria automotriz. También es esencial en las operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad y flujo en las industrias de proceso.

Los avances teóricos y prácticos del control automático aportan los recursos necesarios para obtener desempeños óptimos en sistemas dinámicos, producción, razón por la cual en la actualidad es el pilar fundamental de procesos de automatización.

Definiciones

Las definiciones más importantes de sistemas de control se pueden apreciar en la tabla 2.4.

Tabla 2.4

Definiciones importantes de Sistemas de Control

Variable controlada	Es la cantidad o condición que se mide y se controla. Generalmente esta variable es la salida o resultado del sistema.
Variable Manipulada	Es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.
Controlar	Medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido a partir del valor deseado.
Planta	Una planta es cualquier objeto físico que se desea controlar, por ejemplo un horno de calefacción, los alerones de un avión, un reactor químico, etc.
Procesos	Cualquier operación que se desea controlar, los procesos pueden ser por ejemplo químicos, biológicos, entre otros.
Sistemas	Es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado.
Perturbaciones	Es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se llama interna, sino es externa y por lo tanto es una entrada al sistema.

Control realimentado

El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia y lo continúa haciendo con base en esta diferencia.

Un sistema de control es un conjunto de elementos que ejecutan acciones sobre una variable manipulada para obtener un valor deseado en la variable de salida de un sistema.

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

- Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones.
- Ser tan eficiente como sea posible.

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes:

- **Sensores:** Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.
- **Controlador:** Utilizando los valores determinados por los sensores y referencia impuesta, toma la acción que debe aplicarse a la variable manipulada para modificar la variable controlada.
- **Actuador:** Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables manipuladas.

En la figura 2.19 se muestra un esquema general de un sistema de control.

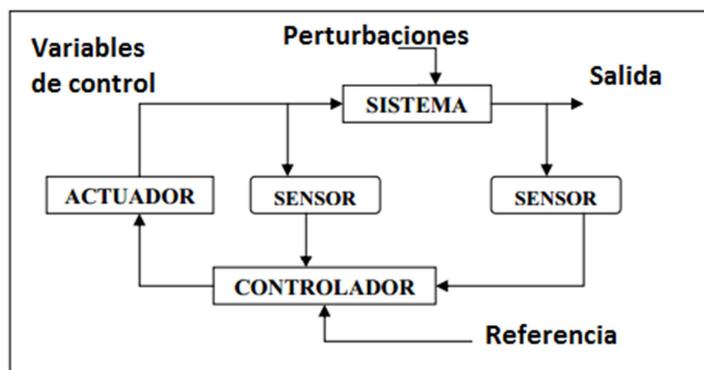


Figura 2.19 Esquema general de un sistema de control²¹

Se distinguen dos tipos de estrategias de control en función de la naturaleza de la información utilizada para ejecutar la acción de control del sistema, estas son control de sistema de lazo abierto y de lazo cerrado.

Lazo abierto

La acción de control se ejecuta conociendo la dinámica del sistema y estimando las perturbaciones. Esta estrategia de control puede compensar los retrasos inherentes del sistema anticipándose a las necesidades del usuario. Sin embargo, el lazo abierto generalmente es insuficiente, debido a los errores del modelo y a los errores en la estimación de las perturbaciones. Por ello, es común la asociación de lazo cerrado-lazo abierto, de modo que el lazo cerrado permite compensar los errores generados por el lazo abierto.

Lazo cerrado

La acción de control se ejecuta en función del error medido entre la variable controlada y su valor deseado. Las perturbaciones, aunque sean desconocidas son consideradas indirectamente mediante sus efectos sobre las variables de salida. Este tipo de estrategia de control puede aplicarse sea cual sea la variable controlada. La gran mayoría de los sistemas de control que se desarrollan en la actualidad son en lazo cerrado.

²¹ (Universidad Politécnica de Cataluña)

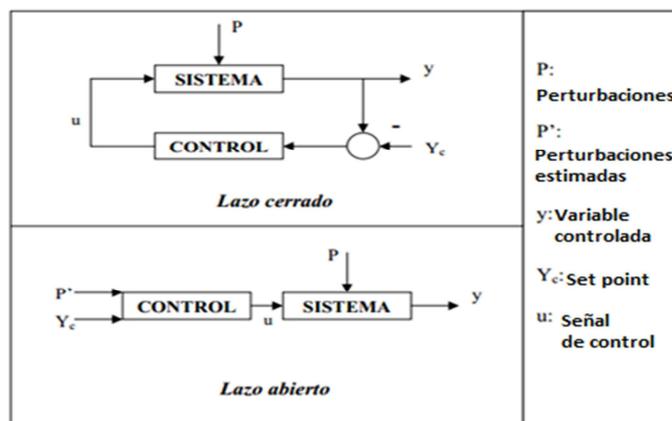


Figura 2.20 Esquema con dos estrategias de control²²

2.4. INSTRUMENTACIÓN MECATRÓNICA

Como se analizó anteriormente, un componente fundamental en los sistemas de control son los sensores, los cuales son catalogados como sistemas debido a que reciben una sola entrada y responden con una o varias salidas. En la actualidad existen sensores para medir cualquier tipo de variable física, por lo que la instrumentación Mecatrónica pretende marcar pautas para la correcta selección de los mismos para un proceso o sistema en particular.

La instrumentación se refiere a todos los elementos que permiten realizar mediciones, convertir unidades, transmitir información, o registrar las variables de un proceso. El objetivo de los instrumentos es el de liberar al operario de su función de actuación física en el proceso, y además ha permitido una labor de supervisión y vigilancia constante, incluso desde lugares remotos.

Un instrumento se caracteriza por recibir un estímulo a la entrada y responder al mismo con una o varias salidas.

²² (Universidad Politécnica de Cataluña)

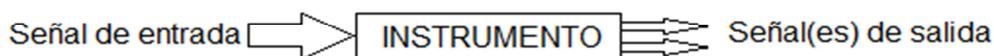


Figura 2.21 Diagrama de un Instrumento

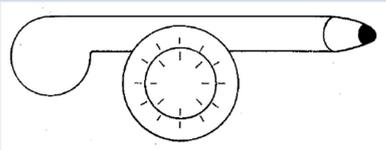
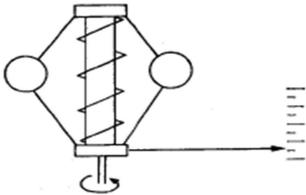
Gracias a los instrumentos ha sido posible elaborar productos complejos con una calidad y características que no se podrían lograr realizando un control manual.

2.4.1. MEDICIÓN DE VELOCIDAD ANGULAR

La medición de la velocidad angular se lo realiza por medio de los tacómetros, estos pueden ser mecánicos o eléctricos. En la tabla 2.5 se detallan algunos de los mismos.

Tabla 2.5

Sensores para medición de velocidad angular

Sensor	Ilustración	Descripción
Tacómetro Mecánico	 <p>Figura 2.22 Tacómetro mecánico²³</p>	<p>Está constituido por un eje terminado en una punta de caucho en donde se coloca el centro del eje de la pieza giratoria que se quiere medir. El eje hace girar a un tren de engranes que posee dos diales concéntricos calibrados. El dial exterior representa una vuelta del eje, mientras que el dial interior indica la fracción de vuelta del eje.</p>
Tacómetro Centrífugo	 <p>Figura 2.23 Tacómetro centrífugo²⁴</p>	<p>Este instrumento contiene dos pesos unidos a un eje rotatorio, el radio de giro aumenta debido a la fuerza centrífuga y a su vez comprime un resorte.</p>

²³ (Creus, 2000)

CONTINÚA →

Tacómetro de corriente alterna

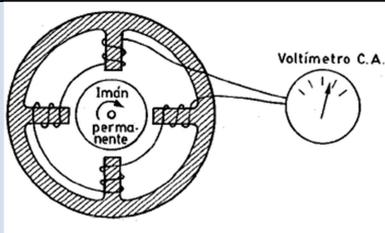


Figura 2.24 Tacómetro AC²⁵

Este tacómetro contiene un estator bobinado multipolar en donde el rotor de imán permanente induce una corriente alterna; un voltímetro de corriente alterna mide el voltaje creado, y se hace la relación a la velocidad angular en r.p.m.

Tacómetro de corriente continua

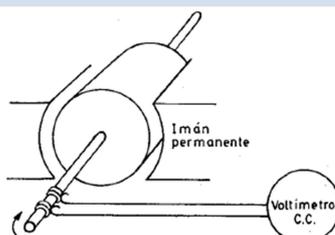


Figura 2.25 Tacómetro DC²⁶

Este tacómetro consiste en un estator de imán permanente y un rotor con entrehierro uniforme, el voltaje generado es proporcional a la velocidad de rotación del eje.

Tacómetro de Frecuencia o frecuencímetro

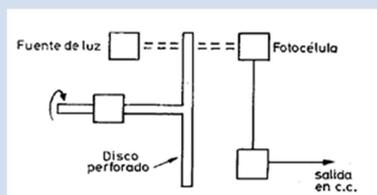


Figura 2.26 Tacómetro de frecuencia²⁷

Mide la frecuencia de la señal A.C. captada por transductores electromagnéticos, inductivos, capacitivos u ópticos que dan impulsos cuyo número es proporcional a la velocidad de giro. El tacómetro de frecuencia óptica consta de un disco opaco, con varias perforaciones en su periferia y que está acoplado al eje, consta de una fuente emisora de luz y una fotocélula receptora; por lo que se pueden medir el número de impulsos luminosos que pasan a través de las perforaciones en función del tiempo, y se puede obtener la velocidad angular.

²⁴ (Creus, 2000)

²⁵ (Creus, 2000)

²⁶ (Creus, 2000)

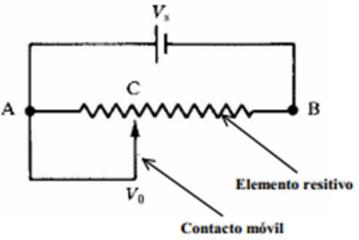
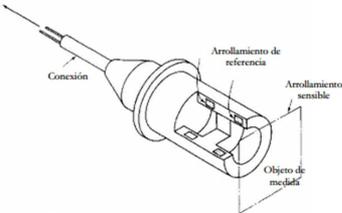
²⁷ (Creus, 2000)

2.4.2. MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO LINEAL

El desplazamiento lineal se puede medir de muchas maneras, en esta sección se presentarán los posibles sensores que se pueden utilizar para realizar medidas medias longitudinales.

Tabla 2.6

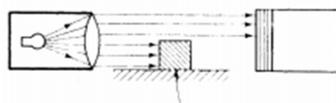
Tipos de sensor para medir distancia

Sensor	Ilustración	Descripción
Potenciómetro Resistivo	 <p>Figura 2.27 Potenciómetro resistivo²⁸</p>	Este instrumento consta de un elemento resistivo y de un contacto móvil, el objeto del cual se requiere medir la posición se conecta a este contacto, y a medida que se va alejando cambia la resistencia y por ende cambia el voltaje de salida, guardando una relación lineal.
Transductores de inductancia variable	 <p>Figura 2.28 Transductores de inductancia variable²⁹</p>	Se basan en la variación que experimenta la autoinducción de un arrollamiento, debido al cambio producido por el acople magnético entre el arrollamiento y un elemento móvil ferromagnético.
Transductores Capacitivos		Estos transductores consisten en un cambio que se produce en la capacitancia, al existir un cambio en el desplazamiento, similar a los transductores inductivos, basado igualmente en la ley de ohm.

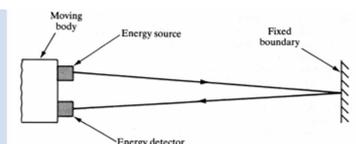
CONTINUÍA →

²⁸ (González, 2008)

²⁹ (González, 2008)

Transductores**Electro –
ópticos**Figura 2.29 Transductores Electro-
ópticos³⁰

Este transductor determina la altura del objeto en función de la cantidad de luz que oculta, emitiendo un haz de luz. La dimensión del objeto puede determinarse exactitud.

**Transductores
Ultrasónicos y
Fotoeléctricos**Figura 2.30 Transductor Ultrasónico³¹

Estos sensores miden el desplazamiento de un cuerpo respecto a un punto fijo, estos poseen una fuente de energía, un detector de energía y un módulo electrónico que mide el tiempo que tarda la energía en ir del emisor al receptor, esta forma de energía puede ser luminosa o ultrasonido, su funcionamiento es parecido a los ópticos.

2.5. ACTUADORES

Los actuadores dentro de un lazo de control, son los elementos finales del proceso, intervienen directa o indirectamente sobre la máquina.

La función de un actuador es proporcionar fuerza para mover o actuar sobre un dispositivo mecánico, esta fuerza puede provenir de la presión neumática, la presión hidráulica o de la fuerza motriz eléctrica.

Los actuadores pueden clasificarse dentro de dos grandes grupos, los lineales, como un pistón neumático o hidráulico y los rotatorios, como un motor eléctrico.

³⁰ (González, 2008)

³¹ (González, 2008)

2.5.1. TIPOS DE ACTUADORES

Los actuadores, pueden clasificarse en tres grupos:

Actuadores Neumáticos: Usan la fuerza neumática como fuente de movimiento.

Actuadores Hidráulicos: Utilizan la fuerza hidráulica como fuerza de movimiento.

Actuadores Eléctricos: Usan la fuerza motriz eléctrica, dentro de este grupo están los motores eléctricos y los solenoides.

2.5.2. ACTUADORES ELÉCTRICOS

2.5.2.1. SERVOMOTORES

Un servomotor (ver figura 2.31), es un motor que puede poner a su eje en una determinada posición por medio del envío de una señal eléctrica, dentro del rango de operación que se especifique en el motor. Estos motores se utilizan en aplicaciones especiales en las que se requiere mucha fuerza con una buena precisión en su funcionamiento.

Un Servomotor posee algunos circuitos de control y un potenciómetro conectado al eje central del servomotor. El potenciómetro permite a la circuitería de control, supervisar el ángulo actual del servo, si el circuito detecta que el ángulo no es correcto, el motor gira en la dirección adecuada hasta llegar al ángulo correcto.

Para el funcionamiento, el servomotor utiliza la modulación por ancho de pulso (PWM) para el control de los servos, el sistema consiste en generar una onda cuadrada con el objetivo de modificar la posición del servomotor según se desee.

Un servomotor consta principalmente de tres partes, un par motor, una caja reductora y un circuito de control, caracterizándose además por tener un consumo de energía reducido.



Figura 2.31 Servomotor Industrial³²

2.5.2.2. ACTUADORES DYNAMIXEL

Los actuadores DYNAMIXEL son servomotores de alto desempeño controlados mediante un protocolo de comunicación.

En la figura 2.32 se puede apreciar un esquema de los componentes que tienen estos servomotores.

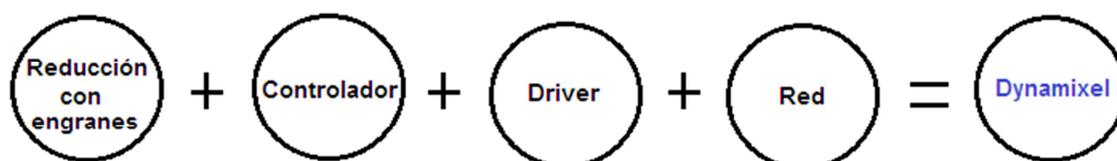


Figura 2.32 Esquema de componentes de un actuador DYNAMIXEL.³³

Como se puede observar estos servomotores constan de una caja de reducción de engranes los cuales ayudan a generar el torque requerido por el usuario, además consta de un controlador y un driver los cuales permiten la comunicación entre el usuario y el actuador, permitiendo controlar totalmente el comportamiento mecánico y electrónico del actuador mediante programación. Es totalmente factible integrarlos a una red, gracias a su protocolo de

³² (TechDesign, 2013)

³³ (ROBOTIS, 2010)

comunicación, lo que amplía totalmente el grupo de aplicaciones para los cuales pueden ser empleados.

Estos actuadores se caracterizan por tener una retroalimentación muy robusta la cual les permite leer la posición de su eje al igual que su velocidad, temperatura, suministro de voltaje, torque aplicado, set point, etc.

Cuando ciertos parámetros mecánicos o eléctricos tales como la temperatura interna, torque, voltaje suministrado, entre otros, se encuentran fuera de sus rangos normales, estos actuadores entregan una retroalimentación al usuario indicándole de una situación anormal. Para preservar el buen estado de los motores, estos suelen reducir totalmente el torque entregado cuando son sometidos a situaciones extremas, para las cuales no han sido dimensionados.

Estos actuadores son generalmente empleados para el ensamble de sistemas mecatrónicos como por ejemplo robots, pero mediante estructuras y elementos mecánicos correctamente dimensionados, se pueden utilizar en una infinidad de aplicaciones.

2.5.2.3. DYNAMIXEL MX-64T

Es un actuador que cuenta con todas las ventajas de un DYNAMIXEL descritas en la sección anterior. El MX-64T (ver figura 2.33) especificaciones técnicas que han contribuido para su selección como el motor para la aplicación que se detalla en el presente documento, las mismas que se detallan a continuación:

- Cuenta con un encoder que permite una resolución de 12 BITS lo cual se traduce en una resolución de 0.088° .
- Tiene un motor MAXON, marca que ha sido el líder mundial en motores de alta precisión de hasta 500W.
- La transmisión serial que permite este actuador para su control tiene un rango que va desde los 8000bps hasta 4.5Mbps.

- Su rango de giro puede seleccionarse de entre 0 a 360° o giro continuo.
- Con un peso de apenas 126g y dimensiones considerablemente pequeñas permite generar un torque que varía desde los 5.5Nm hasta los 7.3Nm, dependiendo del voltaje aplicado. El rango de variación de torque es de 0.1% del valor máximo.
- De igual forma dependiendo del voltaje suministrado, permite alcanzar hasta una velocidad de 78rpms. Permite variaciones de 0.114rpms las cuales se controlan mediante programación.
- Trabaja con un protocolo serial de comunicación Half Duplex asíncrono.
- Tiene retroalimentación de posición, temperatura, velocidad, torque, voltaje de entrada, etc. Además de un controlador PID para posición, velocidad y torque.



Figura 2.33 Actuador DYNAMIXEL MX-64T³⁴

2.6. CONTROLADORES

2.6.1. MICROCONTROLADORES

Un microcontrolador es un circuito integrado que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora como son la Unidad de Procesamiento Central (CPU), Memoria y las Unidades de entrada y salida (ver figura 2.34). Estos dispositivos están diseñados para disminuir los costos y el consumo de energía de un sistema.

³⁴ (ROBOTIS, 2010)

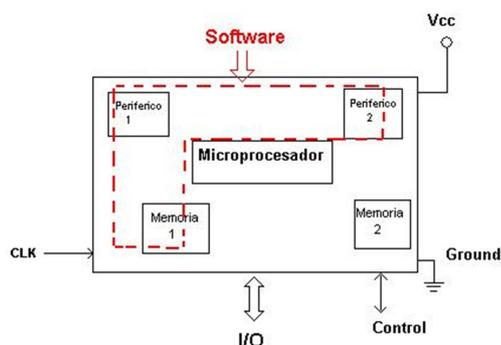


Figura 2.34 Esquema de un Microcontrolador³⁵

Los microcontroladores son capaces de ejecutar las instrucciones almacenadas en su memoria, por lo que son utilizados en los sistemas de control.

Dentro de las empresas más comunes que fabrican microcontroladores están Atmel-AVR, Intel, Microchip, Texas Instruments, entre otros.

2.6.2. MICRO CONTROLADOR ATMEGA2560

Es un micro controlador de 8 bits de la familia ATMEL, que se caracteriza por su gran número de pines y alto desempeño, con un voltaje de operación que va en un rango de 1.8 a 5V, y velocidades de procesamiento de 0 a 20MHz con un voltaje de operación de 4.5 a 5.5V.

Dispone de 256KB de memoria Flash, 4KB de memoria EEPROM y 8KB de memoria RAM. Su capacidad de memoria EEPROM lo hace apto para el control de procesos en los cuales es importante una rápida estabilización de los mismos tras haber sufrido un corte de energía de suministro.

Además dispone de un vector de interrupción de dos palabras, 54 pines programables de entrada o salida, incluyendo la posibilidad de uso de 16 canales de conversión análogo digital con una resolución de 10 bits, y 14

³⁵ (Hispavista, 2010)

canales de modulación por ancho de pulso, tres puertos de comunicación serial USART.

Su costo relativamente bajo lo vuelve una muy buena elección para su aplicación en sistemas mecatrónicos, además que es un microcontrolador utilizado por la plataforma ARDUINO, específicamente en el hardware ARDUINO MEGA 2560, con diversas aplicaciones a nivel universitario alrededor de todo el mundo en la actualidad, ver figura 2.35.

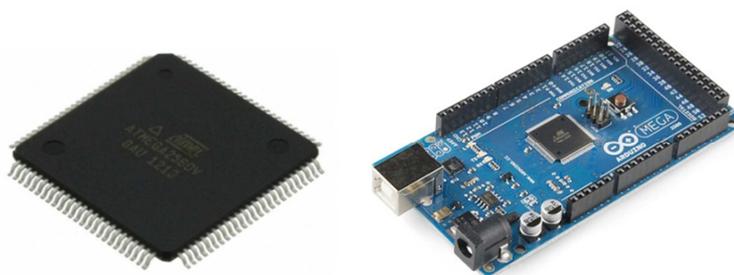


Figura 2.35 Microcontrolador ATMEGA 2560 y placa ARDUINO MEGA 2560³⁶

2.6.3. CONTROLADOR OPEN CM9.04

Es un controlador de hardware y software libre, que trabaja con un CORTEX M3 de 32 bits, incluye conectores de 3 pines dedicados exclusivamente al control de Servomotores DYNAMIXEL con comunicación TTL.

Este controlador se puede programar mediante el software ROBOTIS OpenCM, con un entorno de programación muy similar a ARDUINO IDE, lo que permite al usuario programar el movimiento de los actuadores DYNAMIXEL con lenguaje C/C++. Además ofrece otras ventajas como canales de conversión análogo digital, salidas digitales, entre otras.

³⁶ (ATMEL, 2012)

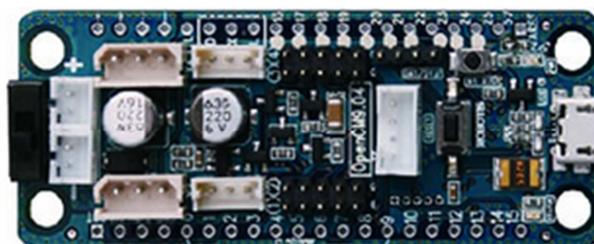


Figura 2.36 Controlador OpenCM 9.04³⁷

2.7. SEÑALES

Una señal eléctrica es una alteración generada por algún fenómeno electromagnético y que sirve para transmitir información. En el caso del control la señal es transmitida desde la adquisición de datos hacia el sistema de control, y desde el sistema de control hacia los elementos finales que son los actuadores.

2.7.1. TIPOS DE SEÑALES

Existen dos tipos de señales, estas son las señales analógicas y las señales digitales.

SEÑALES ANALÓGICAS

- Pueden tomar un número infinito de valores en el tiempo.
- Pueden ser periódicas, en las cuales existe un patrón de repetición de valores a lo largo del tiempo y es posible predecir su evolución, o aperiódicas, en las cuales no es posible predecir su evolución a lo largo del tiempo, ya que no tienen ningún comportamiento simétrico en el mismo.
- Dentro de las características más importantes de una señal analógica se tienen a su período y a su frecuencia.

³⁷ (ROBOTIS, 2010)

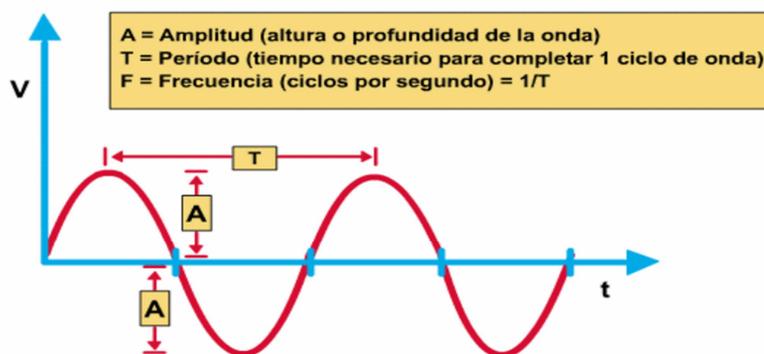


Figura 2.37 Señal Analógica ³⁸

SEÑALES DIGITALES

- Poseen un número discreto de estados. Cuando poseen dos estados se denominan señales digitales binarias, si tienen más de dos estados, se llaman señales digitales multinivel, como por ejemplo el código morse.
- Las señales digitales binarias son funciones que poseen dos niveles bien diferenciados que se alternan en el tiempo transmitiendo información; estos niveles son llamados como nivel alto (1 o Verdadero) y nivel bajo (0 o Falso).
- Dentro de las características más importantes de una señal analógica se tienen a su período, velocidad de modulación, velocidad de transmisión, atenuación, retardo.

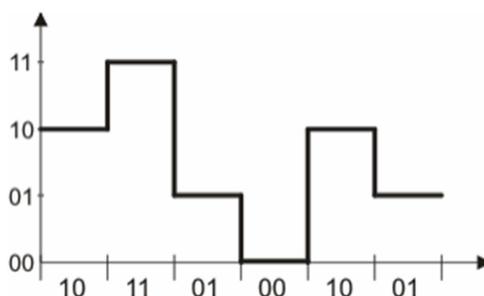


Figura 2.38 Señal Digital ³⁹

³⁸ (ITESCAM, 2008)

2.7.2. CONVERSIÓN ANÁLOGO/DIGITAL (ADC)

La conversión análogo/digital consiste en realizar periódicamente medidas de la amplitud de la señal de entrada y traducirlas a un lenguaje numérico, ver figura 2.39.

Una de las ventajas de la digitalización de la señal es la facilidad del procesamiento de la señal, es decir que cualquier operación es realizable fácilmente por medio de un software de adquisición, procesamiento de señales.

En el proceso de la conversión análogo/digital se tiene cuatro etapas:

Muestreo: Consiste en tomar muestras periódicas de la amplitud de onda; es muy importante conocer la frecuencia de muestreo (f_s) que es el número de muestras por segundo.

Cuantificación: Se basa en la conversión de una sucesión de muestras de amplitud continua en una sucesión de valores discretos.

Codificación: Consiste en traducir los valores de tensión eléctrica que han sido cuantificados al sistema binario.

Recodificación digital-digital: depende del tipo de aplicación como por ejemplo codificación de sonido, modulación de ancho de pulso, etc.

³⁹ (ITESCAM, 2008)

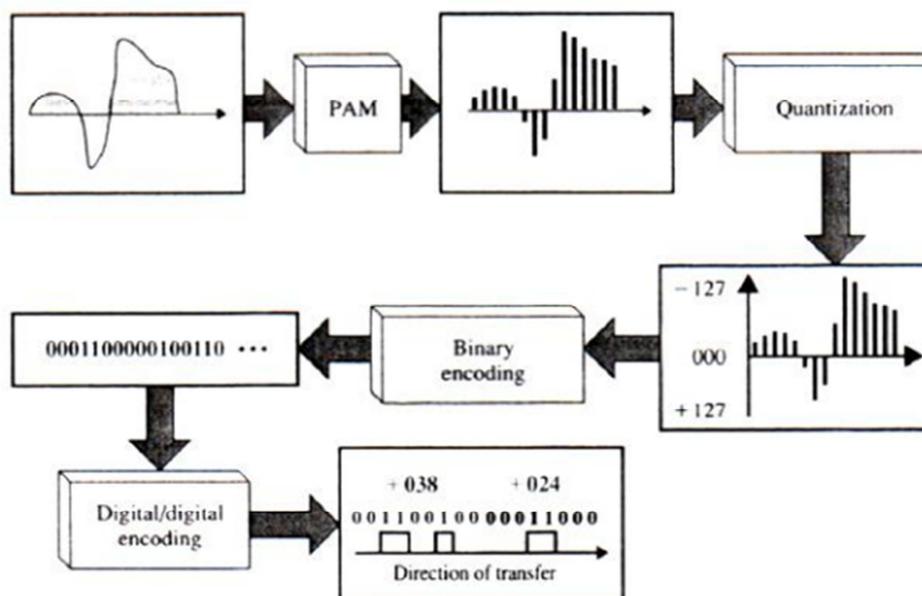


Figura 2.39 Conversión ADC⁴⁰

2.7.3. CONVERSIÓN DIGITAL/ANÁLOGO (DAC)

Esta conversión es el proceso inverso a la conversión descrita en el punto anterior, se parte de un código binario para llegar a una señal analógica de voltaje o corriente que permita tener un control sobre los actuadores.

La conversión se la realiza mediante la ecuación 2.16.

$$V_{out} = V_R(b_1 * 2^1 + b_2 * 2^2 + \dots + b_n * 2^n) \quad \text{Ecuación 2.16}$$

V_{out} , es el voltaje de salida

V_r , es el voltaje máximo de referencia

b_n , es el número binario empezando de izquierda a derecha.

⁴⁰ (Fries, 2005)

2.8. SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL

En este punto se describen los programas que permiten realizar una interfaz agradable, realizar un control numérico adecuado, y que además tenga compatibilidad con las placas Arduino, que se usará como hardware de adquisición de datos y control.

2.8.1. MATLAB™

Matlab es un lenguaje de alto nivel y posee un entorno interactivo para el cálculo numérico, visualización y programación; diseñado para trabajar con matrices y vectores. Con este software se pueden analizar los datos, elaborar algoritmos y crear aplicaciones.

Las herramientas y funciones que posee Matlab permiten llegar a una solución más rápida que con hojas de cálculo o con lenguajes de programación tradicionales.

Entre las herramientas más importantes, se tiene:

- Manipulación de matrices.
- Representación de datos y funciones en forma de gráficas bidimensionales y tridimensionales.
- Implementación de algoritmos.
- Creación de Interfaces de Usuario (GUI) a través del editor GUIDE.
- Simulink, que es una plataforma de simulación multi-dominio.
- Comunicación con otros programa y otros dispositivos hardware, como por ejemplo placas Arduino.

2.8.2. INTERFACES GRÁFICAS DE USUARIO (GUI)

Esta es una herramienta de programación del software MATLAB, la cual se utiliza principalmente en aplicaciones en donde se requiera un ingreso y/o visualización de datos de forma continua, ver figura 2.40.

Esta herramienta contiene típicamente menús, botones, barras de herramientas, y aplicaciones propias de MATLAB como por ejemplo procesamiento de señales, herramientas de sistemas de control entre otras.

Una aplicación GUI consta de dos archivos, uno .m, dentro del cual se encuentra el código de programación de los elementos de la interfaz, y otro .fig, en el cual se encuentran los elementos de la interfaz, tales como botones, sliders, entre otros.

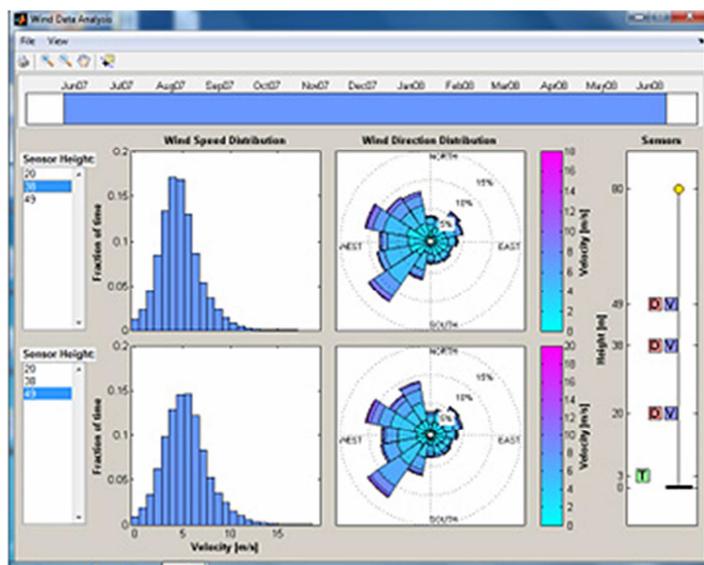


Figura 2.40 Aplicación creada mediante GUI⁴¹

⁴¹ (The Mathworks, Inc, 2014)

CAPÍTULO 3

3 DISEÑO MECATRÓNICO

3.1. DISEÑO DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS

3.1.1. DISEÑO DEL MECANISMO DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA SERVOMOTOR-CREMALLERA

Para realizar la transmisión de potencia, primeramente se parte de las condiciones a las cuales se quiere diseñar el movimiento de la cremallera, para el caso del presente trabajo son las siguientes:

- Longitud máxima de carrera física = 20 cm
- Velocidad máxima de la cremallera = 0.8 m/s
- Carga permitida = 5 kg

Se va a partir de la condición que cuando el piñón gire 360° , el seguidor con cremallera se desplazará la carrera máxima, es decir que el perímetro del piñón tiene que ser de 20 cm. Por lo tanto, el diámetro del piñón que se requiere se determina mediante la ecuación 3.1

$$d_p = \frac{L}{\pi} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

$$d_p = \frac{200 \text{ mm}}{\pi} = 63.66 \text{ mm}$$

Ahora, por facilidad de manufactura, se selecciona un diámetro del piñón de 70mm, y con ese dato se puede calcular la carrera exacta del seguidor, mediante la ecuación 3.2.

$$L_{\text{exacta}} = d_p * \pi \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$L_{\text{exacta}} = 70 \text{ mm} * \pi = 219.9 \text{ mm} = 22 \text{ cm}$$

Con los datos que se tiene, ahora se puede determinar el torque máximo multiplicando la fuerza tangencial por el radio, ver la ecuación 3.3.

$$T = F_t * \frac{d_p}{2} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$T = \left(5kg * 9.8 \frac{m}{s}\right) * \frac{0.07m}{2} = 1.72 Nm$$

Y con el dato de la velocidad lineal del seguidor, se puede determinar la velocidad angular que debe tener el piñón con la ecuación 3.4.

$$\omega = \frac{V}{\frac{d_p}{2}} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

$$\omega = \frac{0.8 m/s}{\frac{0.07m}{2}} = 22.86 \frac{rad}{s} = 218rpm$$

Con esos datos, se selecciona el servomotor MX-64T de la empresa Dynamixel (ver sección 3.2.1). El MX-64T, tiene un torque máximo de 7.3 Nm y una velocidad angular de 78rpm, por lo que se requiere de un tren de engranes para incrementar la velocidad y reducir el torque para llegar a lo requerido.

3.1.2. DISEÑO DEL TREN DE ENGRANES

El tren de engranes consta de una etapa, como se muestra en la figura 3.1.

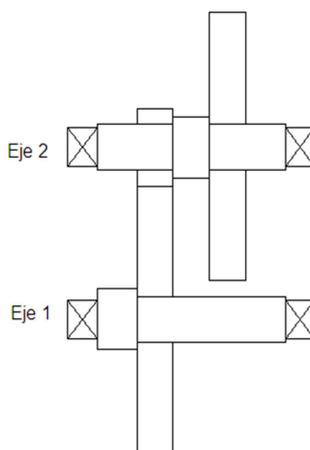


Figura 3.1 Tren de engranes

Se va a partir de que los engranes serán diseñados para módulo 1, y que el motor entrega un torque de $\tau_1 = 7.3 \text{ N} \cdot \text{m}$, y una velocidad angular de $n_1 = 78 \text{ rpm}$.

Etapa de reducción

El número de dientes de los engranes de la etapa de reducción, es:

$$N_1 = 70 \text{ dientes} \quad N_2 = 25 \text{ dientes}$$

Mediante la ecuación 3.5, se determinan los diámetros primitivos de los engranes.

$$d = m \cdot N \quad \text{Ecuación 3.5}^{42}$$

$$d_1 = m \cdot N_1 = 1 \cdot 70 = 70 \text{ mm}$$

$$d_2 = m \cdot N_2 = 1 \cdot 20 = 25 \text{ mm}$$

Se calcula el factor de reducción con la ecuación 3.6.

$$e = \frac{N_1}{N_2} = \frac{70}{25} = 2.8 \quad \text{Ecuación 3.6}^{43}$$

Con este factor, se puede verificar que el número de dientes seleccionado sea mayor al mínimo para que no exista interferencia, ver ecuación 3.7.

$$N_m = \frac{2k}{(1+2e)\sin^2 \phi} \left(e + \sqrt{e^2 + (1+2e)\sin^2 \phi} \right) \quad \text{Ecuación 3.7}^{44}$$

$$N_m = \frac{2(1)}{(1+2 \cdot 2.8)\sin^2 20} \left(2.8 + \sqrt{2.8^2 + (1+2 \cdot 2.8)\sin^2 20} \right) = 14.9 \text{ dientes}$$

Ahora, con la ecuación 3.8 se determinan los valores de velocidad angular y torque en el eje 2.

$$n_2 = \frac{N_1}{N_2} n_1 = \frac{70}{25} 78 = 218 \text{ rpm}$$

$$\tau_2 = \frac{N_2}{N_1} \tau_1 = \frac{25}{70} 7.3 = 2.61 \text{ N} \cdot \text{m} \quad \text{Ecuación 3.8}^{45}$$

⁴² Tomado del libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley (Ecuación 13-2)

⁴³ Tomado del libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley (Ecuación 13-30)

⁴⁴ Tomado del libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley (Ecuación 13-11)

Etapa piñón cremallera

El número de dientes y el diámetro del engrane es:

$$N_3 = 70 \text{ dientes} \quad d_3 = 70 \text{ mm}$$

La velocidad máxima de la cremallera, se determina:

$$V_2 = n_2 \cdot \frac{d_3}{2} = 218 * \frac{2\pi}{60} * \frac{0.07}{2} = 0.8 \frac{m}{s} \quad \text{Ecuación 3.9}^{46}$$

La carga máxima que soporta la cremallera es:

$$Wt_{max} = \frac{\tau_2}{\frac{d_3}{2}} = \frac{2.61}{\frac{0.07}{2}} = 7.59 \text{ kg} \quad \text{Ecuación 3.10}^{47}$$

3.1.3. DISEÑO DE LOS ENGRANES

3.1.3.1. SISTEMA DE DIENTES

Tabla 3.1

Características de los dientes de los engranes⁴⁸

Parámetro	Ecuación	Valor
Ángulo de presión	ϕ	20°
Adéndum (a)	$1 \cdot m$	1 mm
Dedéndum (b)	$1.25 \cdot m$	1.25 mm
Profundidad de trabajo	$2 \cdot m$	2 mm
Profundidad total	$2.25 \cdot m$	2.25 mm
Espesor circular del diente	$1.571 \cdot m$	1.571 mm
Radio de filete	$0.3 \cdot m$	0.3 mm
Holgura básica mínima	$0.25 \cdot m$	0.25 mm
Ancho mínimo de borde superior	$0.25 \cdot m$	0.25 mm
Holgura	$0.35 \cdot m$	0.35 mm

⁴⁵ Tomado del libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley (Ecuación 13-29)

⁴⁶ Tomado del libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley (Ecuación 13-34)

⁴⁷ Tomado del libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley (Ecuación b de la sección 13-14)

⁴⁸ Tomado del libro de Diseño de Máquinas (Norton, 2011) (Tabla 8-1)

3.1.3.2. FUERZAS EN LOS ENGRANES

$$Wt_1 = \frac{\tau_1}{\frac{d_1}{2}}$$

$$Wr_1 = Wt_1 * \tan \emptyset$$

$$W_1 = \frac{Wt_1}{\cos \emptyset} \quad \text{Ecuación 3.11}^{49}$$

Las fuerzas se determinan mediante las ecuaciones 3.11.

Etapa de reducción

$$Wt_1 = \frac{\tau_1}{\frac{d_1}{2}} = \frac{7.3}{\frac{0.07}{2}} = 208.57 \text{ N}$$

$$Wr_1 = Wt_1 * \tan \emptyset = 208.57 * \tan 20 = 75.91 \text{ N}$$

$$W_1 = \frac{Wt_1}{\cos \emptyset} = \frac{208.57}{\cos 20} = 221.96 \text{ N}$$

Transmisión piñón-cremallera

$$Wt_3 = \frac{\tau_2}{\frac{d_3}{2}} = \frac{2.09}{\frac{0.07}{2}} = 74.5 \text{ N}$$

$$Wr_3 = Wt_3 * \tan \emptyset = 74.5 * \tan 20 = 27.1 \text{ N}$$

$$W_3 = \frac{Wt_3}{\cos \emptyset} = \frac{74.5}{\cos 20} = 79.3 \text{ N}$$

3.1.3.3. DETERMINACIÓN DEL ANCHO DE CARA

El ancho de cara se lo calcula en base a obtener una vida infinita a flexión, para esto se utiliza la teoría del límite de resistencia a la fatiga de Marin⁵⁰.

La fabricación de los engranes se los realiza en material AISI 1045, por lo tanto la resistencia última a la tracción es de $S_{ut} = 637 \text{ MPa}$ (VER ANEXO 1).

⁴⁹ Tomado del libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley (Tomado de la sección 13-14)

⁵⁰ Las ecuaciones que se utilizan en este literal, fueron tomadas del ejemplo 14-2 del libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley (Budinas & Nisbett, 2011)

$$S_e' = 0.5 * S_{ut} = 0.5 * 637 = 318.5 \text{ MPa} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Factor de superficie (k_a)

Los factores de superficie son $a=4.51$ y $b=-0.265$, para elementos maquinados (VER ANEXO 3).

$$k_a = a * S_{ut}^b = 4.51 * 637^{-0.265} = 0.815 \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Factor de tamaño (k_b)

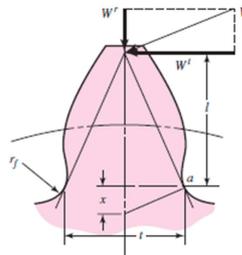


Figura 3.2 Diente de un engrane⁵¹

De la tabla 3.1, se tiene que la profundidad del diente es $l=2.25\text{mm}$.

Del Anexo 4, se tiene que $Y=0.337$

$$x = \frac{3 \cdot Y \cdot m}{2} = \frac{3 \cdot 0.322 \cdot 1}{2} = 0.506 \text{ mm} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

$$t = \sqrt{4 \cdot l \cdot x} = \sqrt{4 \cdot 2.25 \cdot 0.483} = 2.133 \text{ mm} \quad \text{Ecuación 3.15}$$

El diámetro equivalente de la viga rotatoria, se la obtiene con la ecuación 3.16.

$$d_e = 0.808(h \cdot b)^{\frac{1}{2}} = 0.808(F \cdot t)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

$$k_b = 1.51d_e^{-0.157} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

Factor de carga (k_c)

Cuando la carga es en flexión, se toma $k_c = 1$.

⁵¹ (Budinas & Nisbett, 2011)

Factor de temperatura (k_d)

Se considera que el trabajo es a una temperatura normal de 20°C, con esta consideración, se toma el factor $k_d = 1$ (VER ANEXO 5)

Factor de efectos diversos (k_f)

Dado que el diente de engrane tiene flexión en un solo sentido utilizando la teoría de Gerber, como menciona Shigley en el ejemplo 14-2⁵², se obtiene un factor $k_f = 1.66$.

Ecuación de Marin

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e' \quad \text{Ecuación 3.18}$$

Concentración de esfuerzos

De la tabla 3.1, se tiene que el radio del filete es $r_f = 0.3 \text{ mm}$

$$\frac{r_f}{t} = \frac{0.3}{2.133} = 0.141$$

Como D/d es infinito, se aproxima al mayor valor que es $D/d=3$.

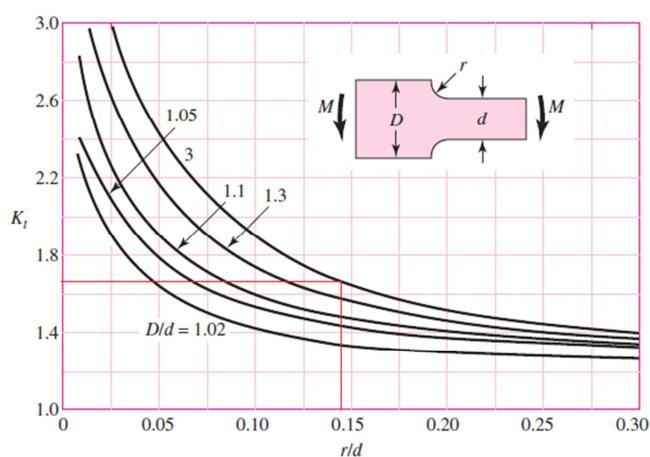


Figura 3.3 Factor de concentración K_t ⁵³

⁵² (Budinas & Nisbett, 2011)

⁵³ (Budinas & Nisbett, 2011)

De la figura 3.3, se tiene que $K_t = 1.68$

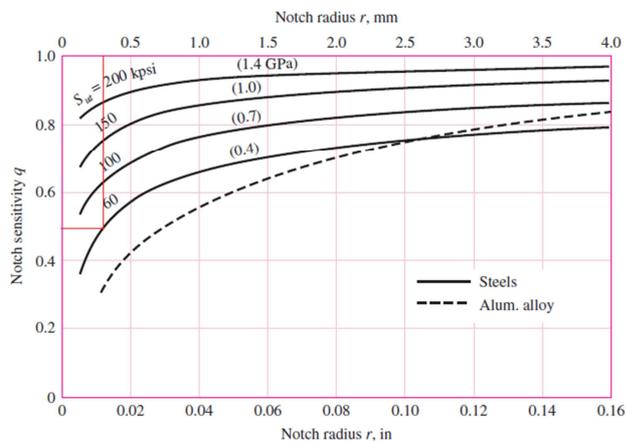


Figura 3.4 Sensibilidad de la muesca⁵⁴

De la figura 3.4, se tiene que $q = 0.5$

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0.5(1.68 - 1) = 1.34 \quad \text{Ecuación 3.19}$$

Utilizando un factor de diseño factor de diseño $n_d=3$.

$$\sigma_0 = \frac{S_e}{K_f \cdot n_d} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Factor de velocidad

$$V_1 = n_1 \cdot \frac{d_1}{2} = 78 * \frac{2\pi}{60} * \frac{0.07}{2} = 0.286 \frac{m}{s} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

$$K_v = \frac{6.1+V_1}{6.1} = \frac{6.1+0.286}{6.1} = 1.047 \quad \text{Ecuación 3.22}$$

$$F = \frac{K_v \cdot W t_1}{\sigma_0 \cdot m \cdot Y} \quad \text{Ecuación 3.23}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior, se obtiene:

$$\mathbf{F = 7.3 \text{ mm}}$$

Por seguridad se escoge un ancho de cara de 10 mm, para que además de soportar la flexión, pueda soportar el desgaste de los dientes.

⁵⁴ (Budinas & Nisbett, 2011)

3.1.3.4. FACTOR DE SEGURIDAD EN LA ETAPA PIÑÓN-CREMALLERA

Para determinar el factor de seguridad entre el piñón y la cremallera se utiliza la teoría de la Durabilidad de la superficie.⁵⁵

Para material Acero, se tienen los siguientes factores: $E = 207 \text{ GPa}$, $\nu = 0.292$ (VER ANEXO 6)

$$C_p = \left[\frac{1}{\pi \left(\frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu^2}{E} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Reemplazando los valores, se tiene $C_p = 1.898 * 10^5$

Calculando el radio base del engrane 3, del radio base

$$r_3 = \frac{d_3 \sin \phi}{2} = \frac{0.07 \sin 20}{2} = 0.012 \quad \text{Ecuación 3.25}$$

Factor de velocidad

Se utiliza la ecuación 3.22.

$$K_v = \frac{6.1 + V_2}{6.1} = \frac{6.1 + 1}{6.1} = 1.164$$

Ahora, calculando el esfuerzo, se tiene:

$$\sigma_c = -C_p \left[\frac{K_v \cdot W t_3}{F \cdot \cos \phi} \left(\frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_c} \right) \right] \quad \text{Ecuación 3.26}$$

Reemplazando los datos, se tiene $\sigma_c = -1.67 * 10^8 \text{ Pa}$

$$S_C = 0.32 \text{ HB kpsi} = 0.32 * 220 = 41.92 \text{ kpsi} = 2.891 * 10^8 \text{ Pa} \quad \text{Ecuación 3.27}$$

Ahora, se verifica el factor de seguridad con la ecuación 3.28

$$n_c = \left(\frac{S_C}{\sigma_c} \right)^2 \quad \text{Ecuación 3.28}$$

$$n_c = 7$$

⁵⁵ Las ecuaciones que se utilizan en este literal, fueron tomadas del ejemplo 14-3 del libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley (Budinas & Nisbett, 2011)

3.1.3.5. FACTOR DE SEGURIDAD EN LA ETAPA DE REDUCCIÓN

Para determinar los factores de seguridad de los engranes 1 y 2 pertenecientes a la etapa de reducción, se utilizará la teoría de esfuerzos AGMA⁵⁶.

Factor de espesor de aro

Se considera que se tiene un espesor de aro normal, y con ello $K_B = 1$

Factor de sobrecarga

Dado que estará sometido a carga uniforme, $K_o = 1$

Factor de temperatura

Como se trabaja a temperaturas menores a los 120°C, se tiene que $K_T = 1$

Factor de condición superficial

Dado que no hay ninguna condición especial en la superficie, $Z_R = 1$

Factor dinámico

Para este punto se va a considerar una calidad media, $Q_v = 6$

$$B = 0.25(12 - Q_v)^{\frac{2}{3}} = 0.25(12 - 6)^{\frac{2}{3}} = 0.825$$

$$A = 50 + 56(1 - B) = 50 + 56(1 - 0.825) = 59.77 \quad \text{Ecuación 3.29}$$

$$K_v = \left(\frac{A + \sqrt{200V}}{A} \right)^B = \left(\frac{59.77 + \sqrt{200 \cdot 0.286}}{59.77} \right)^B = 1.103 \quad \text{Ecuación 3.30}$$

Factor de confiabilidad

Se considera que tiene una confiabilidad del 95%

$$Y_z = 0.658 - 0.0759 \ln(1 - R) = 0.658 - 0.0759 \ln(1 - 0.95) = 0.885 \quad \text{Ecuación 3.31}$$

Factores de los ciclos de esfuerzos

⁵⁶ Las ecuaciones que se utilizan en este literal, fueron tomadas de la sección 14-3 del libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley (Budinas & Nisbett, 2011)

Se considera que el engrane 1 tiene una vida para 10^8 ciclos, y como el tren de engranes aumenta la velocidad, entonces en engrane 2 debe dimensionarse para $2.8 \cdot 10^8$ ciclos.

$$Y_N = 1.3558 N^{-0.0718} \quad \text{Ecuación 3.32}$$

$$Y_{N1} = 1.3558 (10^8)^{-0.0718} = 0.977$$

$$Y_{N2} = 1.3558 (2.8 \cdot 10^8)^{-0.0718} = 0.959$$

$$Z_N = 1.4488 N^{-0.023} \quad \text{Ecuación 3.33}$$

$$Z_{N1} = 1.4488 (10^8)^{-0.023} = 0.948$$

$$Z_{N2} = 1.4488 (2.8 \cdot 10^8)^{-0.023} = 0.926$$

Factor de tamaño

De lo obtenido en la parte del cálculo del ancho de cara, se tiene que $k_b = 1.105$.

$$K_S = \frac{1}{k_b} = 0.905 \quad \text{Ecuación 3.34}$$

Factor de distribución de carga

Dado que se trata de dientes sin corona, se tiene el factor $C_{mc} = 1$, $C_{pm} = 1$ y $C_e = 1$.

$$C_{ma} = A + BF + CF^2 \quad \text{Ecuación 3.35}$$

Utilizando los factores comerciales (VER ANEXO 7), se tiene que $C_{ma} = 0.133$.

$$C_{pf} = \frac{F}{10d} - 0.025 = \frac{10}{10 \cdot 20} - 0.025 = 0.015 \quad \text{Ecuación 3.36}$$

$$K_H = 1 + C_{mc}(C_{pf} C_{pm} + C_{ma} C_e) = 1.148 \quad \text{Ecuación 3.37}$$

Factor geométrico

La relación de aumento es de $m_G = 2.8$, y dado que se trata de engranes rectos, $m_N = 1$

$$Z_I = \frac{\cos \phi \sin \phi}{2m_N} \frac{m_G}{m_G + 1} \quad \text{Ecuación 3.38}$$

$$Z_I = \frac{\cos 20 \sin 20}{2} \frac{2.8}{2.8 + 1} = 0.118$$

Factor de relación de la dureza:

Dado que los dos engranes tienen la misma dureza, se tiene que $C_H = 1$

Resistencia a la flexión AGMA

Dado que se trata del Acero 1045, se tiene una dureza HB=200 (VER ANEXO 1)

$$S_t = 0.533HB + 88.3 \text{ MPa} \quad \text{Ecuación 3.39}$$

$$S_t = 0.533 * 200 + 88.3 = 194.9 \text{ MPa}$$

Resistencia al contacto AGMA

$$S_C = 2.22HB + 200 \text{ MPa} \quad \text{Ecuación 3.40}$$

$$S_C = 2.22 * 200 + 200 = 644 \text{ MPa}$$

FACTOR DE SEGURIDAD A FLEXIÓN

ENGRANE 1

Factor geométrico: el engrane tiene 70 dientes y transmite potencia a uno de 25

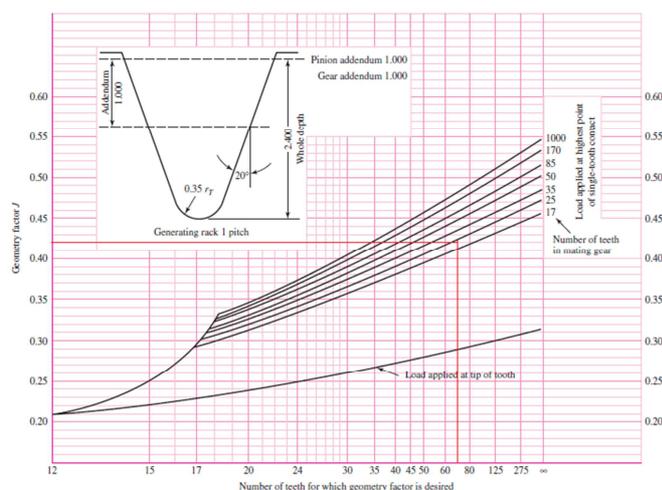


Figura 3.5 Factor geométrico de 70 a 25 dientes⁵⁷

⁵⁷ (Budinas & Nisbett, 2011)

De la figura 3.5, se puede apreciar que $Y_{J1} = 0.42$

$$\sigma_1 = W_t K_o K_v K_S \frac{1}{F m} \frac{K_H K_B}{Y_{J1}} \quad \text{Ecuación 3.41}$$

Reemplazando con los valores en cada factor, se tiene que $\sigma_1 = 56.93 \text{ MPa}$

$$S_{F1} = \frac{S_t Y_{N1} / (K_T K_R)}{\sigma_1} \quad \text{Ecuación 3.42}$$

Reemplazando los valores, se tiene:

$$S_{F1} = 3.78$$

ENGRANE 2

Factor geométrico: el engrane tiene 25 dientes y transmite potencia a uno de 70

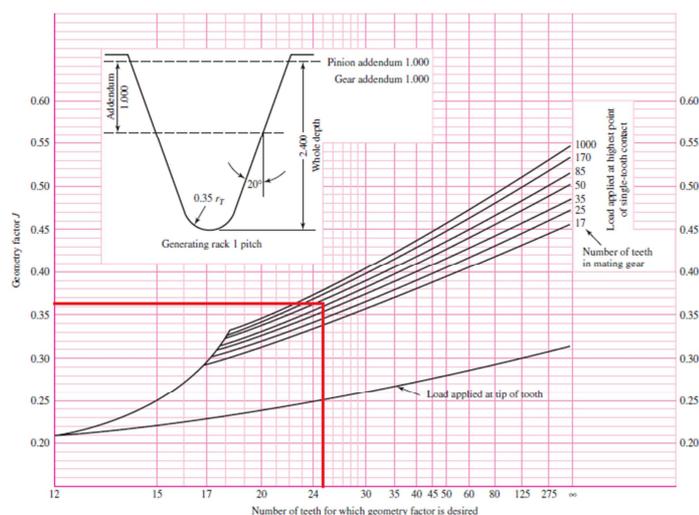


Figura 3.6 Factor geométrico de 25 a 70 dientes⁵⁸

De la figura 3.6, se puede apreciar que $Y_{J2} = 0.36$

Reemplazando con los valores analizados en cada factor de la ecuación 3.41, se tiene que $\sigma_2 = 66.42 \text{ MPa}$

$$S_{F2} = \frac{S_t Y_{N2} / (K_T K_R)}{\sigma_2} \quad \text{Ecuación 3.43}$$

⁵⁸ (Budinas & Nisbett, 2011)

Reemplazando los valores en la ecuación 3.43, se tiene:

$$S_{F2} = 3.17$$

FACTOR DE SEGURIDAD A DESGASTE POR CONTACTO

El coeficiente elástico, para materiales de acero en contacto es $Z_E = 191 \sqrt{MPa}$ (VER ANEXO 8).

$$\sigma_c = Z_E \sqrt{W_t K_o K_v K_s \frac{K_H Z_R}{d_2^F Z_I}} \quad \text{Ecuación 3.44}$$

Reemplazando con los valores analizados, se tiene que $\sigma_c = 537.17 MPa$.

ENGRANE 1

Para calcular el factor de seguridad, se utiliza la ecuación 3.45.

$$S_{H1} = \frac{S_c Z_{N1} C_H / (K_T K_R)}{\sigma_c} \quad \text{Ecuación 3.45}$$

Reemplazando los valores, se tiene:

$$S_{H1} = 1.3$$

ENGRANE 2

Para calcular el factor de seguridad, se utiliza la ecuación 3.45, pero en lugar de Z_{N1} , se utiliza Z_{N2} (factores de los ciclos de esfuerzos), reemplazando, se tiene:

$$S_{H2} = 1.25$$

OBSERVACIÓN: Las dimensiones de los engranes se ven en el Anexo 19.

3.1.4. DISEÑO DE LOS EJES

El material que se escoge para los ejes es el SAE 1018 de transmisión de Iván Bohman (VER ANEXO 2), que posee los siguientes datos, $S_{ut} = 51 \frac{kg}{mm^2} = 500 MPa$; y $S_y = 31 \frac{kg}{mm^2} = 304 MPa$

Para el diseño de los ejes, se va a considerar el diseño para esfuerzos⁵⁹.

EJE 1 (Ver figura 3.7)

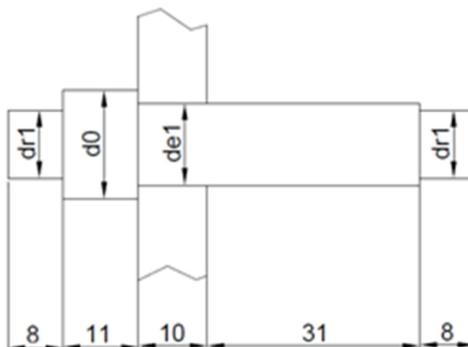
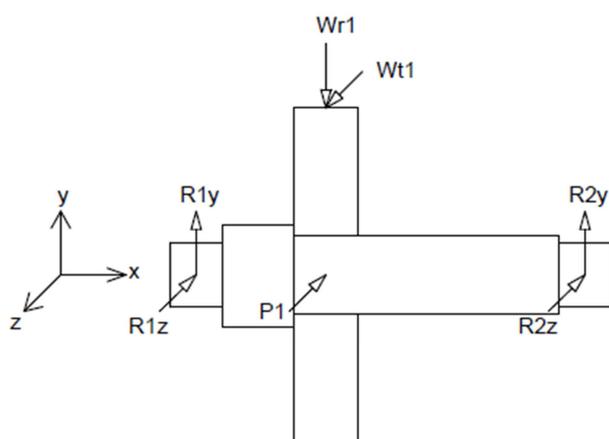


Figura 3.7 Esquema del eje 1

Determinación de las reacciones



$$P_1 = 3.18 \text{ N}$$

De la sumatoria de fuerzas y momentos se obtiene:

$$R_{1z} = 136.93 \text{ N}$$

$$R_{1y} = 50.61 \text{ N}$$

$$R_{2z} = 68.47 \text{ N}$$

$$R_{2y} = 25.3 \text{ N}$$

Figura 3.8 Diagrama de cuerpo libre del eje 1

⁵⁹ Las ecuaciones que se utilizan en este literal, fueron tomadas de la sección 7-4 del libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley (Budinas & Nisbett, 2011)

Diagramas de fuerza cortante y momento flector

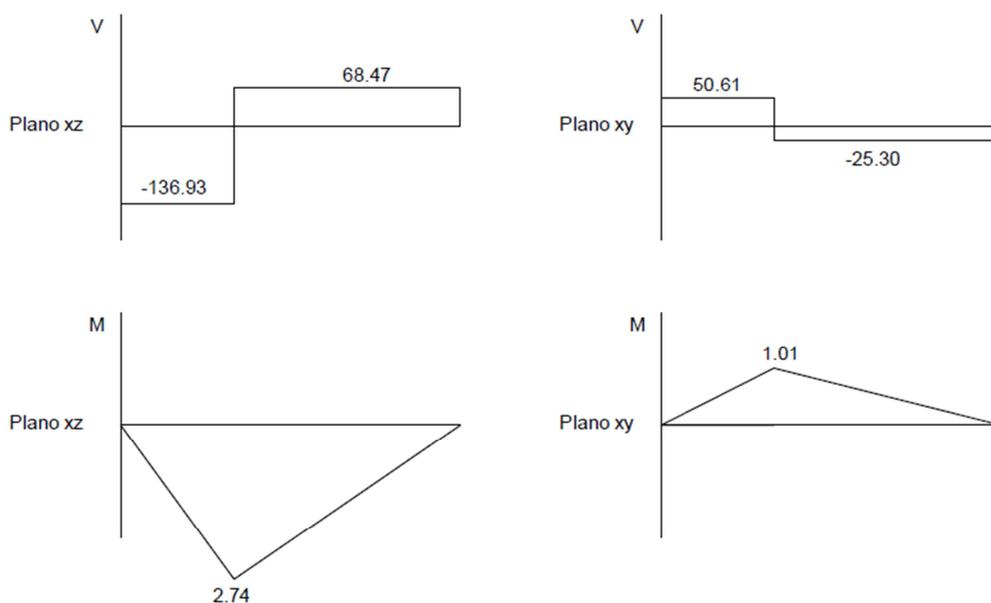


Figura 3.9 Diagramas de fuerza cortante y momento flector del eje 1

CÁLCULO DE LOS DIÁMETROS

Utilizando la ecuación 3.12, se tiene que:

$$S_e' = 0.5 * S_{ut} = 0.5 * 470 = 250 \text{ MPa}$$

Factor de superficie (k_a):

Los factores de superficie son $a=4.51$ y $b=-0.265$, para elementos maquinados (VER ANEXO 3), y usando la ecuación 3.13, se tiene que:

$$k_a = 4.51 * 470^{-0.265} = 0.883$$

Factor de tamaño (k_b)

Para la primera iteración, se asume un valor de $k_b = 0.9$, según Shigley⁶⁰.

⁶⁰ (Budinas & Nisbett, 2011)

Factor de carga (k_c)

Cuando la carga es en flexión, se toma $k_c = 1$.

Factor de temperatura (k_d)

Se considera que el trabajo es a una temperatura normal de 20°C, con esta consideración, se toma el factor $k_d = 1$ (ver anexo 5)

Factor de confiabilidad (k_e)

Se considera la confiabilidad es de 99.9%, por lo tanto se toma el factor $k_e = 0.753$ (ver anexo 9)

Ecuación de Marin

Utilizando la ecuación 3.18 se calcula el esfuerzo de Marin.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e = 140.66 \text{ MPa}$$

Concentración de esfuerzos

Para filete de hombro bien redondeado, en la primera iteración, se tienen los factores $K_t = 1.7$ y $K_{ts} = 1.5$ (Ver anexo 10)

Para ser conservativos en la primera iteración, se considera que $K_f = K_t$ y $K_{fs} = K_{ts}$

Factor de diseño: $n_d = 3$

Primeramente se va a calcular el diámetro que se requiere en donde va el engrane 1, para ello se considera el punto medio de donde está asentado el engrane, donde existe el mayor momento flector.

Del diagrama de momento flector $M_a = \sqrt{2.74^2 + 1.01^2} = 2.92 \text{ Nm}$, y el dato de entrada de torque que se tiene $T_m = \tau_1 = 7.3 \text{ Nm}$

$$d_{e1} = \left\{ \frac{16n_d}{\pi} \left(\frac{2(K_f M_a)}{S_e} + \frac{[3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2}}{S_{ut}} \right) \right\} \quad \text{Ecuación 3.46}$$

Reemplazando los valores, se tiene $d_{e1} = 11.68 \text{ mm}$

Entonces se escoge el valor exacto $\mathbf{d_{e1} = 12 \text{ mm}}$.

Como menciona Shigley⁶¹, una relación típica D/d para soporte de hombro es D/d=1.2, con esa relación se puede determinar los diámetros d_{r1} y d_0 .

$$\frac{d_0}{d_{e1}} = 1.2$$

$$d_0 = 1.2d_{e1} = 1.2 * 12 = 14.4 \text{ mm}$$

Se escoge un valor estándar de $\mathbf{d_0 = 16 \text{ mm}}$

$$\frac{d_{e1}}{d_{r1}} = 1.2$$

$$d_{r1} = \frac{d_{e1}}{1.2} = \frac{12}{1.2} = 10 \text{ mm}$$

Se escoge un valor estándar de $\mathbf{d_{r1} = 10 \text{ mm}}$

VERIFICACIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD

En la sección del engrane 1:

$$\frac{D}{d} = \frac{d_0}{d_{e1}} = \frac{16}{12} = 1.33$$

Se tiene un radio de filete $r = \frac{d_{e1}}{10} = 1.2 \text{ mm}$, y con ello $r/d = 0.1$.

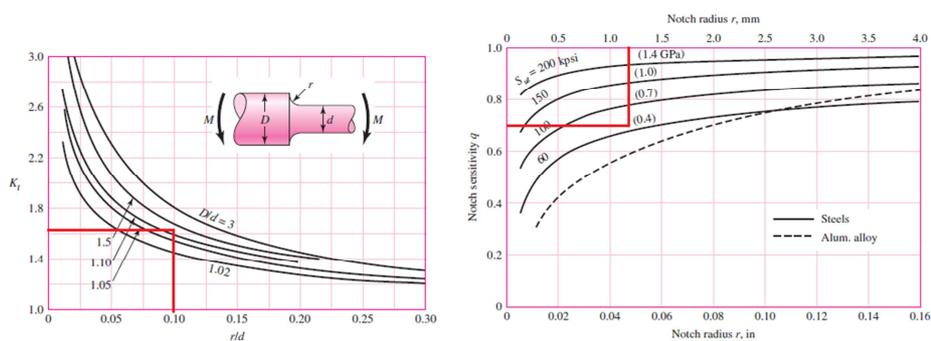


Figura 3.10 Factores de concentración de esfuerzos en flexión en la sección del engrane 1⁶²

⁶¹ (Budinas & Nisbett, 2011)

De la figura 3.10 se tienen los factores $K_t = 1.68$ y $q = 0.7$

Utilizando la ecuación 3.19, se tiene:

$$K_f = 1 + 0.7(1.68 - 1) = 1.476$$

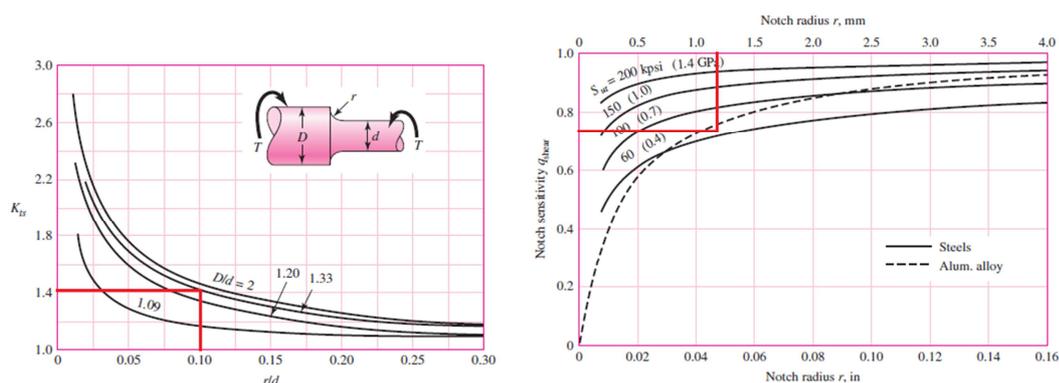


Figura 3.11 Factores de concentración de esfuerzos en torsión en la sección del engrane 1

De la figura 3.11 se tienen los factores $K_{ts} = 1.41$ y $q_s = 0.73$

Utilizando la ecuación 3.19, se tiene:

$$K_{fs} = 1 + 0.73(1.41 - 1) = 1.299$$

De la ecuación 3.17, se tiene el factor de tamaño:

$$k_b = \left(\frac{d_{e1}}{7.62} \right)^{-0.157} = 0.953$$

Con la ecuación 3.18, se calcula la el esfuerzo de Marin.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e = 158.38 \text{ MPa}$$

Con las ecuaciones 3.47 y 3.48, se determinan los esfuerzos.

$$\sigma'_a = \frac{32K_f M_a}{\pi d_{e1}^3} \quad \text{Ecuación 3.47}$$

$$\sigma'_m = \left[3 \left(\frac{16K_{fs} T_m}{\pi d_{e1}^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 3.48}$$

Reemplazando los valores calculados, se tiene $\sigma'_a = 25.4 \text{ MPa}$ y $\sigma'_m = 48.42 \text{ MPa}$

Con la ecuación 3.49, se calcula el factor de seguridad.

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \quad \text{Ecuación 3.49}$$

$$n_f = 3.8$$

Con la ecuación 3.50 se verifica a fluencia.

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma'_a + \sigma'_m} \quad \text{Ecuación 3.50}$$

$$n_y = 4.1$$

En el chavetero para el engrane 1

Se asume un radio de filete estándar en el chavetero de $r=0.02*d=0.2\text{mm}$

Para un chavetero fresado, los factores de concentración son $K_t = 2.14$ y $q = 0.4$ para flexión; y $K_{ts} = 3$ y $q_s = 0.48$ para torsión (Ver anexo 10)

Usando la ecuación 3.19 se obtiene,

$$K_f = 1 + 0.4(2.14 - 1) = 1.456$$

$$K_{fs} = 1 + 0.48(3 - 1) = 1.96$$

Usando las ecuaciones 3.47 y 3.48 se obtienen los esfuerzos:

$$\sigma'_a = \frac{32K_f M_a}{\pi d_{e1}^3} = 25.06 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \left[3 \left(\frac{16K_{fs} T_m}{\pi d_{e1}^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 73.04 \text{ MPa}$$

Finalmente se reemplazan los valores calculados en la ecuación 3.49

$$\left(n_f = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \right)$$

$$n_f = 3.3$$

En la sección de los rodamientos del eje 1:

$$\frac{D}{d} = \frac{d_{e1}}{d_{r1}} = \frac{12}{10} = 1.2$$

Se considera un radio de filete agudo, con ello $r/d = 0.02$, lo que implica que $r = 0.2\text{mm}$.

Para un filete de hombro agudo, los factores de concentración son $K_t = 2.7$ y $q = 0.4$ para flexión y $K_{ts} = 2.2$ y $q_s = 0.48$ para torsión

Usando la ecuación 3.19 se obtiene,

$$K_f = 1 + 0.4(2.7 - 1) = 1.68$$

$$K_{fs} = 1 + 0.48(2.2 - 1) = 1.576$$

De la ecuación 3.17, se tiene el factor de tamaño:

$$k_b = \left(\frac{d_{r1}}{7.62} \right)^{-0.157} = 0.971$$

Con la ecuación 3.18, se calcula la el esfuerzo de Marin.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e = 161.5 \text{ MPa}$$

Del diagrama de momento flector, se obtiene los valores en los que se somete el rodamiento de la izquierda que vendría a ser el más crítico.

$$M_a = \sqrt{M_{xy}^2 + M_{xz}^2} = 0.584 \text{ Nm}$$

Usando las ecuaciones 3.47 y 3.48 se obtienen los esfuerzos:

$$\sigma'_a = \frac{32K_f M_a}{\pi d_{r1}^3} = 10 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \left[3 \left(\frac{16K_f s T_m}{\pi d_{r1}^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 101.5 \text{ MPa}$$

Se reemplazan los valores calculados en la ecuación 3.49 $\left(n_f = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{s_e} + \frac{\sigma'_m}{s_{ut}}} \right)$

$$n_f = 3.78$$

EJE 2 (Ver figura 3.12)

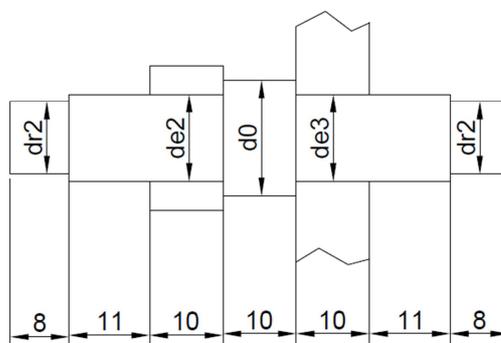
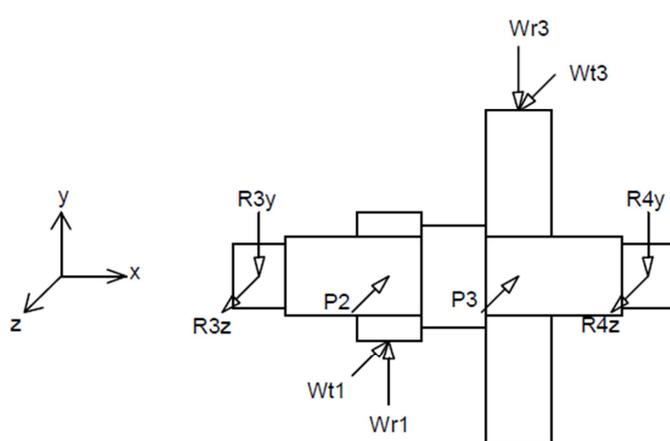


Figura 3.12 Esquema del eje 1

Determinación de las reacciones



$$P_2 = 0.31 \text{ N}$$

$$P_3 = 3.18 \text{ N}$$

De la sumatoria de fuerzas y momentos :

$$R_{3z} = 115.48 \text{ N}$$

$$R_{3y} = 41.57 \text{ N}$$

$$R_{4z} = 22.08 \text{ N}$$

$$R_{4y} = 7.24 \text{ N}$$

Figura 3.13 Diagrama de cuerpo libre del eje 2

Diagramas de fuerza cortante y momento flector

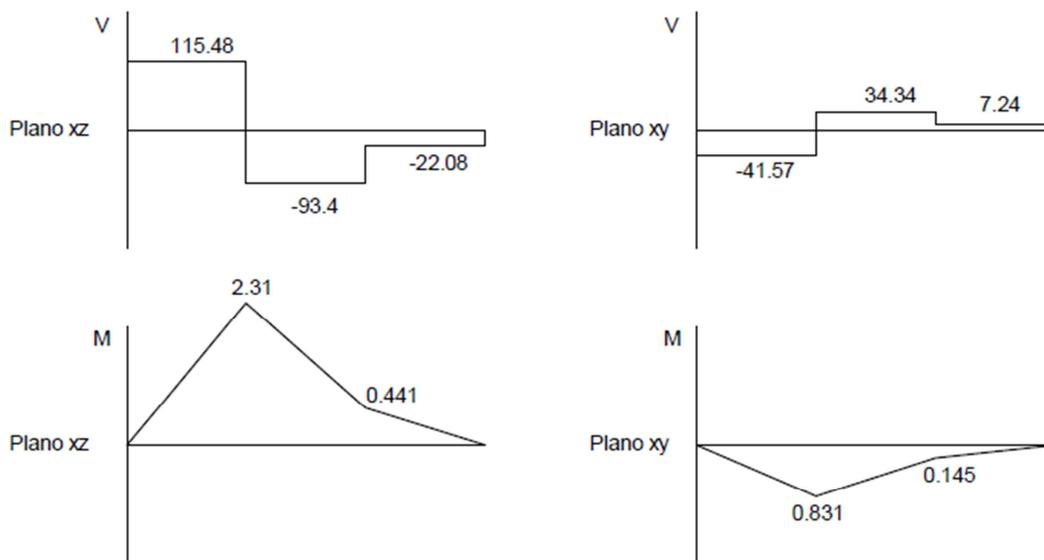


Figura 3.14 Diagrama de fuerza cortante y momento flector del eje 2

DETERMINACIÓN DE LOS DIÁMETROS

Como se quiere guardar una proporción entre los ejes, se seleccionan los mismos diámetros que se calcularon en el eje 1, luego se comprobará si el factor de seguridad es el adecuado para soportar las cargas, es decir:

$$d_0 = 16 \text{ mm}$$

$$d_{e2} = d_{e3} = 12 \text{ mm}$$

$$d_{r2} = 10 \text{ mm}$$

VERIFICACIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD

En la sección del engrane 2:

Se realiza el mismo análisis que en el engrane 1, y dado que se trata del mismo material con los diámetros iguales, los valores que varían son M_a , que depende de los diagramas de momento flector (ver figura 3.14) y T_m .

$$M_a = \sqrt{2.31^2 + 0.831^2} = 2.46 \text{ Nm}$$

$$T_m = \tau_2 = 2.61 \text{ Nm}$$

Usando las ecuaciones 3.47 y 3.48 se obtienen los esfuerzos:

$$\sigma'_a = \frac{32K_f M_a}{\pi d_{e2}^3} = 21.36 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \left[3 \left(\frac{16K_{fs} T_m}{\pi d_{e2}^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 17.31 \text{ MPa}$$

Se reemplazan los valores calculados en la ecuación 3.49 $\left(n_f = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \right)$

$$n_f = 5.9$$

En el chavetero para el engrane 2

Los valores de K_f y K_{fs} , son los mismos que en el chavetero 1.

Con las ecuaciones 3.47 y 3.48 se obtienen los esfuerzos:

$$\sigma'_a = \frac{32K_f M_a}{\pi d_{e2}^3} = 21.07 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \left[3 \left(\frac{16K_{fs} T_m}{\pi d_{e2}^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 26.11 \text{ MPa}$$

Se reemplazan los valores calculados en la ecuación 3.49 $\left(n_f = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \right)$

$$n_f = 5.4$$

En el engrane 3:

Se realiza el mismo análisis que en el engrane 1, y dado que se trata del mismo material con los diámetros iguales, los valores que varían son M_a , que depende de los diagramas de momento flector y T_m .

$$M_a = \sqrt{0.64^2 + 0.22^2} = 0.68 \text{ Nm}$$

$$T_m = \tau_2 = 2.61 \text{ Nm}$$

Con las ecuaciones 3.47 y 3.48 se obtienen los esfuerzos:

$$\sigma'_a = \frac{32K_f M_a}{\pi d_{e3}^3} = 4.04 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \left[3 \left(\frac{16K_{fs} T_m}{\pi d_{e3}^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 17.31 \text{ MPa}$$

Se reemplazan los valores calculados en la ecuación 3.49 $\left(n_f = \frac{1}{\frac{\sigma'_a + \sigma'_m}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \right)$

$$n_f = 16.6$$

En el chavetero para el engrane 3

Los valores de K_f y K_{fs} , son los mismos que en el chavetero 1.

Usando las ecuaciones 3.47 y 3.48 se obtienen los esfuerzos:

$$\sigma'_a = \frac{32K_f M_a}{\pi d_{e3}^3} = 4 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \left[3 \left(\frac{16K_{fs} T_m}{\pi d_{e3}^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 26.11 \text{ MPa}$$

Se reemplazan los valores calculados en la ecuación 3.49 $\left(n_f = \frac{1}{\frac{\sigma'_a + \sigma'_m}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \right)$

$$n_f = 12.9$$

En la sección de los rodamientos del eje 2

El análisis inicial es igual que en el eje 1 dado que se trata del mismo material y los mismos diámetros, y solamente varía los valores de M_a y T_m .

Del diagrama de momento flector, se obtiene los valores en los que se somete el rodamiento de la izquierda que vendría a ser el más crítico.

$$M_a = \sqrt{M_{xy}^2 + M_{xz}^2} = 0.512 \text{ Nm}$$

Usando las ecuaciones 3.47 y 3.48 se obtienen los esfuerzos:

$$\sigma'_a = \frac{32K_f M_a}{\pi d_{r2}^3} = 8.77 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \left[3 \left(\frac{16K_{fs} T_m}{\pi d_{r2}^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 36.29 \text{ MPa}$$

Se reemplazan los valores calculados en la ecuación 3.49 $\left(n_f = \frac{1}{\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}} \right)$

$$n_f = 7.8$$

OBSERVACIÓN: Las dimensiones de los engranes se ven en el Anexo 19

3.1.5. DISEÑO DE LAS CHAVETAS

Para realizar la selección de las chavetas, se tiene que partir del diámetro de los engranes que es de 12 mm.⁶³

Se selecciona una chaveta cuadrada de 3mm de material SAE 1018, para diámetro del eje de 12mm (ver anexo 11), por lo tanto $t = 3 \text{ mm}$

Del catálogo de Iván Bohman, se tiene que $S_y = 304 \text{ MPa}$ (ver anexo 2)

Por la energía de distorsión se calcula el esfuerzo con la ecuación 3.51

$$S_{sy} = 0.577S_y \quad \text{Ecuación 3.51}$$

Reemplazando los valores se tiene que $S_{sy} = 175.4 \text{ MPa}$

Se considera además un factor de seguridad de $n = 3$

⁶³ Las ecuaciones que se utilizan en este literal, fueron tomadas del ejemplo 7-6 del libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley (Budinas & Nisbett, 2011)

Chaveta en el eje 1

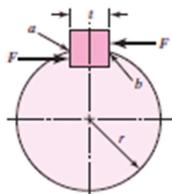


Figura 3.15 Fuerza en una chaveta

La fuerza de la superficie del eje se determina con la ecuación 3.52

$$F_1 = \frac{\tau_1}{\frac{d_{e1}}{2}} \quad \text{Ecuación 3.52}$$

$$F_1 = \frac{7.3}{0.006} = 1217 \text{ N}$$

La longitud para que resista la fuerza cortante se calcula con la ecuación 3.53

$$l_1 = \frac{F_1 n}{t * S_{sy}} = 6.94 \text{ mm} \quad \text{Ecuación 3.53}$$

$$l_1 = 6.94 \text{ mm}$$

La longitud para que resista la fuerza de aplastamiento se obtiene con la ecuación 3.54

$$l_1 = \frac{F_1 n}{\frac{t}{2} * S_y} \quad \text{Ecuación 3.54}$$

$$l_1 = 8 \text{ mm}$$

Chaveta en el eje 2

La fuerza de la superficie del eje se determina con la ecuación 3.52

$$F_2 = \frac{\tau_2}{\frac{d_{e2}}{2}} = \frac{2.61}{0.006} = 435 \text{ N}$$

La longitud para que resista la fuerza cortante se calcula con la ecuación 3.53

$$l_2 = \frac{F_2 n}{t * S_{sy}} = 2.48 \text{ mm}$$

La longitud para que resista la fuerza de aplastamiento se obtiene con la ecuación 3.54

$$l_2 = \frac{F_1 n}{\frac{t}{2} * S_y} = 2.86 \text{ mm}$$

Por lo tanto es conveniente seleccionar **chavetas cuadradas de 3x3mm y de 8mm de longitud.**

3.1.6. SELECCIÓN DE LOS RODAMIENTOS

Para la selección de los rodamientos, el objetivo fundamental es el de encontrar una clasificación de catálogo con el cual seleccionar un rodamiento en función del diámetro interior, es decir de un eje que fue previamente diseñado.⁶⁴

Esta clasificación de catálogo se define como la carga radial que ocasiona que el 10 por ciento de un grupo de rodamientos falle durante la vida nominal del fabricante.

Para encontrar la clasificación de catálogo definida previamente se debe partir conociendo los valores de varios parámetros, los cuales se encuentran en función del tipo de aplicación de rodamientos para varias clases de maquinaria. Entre estos parámetros se encuentra la vida de rodamientos. El mecanismo detallado en el presente documento se encuentra dentro del grupo de Máquinas de servicio intermitente donde una operación confiable es de gran importancia de la tabla 11-4 del libro Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, en la cual se recomienda utilizar una vida de un rango de 8 a 14 kh, y para el caso del

⁶⁴ Las ecuaciones y valores de parámetros utilizados en esta sección fueron tomados del capítulo 11 del libro de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley (Budinas & Nisbett, 2011)

factor de aplicación de carga, se debe considerar que el mecanismo diseñado trabaja con engranes comerciales que no requieren una precisión muy alta, por lo que este factor puede tomar un valor en un rango de 1.1 a 1.3.

Cuando se trata de selección de rodamientos, los parámetros de Weibull, los cuales resultan de la experiencia de fabricantes, y sirven como un método de ajuste, deben considerarse. Para el caso de los rodamientos de este trabajo se requiere que tengan una vida nominal de 10^6 revoluciones, en cuyo caso los parámetros de Weibull son:

$$X_0 = 0.02 ; \theta = 4.459 ; b = 1.483$$

Otro factor importante es un múltiplo adimensional de la vida nominal de un rodamiento, y está dado por el cociente entre la vida deseada y la vida nominal en horas del mismo.

Como se pudo evidenciar en secciones anteriores, en el mecanismo diseñado no existen fuerzas axiales o de empuje en los rodamientos, sino solo radiales, lo cual facilita mucho la selección de rodamientos adecuados para la aplicación. A continuación se detalla dicha selección:

Primeramente se parte con la necesidad de rodamientos de bolas ya que estos permiten soportar cierta fuerza de empuje, en caso de que existieran fuerzas externas imprevistas.

Posteriormente se procede a determinar un porcentaje de confiabilidad, el cual generalmente se toma como la raíz cuadrada de 0.90, que resulta en 0.949 es decir una confiabilidad del 94.9%.

Ahora se debe considerar un factor que depende del tipo de rodamiento, denotado con la letra a , y que para el caso de un rodamiento de bolas tiene un valor de 3.

A continuación se detalla la selección de los rodamientos para los dos ejes del mecanismo del presente documento:

Selección de rodamientos para el eje 1:

Como se mostró en la sección de diseño de ejes, las reacciones radiales en los puntos en donde van ubicados los rodamientos son las siguientes:

$$R1_z = 136.93 \text{ N}$$

$$R1_y = 50.61 \text{ N}$$

Que es equivalente a una sola fuerza radial de magnitud:

$$R1 = \sqrt{136.93^2 + 50.61^2} = 145.983 \text{ N}$$

Y para el otro extremo del eje:

$$R2_z = 68.47 \text{ N}$$

$$R2_y = 25.3 \text{ N}$$

Que es equivalente a una sola fuerza radial de magnitud:

$$R2 = \sqrt{68.47^2 + 25.3^2} = 73 \text{ N}$$

Considerando una velocidad máxima de operación en el eje 1 de 78rpm y tomando en cuenta una vida deseada (Ld) de 8kh, se procede a calcular el múltiplo adimensional de vida nominal:

$$Xd = \frac{60 * Ld * Velocidad_{eje_1}}{L10} \quad \text{Ecuación 3.55}$$

$$Xd = \frac{60 * 8000 * 78}{10^6} = 37.44$$

Ahora se procede a seleccionar un rodillo de bolas mediante la ecuación 11-7 del libro Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, como se muestra a continuación:

$$C_{10} = \text{Factor_de_carga} * \text{Fuerza_radial} * \left[\frac{X_d}{X_o + (\theta - X_o)(1 - R_d)^{\frac{1}{b}}} \right]^{\frac{1}{a}} \quad \text{Ecuación 3.56}$$

$$C_{10} = 1.1 * 145.983 * \left[\frac{37.44}{0.02 + (4.459 - 0.02)(1 - 0.949)^{\frac{1}{1.483}}} \right]^{\frac{1}{3}} = 630.259N$$

Repetiendo el procedimiento para el otro extremo del eje 1 se obtiene:

$$C_{10} = 1.1 * 73 * \left[\frac{37.44}{0.02 + (4.459 - 0.02)(1 - 0.949)^{\frac{1}{1.483}}} \right]^{\frac{1}{3}} = 315.161N$$

Es decir se debe seleccionar un rodamiento que tenga una carga nominal mayor a 315.161 y a 630.259N.

Selección de rodamientos para el eje 2:

Para el caso del eje 2 se siguieron los mismos pasos mostrados en la selección de rodamientos para el eje 1, dando como resultado lo siguiente:

$$R_{3z} = 115.48 N$$

$$R_{3y} = 41.57 N$$

$$R_3 = \sqrt{115.48^2 + 41.57^2} = 122.734 N$$

$$R_{4z} = 22.08 N$$

$$R_{4y} = 7.24 N$$

$$R_3 = \sqrt{22.08^2 + 7.24^2} = 23.237 N$$

Tomando una velocidad máxima en el eje 2 de 218.4rpm, se obtiene:

$$Xd = \frac{60 * Ld * Velocidad_eje_2}{L10} = \frac{60 * 8000 * 218.4}{10^6} = 104.832$$

Ahora se procede a seleccionar un rodillo de bolas mediante la ecuación 11-7 del libro Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, como se muestra a continuación:

$$C10 = Factor_de_carga * Fuerza_radial * \left[\frac{Xd}{Xo + (\theta - Xo)(1 - Rd)^{\frac{1}{b}}} \right]^{\frac{1}{a}}$$

Para el primer extremo del eje 2 se tiene:

$$C10 = 1.1 * 122.734 * \left[\frac{104.832}{0.02 + (4.459 - 0.02)(1 - 0.949)^{\frac{1}{1.483}}} \right]^{\frac{1}{3}} = 746.856 N$$

Para el otro extremo del eje 2 se tiene:

$$C10 = 1.1 * 23.237 * \left[\frac{104.832}{0.02 + (4.459 - 0.02)(1 - 0.949)^{\frac{1}{1.483}}} \right]^{\frac{1}{3}} = 141.399 N$$

Es decir se debe seleccionar un rodamiento que tenga una carga nominal mayor a 746.856N y a 141.399N.

3.1.7. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE

SOPORTE DE LOS RODAMIENTOS

La primera parte que se tiene que diseñar son los soportes de los rodamientos, el material que se va a utilizar es de Nylon Poliamida (Duralon) debido a su baja densidad y buena resistencia, este soporte consta de dos partes como se muestra en la figura 3.16.

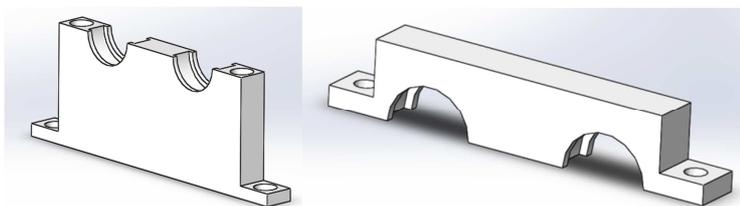


Figura 3.16 Soporte de los Rodamientos. Diseñado en Solidworks™

MESA DE SOPORTE

La mesa de soporte, también para evitar que exista mucho peso en el mecanismo, se lo debe realizar de Nylon Poliamida, ver figura 3.17.

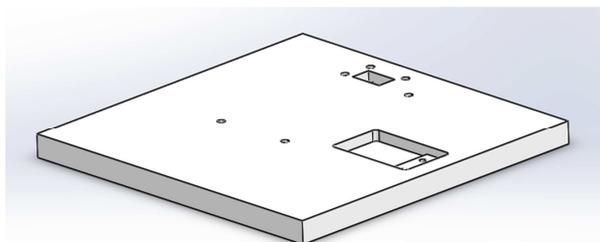


Figura 3.17 Mesa de Soporte. Diseñado en Solidworks™

GUÍA DE LA CREMALLERA

La guía de la cremallera también se la realiza de material Nylon Poliamida, se puede apreciar en la figura 3.18.

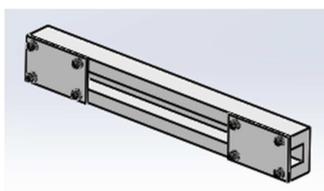


Figura 3.18 Guía de la Cremallera. Diseñado en Solidworks™

PLACA PARA LA CREMALLERA

La placa de la cremallera, se lo va a hacer de material Nylon Poliamida, se puede apreciar en la figura 3.19.



Figura 3.19 Placa de la Cremallera. Diseñado en Solidworks™

OBSERVACIÓN: Para observar las dimensiones de todos los elementos, ver el anexo 19.

MECANISMO ENSAMBLADO

El mecanismo ensamblado, se puede apreciar en la figura 3.20.

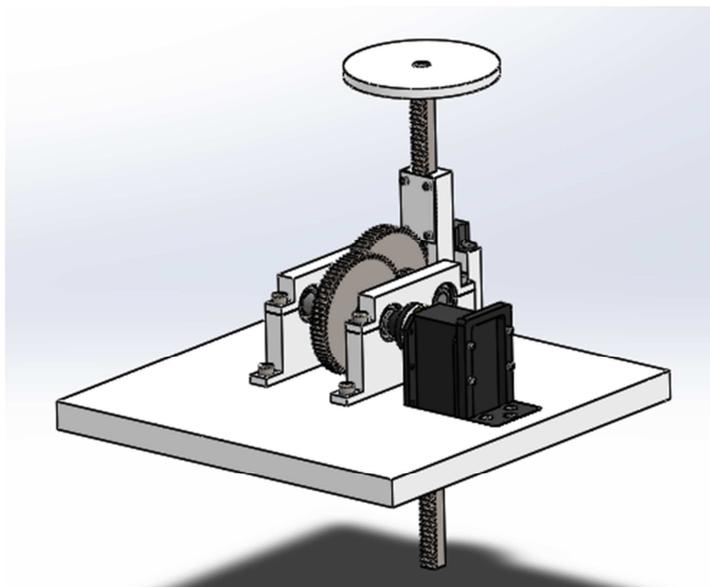


Figura 3.20 Mecanismo Ensamblado. Diseñado en Solidworks™

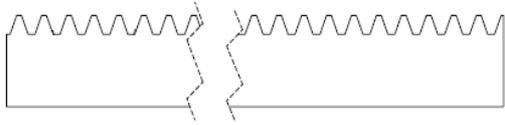
3.1.8. SELECCIÓN DE COMPONENTES

De acuerdo a los cálculos realizados en los puntos anteriores, en este literal se realiza un resumen de los componentes mecánicos que se presentan en la estructura. Las dimensiones de los mismos se los puede ver en el Anexo 19

CREMALLERA: Sus características se muestran en la tabla 3.2

Tabla 3.2

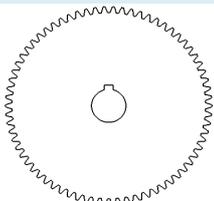
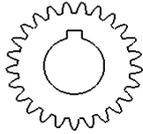
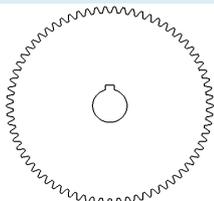
Características de la cremallera

Componente	Cremallera
Material	Acero AISI 1045
Módulo	1
Longitud	300 mm
Sección	10mm x 10mm
Esquema	

ENGRANES: Las características de los engranes se muestran en la tabla 3.3

Tabla 3.3

Características de los engranes

Componente	Engrane 1	Engrane 2	Engrane 3
Material	Acero AISI 1045	Acero AISI 1045	Acero AISI 1045
Módulo	1	1	1
Núm. de dientes	70	25	70
Diámetro primitivo	70mm	25mm	70mm
Chavetero	3mm x 1.5mm	3mm x 1.5mm	3mm x 1.5mm
Esquema			

EJES: Los ejes que se utilizan en el proyecto se muestran en la tabla 3.4

Tabla 3.4

Características de los ejes

Componente	Eje 1	Eje 2
Material	Acero SAE 1018	Acero SAE 1018
Diámetro mayor (D0)	16 mm	16 mm
Diámetro en los engranes	12 mm	12 mm

Diámetro en los rodamientos	10 mm	10 mm
Esquema		

CHAVETAS: De acuerdo a lo analizado en el punto 3.1.5 las características de la chaveta seleccionada se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5

Características de las chavetas

Componente	Chaveta
Material	Acero SAE 1018
Sección	3mm x 3mm
Longitud	9mm
Esquema	

RODAMIENTOS: Con lo que se diseñó en el literal 3.1.6, se seleccionan los rodamientos de acuerdo a los parámetros C_{10} . Las características se muestran en la tabla 3.6. Para más información revisar el Anexo 12.

Tabla 3.6

Características de los rodamientos

Componente	Rodamiento
Tipo de rodamiento	Abierto
Número de rodamiento	6000
Diámetro interior	10 mm
Diámetro exterior	26 mm
Ancho	8 mm
Carga básica	4550 N
Velocidad límite	30000 rpm
Esquema	

3.2. DISEÑO DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS Y ELECTRICOS

3.2.1. SELECCIÓN DEL SERVOMOTOR

Primeramente lo que se va a realizar es una comparación entre el motor DC, el motor AC y el servomotor (ver tabla 3.7)

Tabla 3.7

Comparación de los motores

Motor AC	Motor DC	Servomotor
Su velocidad depende de la corriente alterna con que se alimente	La velocidad depende del voltaje aplicado	La velocidad depende de una señal de entrada que se envíe a su circuito de control
Su velocidad se regula solamente con variadores de frecuencia	Su velocidad se regula con una fuente de tensión variable	Su velocidad se regula con la variación de la señal de entrada, dependiendo del servomotor.
No se puede controlar posición	Control de posición relativamente simple	Fácil control de posición
El mantenimiento requerido es mínimo	Requieren mayor mantenimiento	Debe tener un mantenimiento periódico
Diseño para una única velocidad	Diseño para multi-velocidad	Diseño para multi-velocidad
Poco preciso	Medianamente preciso	Muy preciso
Liviano	Pesado	Pesado
Bajo Costo	Medio Costo	Alto Costo

Después de realizar un análisis acerca de qué tipo de motor se requiere, analizando que lo que se necesita es que se tenga un diseño para multi-velocidad y que además sea muy preciso tanto en su control de posición como

de velocidad, por lo que el tipo de motor más adecuado para una leva electrónica definitivamente es el *SERVOMOTOR*.

Se ha seleccionado el servomotor MX-64T de la empresa Dynamixel (ver figura 3.21) ya que tiene un alto grado de precisión en cuanto se refiere a las variaciones de posición y velocidad, además es compatible con un controlador que maneja una programación similar a la de ARDUINO.



Figura 3.21 Motor Dynamixel MX64-T⁶⁵

Las características se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8

Características del motor Dynamixel MX-64T

Torque máximo	Velocidad (RPM)	Voltaje de operación	Corriente Nominal	Dimensiones	Peso
7.3 Nm	78	11.4-14.8 V	5.2 A	40.2x61.1x41mm	126 g
Resolución	Ángulo de operación	Reducción	Sensor de Posición	Protocolo de comunicación	Velocidad de comunicación
0.088°	360°	200:1	Encoder magnético	TTL	3 mbps

Como se puede observar en las especificaciones, se tiene un torque mayor al requerido y una velocidad angular menor a la que se necesita, por lo que se

⁶⁵ (ROBOTIS , 2010)

tiene que construir un tren de engranes que permita reducir el torque y aumentar la velocidad, ese diseño está descrito en la sección 3.1.1.

3.2.2. DISEÑO DE LA TRANSMISIÓN DE DATOS

Una vez que surge la necesidad del usuario de generar un comportamiento en el mecanismo, los datos de posición y velocidad en un instante dado se transmiten desde el computador hacia una placa ARDUINO, desde la cual es necesario enviarlos hacia el controlador OPEN CM 9.04b para que posteriormente se genere el movimiento deseado en la cremallera.

Para la transmisión de datos entre la placa ARDUINO y el controlador OPEN CM 9.04b existen varias alternativas, cuya selección depende de algunos factores entre los cuales se encuentran el funcionamiento, velocidad de respuesta, precisión, veracidad de los datos, costo, entre otras.

La opción que se eligió fue la transmisión de datos mediante modulación por ancho de pulso (PWM) y la conversión análogo – digital (ADC). Dentro de este método de transmisión de datos hay que tomar en cuenta ciertas consideraciones, entre las cuales se tiene por ejemplo que si bien es cierto una salida modulada por ancho de pulso genera un voltaje eficaz que se puede utilizar en circuito analógicos, un conversor análogo – digital no reconoce dicho voltaje eficaz como un voltaje real sino como pulsos digitales, por lo que es necesario filtrar la señal PWM antes de que pueda llegar a un ADC. Para esto se seleccionó un filtro pasa bajas a 490Hz, que es la frecuencia del PWM y por lo tanto la frecuencia de corte.

El filtro pasa bajas seleccionado será de tipo RC, es decir compuesto por una resistencia y un capacitor, y la salida se toma en el capacitor, por lo que es importante controlar que la capacitancia no sea muy grande para que la variación del voltaje de salida pueda ajustarse a los requerimientos de respuesta del mecanismo.

Cuando se aplica una señal de pulsos a una red RC pasa bajas, la salida depende de la relación que exista entre una constante de tiempo, τ , resultante

del producto entre la resistencia y la capacitancia del filtro, y el período de la señal de entrada T .

En la figura 3.22 se puede apreciar el comportamiento del voltaje de salida dependiendo de la relación antes mencionada.

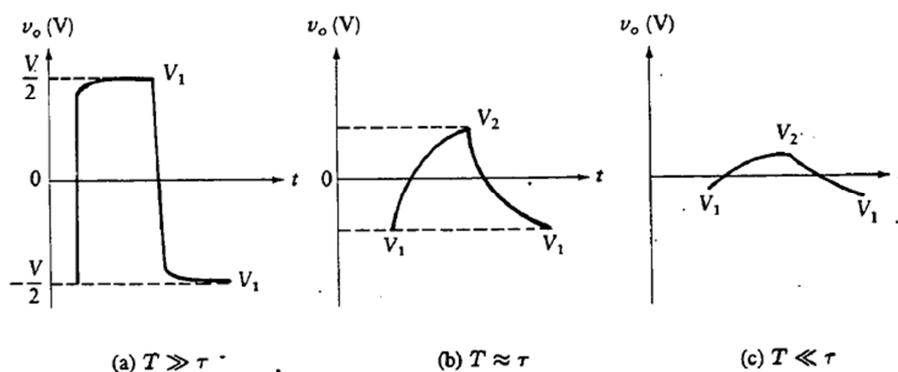


Figura 3.22 Salida de un filtro RC pasa bajas

Como se puede apreciar en el literal c de la imagen anterior, las variaciones de voltaje respecto a un voltaje de referencia son menores que en los otros dos casos, por esta razón se debe tratar de que el período de la señal de entrada al filtro sea mucho menor al producto entre la resistencia y la capacitancia del mismo. Considerando que la capacitancia debe ser pequeña, para que el tiempo de respuesta del circuito sea aceptable, la resistencia deberá ser alta.

En este caso los valores de V_1 y V_2 están dados por la expresión matemática de la ecuación 3.57.

$$-V_1 = V_2 = \frac{V * (1 - e^{-\frac{T}{2\tau}})}{2 * (1 - e^{-\frac{T}{\tau}})} \quad \text{Ecuación 3.57}^{66}$$

Considerando que una resistencia equivalente para el filtro de $124\text{k}\Omega$, y un capacitor de $2.2\mu\text{F}$, la constante de tiempo sería 0.2728 , mientras que el período de la señal PWM a 490Hz sería 0.002 . Como se puede observar T es

⁶⁶ (Savant, Roden, & Carpenter, 2004)

mucho menor a τ . Ahora se procede a calcular las variaciones de voltaje V_1 y V_2 , tomando en cuenta que en la expresión anterior V es el voltaje máximo que llega al filtro es decir 3.3V, resultando:

$$-V_1 = V_2 = \frac{3.3 * \left(1 - e^{-\frac{0.002}{2*0.2728}}\right)}{2 * \left(1 - e^{-\frac{0.002}{2*0.2728}}\right)} = 0.0031 V$$

Es decir la variación teórica máxima a la salida del filtro será de 0.0031V, mostrando así que el voltaje de salida será estable. Ahora es necesario saber la variación máxima que este voltaje producirá en la lectura del conversor análogo – digital del controlador OPEN CM 9.04b, el cual tiene una resolución de 12 bits.

Considerando variaciones de voltaje pico a pico, entonces la variación máxima podría asumirse como la suma de los valores absolutos de V_2 y V_1 , en cuyo caso la máxima variación en la lectura del ADC será:

$$\text{Variación ADC} = 2 * 0.0031 * \frac{4096}{3.3} = 8$$

Por esta razón es importante considerar esta variación en la programación del módulo, tanto en MATLAB como en el controlador OPEN CM 9.04b, para evitar movimientos erróneos en el mecanismo.

Además de los circuitos de filtro pasa bajas, se utilizará un amplificador operacional para cada señal PWM en la configuración de seguidor. El amplificador operacional seleccionado es el LM324N, el cual tiene un tiempo teórico de reacción ante una señal de entrada de aproximadamente $5\mu s$, lo cual es lo suficientemente rápido para el correcto desempeño del mecanismo.

Una vez que se han realizado los cálculos necesarios para el filtro de señales, se procedió a realizar las pruebas con dicho filtro y la programación en el entorno GUI, encontrando que en ocasiones el mecanismo realizaba movimientos erróneos, y esto se debía a los datos de velocidad que llegaban al

controlador OPEN CM 9.04b, por lo que se decidió filtrar de mejor manera la señal de PWM correspondiente a velocidad, proveniente de la placa ARDUINO. Para esto se utilizaron redes RC en paralelo con resistencias de $10\text{k}\Omega$, y capacitores cerámicos de $0.1\mu\text{F}$, logrando que la respuesta del mecanismo sea la esperada.

En la figura 3.23 se muestra el diseño esquemático del filtro,

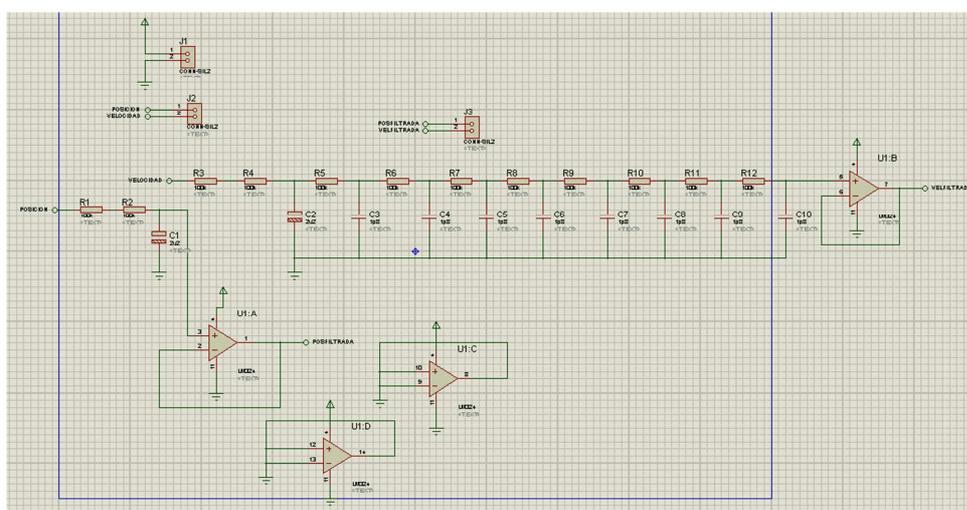


Figura 3.23 Diseño esquemático del filtro RC. Elaborado en ISIS.

El diseño de la placa de circuito impreso para el filtro, mediante el complemento ARES del software PROTEUS, ver el Anexo 13.

Otras dos opciones que se tomaron en cuenta para la transmisión de datos entre la placa ARDUINO y el controlador OPEN CM 9.04b, fueron:

- Transmisión WIRELESS o BLUETOOTH mediante un BT210, perteneciente a INTEL, el cual se puede utilizar con dispositivos telefónicos móviles.
- Transmisión ZIGBEE utilizando un dispositivo ZIG A y un ZIG 100.
- Transmisión directa desde el computador, utilizando un LN-101, que es un dispositivo utilizado para conectar un puerto USB y una configuración serial de 4 pines a 3.3V.

- Elaboración de un programa para lectura de ancho de pulso mediante pines digitales.

Cada una de las opciones antes mencionadas presentó inconvenientes, los cuales se detallan en la tabla 3.9.

Tabla 3.9

Comparación entre modos de transmisión de datos

Modo de Transmisión de datos	Compatibilidad				
	Disponibilidad	Costo	ARDUINO	MATLAB	Funcionalidad
Transmisión WIRELESS o BLUETOOTH mediante un BT210	--				X
Transmisión ZIGBEE utilizando un dispositivo ZIG A y ZIG 100	--				X
Transmisión directa desde el computador, utilizando un LN-101	X	X		X	X
Lectura de ancho de pulso mediante pines digitales	X	X	X	X	

En donde los casilleros marcados con una X, son aquellos que muestran que el modo de transmisión de datos cumple con dicha característica. Los casilleros marcados con - - indican que el modo de transmisión de datos cumple con dicha característica, pero con cierto grado de dificultad, y los casilleros en blanco indican que el modo de transmisión no cumple en lo absoluto con dicha característica.

Para el caso de la transmisión WIRELESS, BLUETOOTH y ZIGBEE, el costo de los elementos necesarios para este tipo de transmisión es elevado, además que la compatibilidad con los módulos de programación de ARDUINO mediante MATLAB es nula, dificultando así la programación.

En el caso de la lectura de ancho de pulso mediante pines digitales, se realizó un programa en el controlador OPEN CM 9.04b para conocer el tiempo que el pulso, enviado vía PWM por ARDUINO, estaba en alto y en bajo, permitiendo tener valores exactos e invariantes en el tiempo, con la información de posición y velocidad enviados desde MATLAB, sin embargo cuando se unieron las líneas de código realizadas en este programa con las librerías DYNAMIXEL hubieron conflictos, causando retrasos en los comandos de control del motor, haciendo que este modo de transmisión sea inútil a pesar de que trabajándolo independientemente diera los mejores resultados de recepción de datos.

3.2.3. DISEÑO DE LA FUENTE DE PODER (ETAPA DE POTENCIA)

En este punto, se realizan los cálculos para el diseño de la fuente de voltaje para el motor, ya que se requiere que se entregue 12 voltios hasta 4 amperios a la salida para su funcionamiento.

Para el diseño, primeramente se requiere reducir el voltaje de 110 Volts a 24 Volts, para ello se utiliza un transformador, con la característica 110V-24V (4A).

Posterior a ello se procede a rectificar la señal, es decir transformar el voltaje AC a voltaje DC, para esto se utiliza la configuración de un puente de diodos con un capacitor electrolítico como se muestra en la figura 3.24.

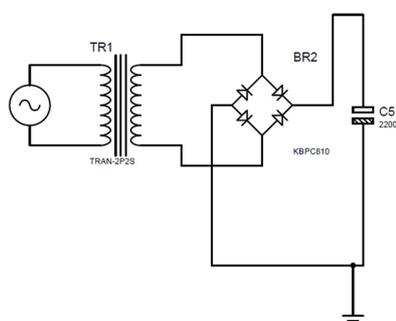


Figura 3.24 Convertidor de Voltaje DC a voltaje AC. Elaborado en Proteus

Para obtener 12 Voltios a la salida, se utiliza el regulador LM723, que es un circuito integrado que permite regular el voltaje y evitar la caída de voltaje.

Dado que en la hoja de datos del regulador LM723 se indica que solamente puede entregar 150mA de corriente, se tiene que utilizar una configuración de bypass con un transistor BD135 y un transistor 2N3055 y que permiten que se obtenga a la salida la corriente de 4 amperios.

Con estas consideraciones el esquema de la fuente de Voltaje es el que se muestra en la figura 3.25.

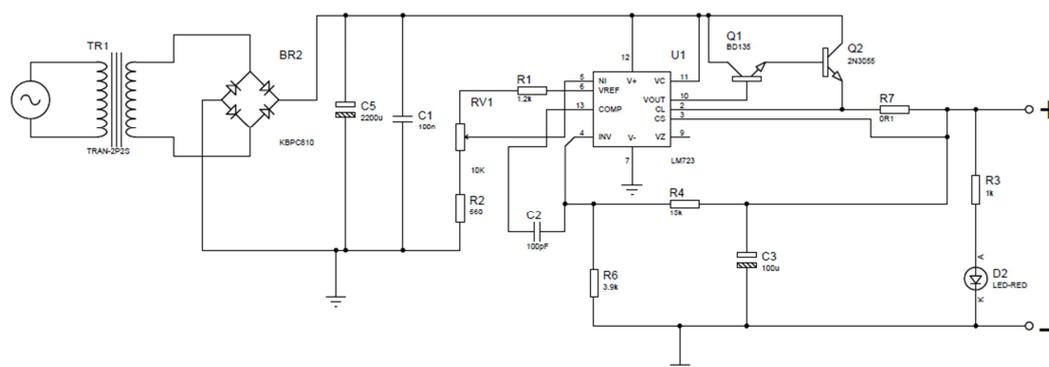


Figura 3.25 Fuente de 12V-4A. Elaborado en Proteus

Una parte importante en la etapa de potencia para la elaboración de la placa de fuente de energía de 12 voltios es el cálculo del ancho de pistas, para realizar este cálculo, se recurre a la norma IPC-2221⁶⁷.

Primeramente se debe calcular el aumento de temperatura, y para ellos se debe considerar el sustrato, en el caso de PCBs comunes es el FR4, que tiene una temperatura máxima de trabajo de 130 grados centígrados según la norma IPC-2221, pero se escoge 100 grados por mayor seguridad. La máxima temperatura ambiente se la toma de 30 grados, por lo que el aumento de temperatura sería $T_r = 100 - 30 = 70^{\circ}C$.

⁶⁷ (IPC, 1998)

Con ese dato y dado que se requiere que las pistas soporten 4 amperios, se determina la sección transversal como se muestra en la figura 3.26.

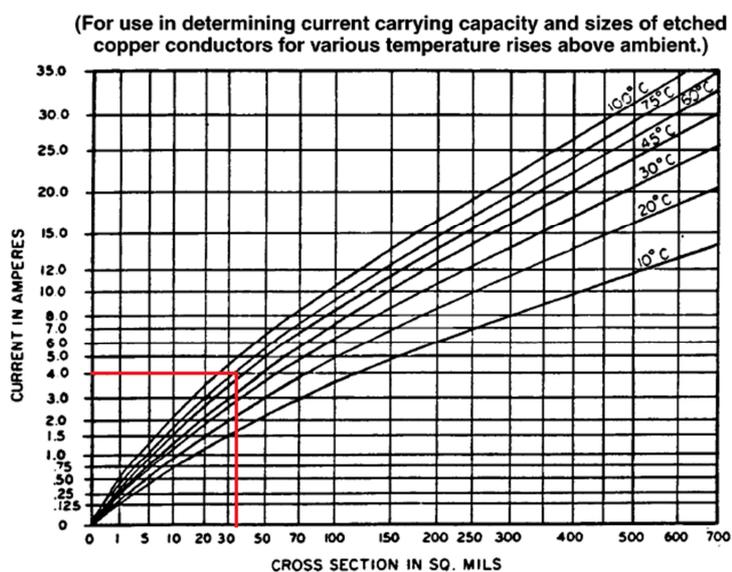


Figura 3.26 Sección Transversal de la pista vs. Corriente⁶⁸

Con ese dato y considerando que el sustrato FR4 tiene una densidad de 1oz/ft², se determina el ancho de la pista, como se aprecia en la figura 3.27.

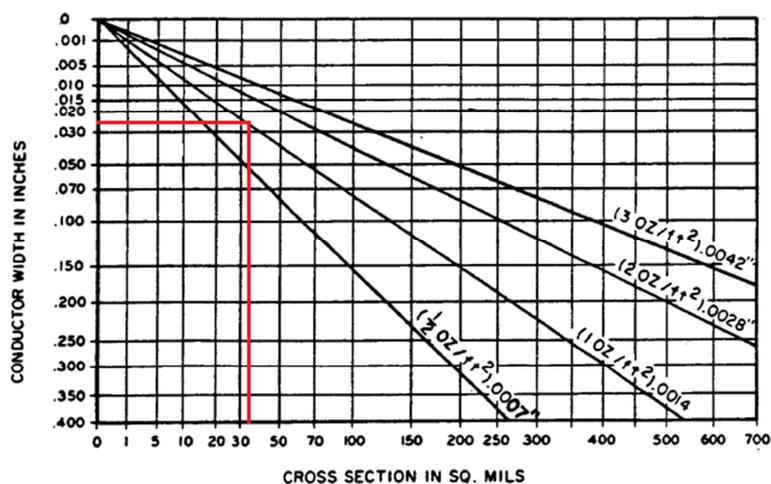


Figura 3.27 Sección transversal vs Ancho de pista⁶⁹

⁶⁸ (IPC, 1998)

Por lo tanto se obtiene que el ancho de pista debe ser de 0.025 inches o lo que es lo mismo 25th.

El diseño de la placa de circuito impreso para la fuente de poder, mediante el complemento ARES del software PROTEUS, se lo puede apreciar en el Anexo 14.

3.3. SELECCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

3.3.1. MEDICIÓN DE LA POSICIÓN DEL ACTUADOR

Para realizar la medición de posición del seguidor se tienen que analizar los tipos de sensores que se pueden emplear para medir un desplazamiento lineal, los cuales fueron mencionados en el literal 2.4.2. En la tabla 3.10 se mencionan las características principales de estos.

Tabla 3.10

Características de los sensores de medición de desplazamiento

Sensor	Tipo	Material sensado	Rango de distancias	Costo	Facilidad de montaje
Potenciómetro resistivo	Mecánico	Cualquiera	Medianas - Largas	Bajo	Complicado
Inductivo	Electrónico	Metales	Cortas	Medio	Sencillo
Capacitivo	Electrónico	Cualquiera	Cortas	Medio	Sencillo
Óptico	Electrónico	Cualquiera	Medianas – Largas	Alto	Sencillo
Ultrasónico	Electrónico	Cualquiera	Medianas – Largas	Medio	Sencillo

De acuerdo a la tabla comparativa (3.10), se puede observar que tanto los sensores de tipo óptico y ultrasónico son convenientes debido a su facilidad de montaje, y a que los rangos de medición son medianos y largos, sin embargo como se puede apreciar, los costos varían entre uno y otro, por esta razón es necesario analizar las ventajas a nivel de funcionamiento entre ambos.

Debido a que dentro de la programación realizada en MATLAB para el funcionamiento de la leva electrónica, es importante la optimización de recursos

⁶⁹ (IPC, 1998)

computacionales y de hardware, el sensor ultrasónico no sería la opción más apropiada debido a que se requerirían líneas de código que permitan monitorear los pines de disparo y de recepción del sensor, además que permitan calcular la distancia en función del tiempo del pulso emitido por el sensor. Este tiempo se vería afectado por todas las acciones que debe ejecutar el programa global en MATLAB, lo cual afectaría la precisión del sensor, haciendo que no sea eficaz para esta aplicación en particular.

Por otro lado un sensor óptico generalmente tiene salidas analógicas de corriente o voltaje, por lo que resultan sencillas de registrar, gracias a los conversores analógicos digitales que disponen los micro controladores AVR utilizados en placas ARDUINO, esto simplificaría enormemente la programación necesaria para registrar en un instante determinado la posición del actuador del módulo de leva electrónica, evitando que este proceso interfiera con otras partes de ejecución del programa de MATLAB. Por esta razón el sensor seleccionado será de tipo óptico.

El sensor óptico que se va a utilizar es el SHARP GP2Y0A41SK0F, el cual está compuesto por un PSD (detector sensible a la posición), un diodo emisor infrarrojo y un circuito de procesamiento de señal, para que a la salida se disponga de un voltaje bastante estable. Este sensor no se es sensible a variaciones térmicas o luminosas del medio ambiente en el cual se desempeña. A continuación se puede apreciar el sensor seleccionado en la figura 3.28, y las características del mismo se pueden apreciar en la tabla 3.11.



Figura 3.28 Sensor SHARP GP2Y0A41SK0F⁷⁰

⁷⁰ (SHARP, 2012)

Tabla 3.11**Características del sensor ultrasónico HC-SR04**

Voltaje de trabajo	5V
Corriente	22mA
Voltaje de salida	0 – 3.05V (No lineal)
Rango Máximo	30cm
Rango Mínimo	4cm
Ciclo de medición	16.5ms
Dimensiones	29.5x13x13.5 mm

3.4. DISEÑO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL

3.4.1. SELECCIÓN DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN

Se selecciona la placa Arduino MEGA 2560 como tarjeta de adquisición de datos, por varias razones:

- Simplifica el trabajo con el microcontrolador.
- Su bajo costo, esta placa es más accesible comparada con otras plataformas de microcontroladores y con otras tarjetas de adquisición de datos.
- Posee una multi-plataforma, es decir que funciona en sistemas operativos como Windows, Macintosh y Linux.
- Su entorno de programación es sencillo y es flexible para los usuarios avanzados.
- Tiene la característica de tener código abierto por lo que su distribución es de licencia libre y puede ser adaptado por programadores expertos.
- Su hardware también es ampliable. Está basado en el microcontrolador ATMEGA2560 (ver sección 2.6.2).

Las características de la placa Arduino MEGA 2560 se ven en la tabla 3.12

Tabla 3.12

Características de Arduino MEGA 2560⁷¹

Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Pines Digitales	54 (15 proporcionan PWM)
Pines de entrada analógica	16
Corriente continua para entradas y salidas digitales	40mA
Corriente para el pin de 3.3V	50mA
Memoria Flash	256KB de los cuales 8KB son para gestor de arranque
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Velocidad de reloj	16 MHz

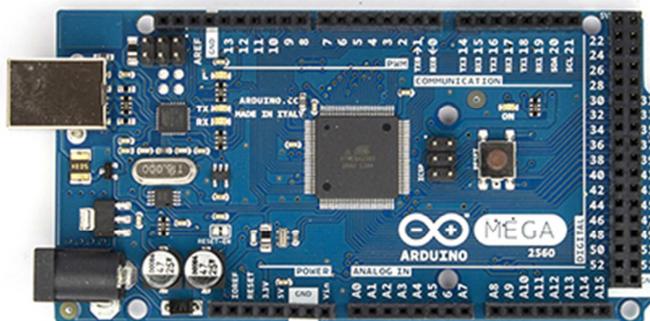


Figura 3.29 Placa Arduino MEGA 2560

3.4.2. SISTEMA DE CONTROL DEL MECANISMO

El motor Dynamixel MX-64T posee internamente un controlador PID, como se muestra en la figura 3.30.

⁷¹ (Arduino, 2013)

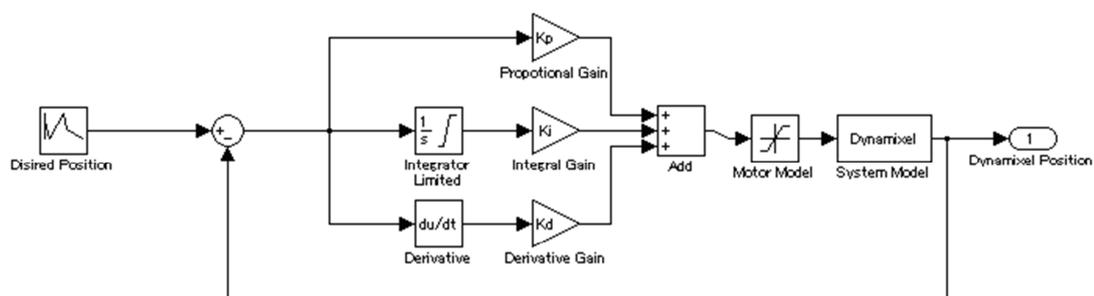


Figura 3.30 Diagrama de bloques del controlador PID del motor Dynamixel MX-64T⁷²

En donde las ganancias K_p , K_i y K_d vienen dadas de acuerdo a las siguientes ecuaciones.

$$K_p = \frac{\text{Ganancia}}{8}$$

$$K_i = \frac{\text{Ganancia} \cdot 1000}{2048} \quad \text{Ecuaciones 3.58}$$

$$K_d = \frac{\text{Ganancia} \cdot 4}{1000}$$

Y la ganancia depende de la pendiente, como se muestra en la tabla 3.13

Tabla 3.13

Relación entre pendiente y ganancia

Pendiente	Ganancia
8	128
16	64
32	32
64	16
128	8

⁷² (ROBOTIS, 2010)

Es decir que mientras más cercanos sean los puntos más grande será la ganancia y viceversa.

POSICIÓN

En cuanto tiene que ver a la posición, se pueden dar valores de 0 a 4095 (0xFFF), es decir que se tiene una precisión de 0.088 grados.

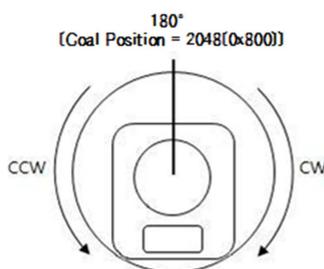


Figura 3.31 Posición del Motor

VELOCIDAD

En cuanto a la velocidad, se pueden dar valores de 0 a 1023 (0xFFF), con una precisión de 0.114 rpm, es decir que se puede alcanzar una velocidad máxima de aproximadamente 117 rpm.

3.4.3. MODELAMIENTO DEL SENSOR DE POSICIÓN

Se realiza un modelamiento debido a que el sensor SHARP GP2Y0A41SK0F no entrega una salida lineal por lo tanto se requiere una curva de calibración del mismo.

Para esto se tiene que enviar una rampa a baja velocidad en las posiciones de la cremallera en todo su rango (de 0 a 150mm) que están dados por la señal de PWM que envía a matlab (de 0 a 168), este procedimiento se realiza con

ayuda de un programa elaborado en MATLAB como se muestra en el Anexo 15, obteniéndose una curva como se muestra en la figura 3.32.

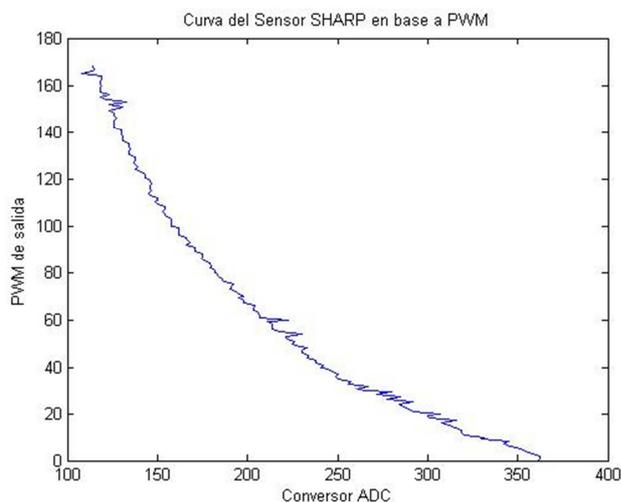


Figura 3.32 Curva del Sensor SHARP en base a PWM

Una vez que se han obtenido los datos, con la ayuda de Microsoft Excel primero se obtiene la posición de salida multiplicando el factor (PWM de salida*150/168) obteniéndose la distancia en mm y se obtiene la curva, a la cual se le realiza una regresión mediante una curva de tendencia polinomial de sexto grado como se muestra en la figura 3.33.

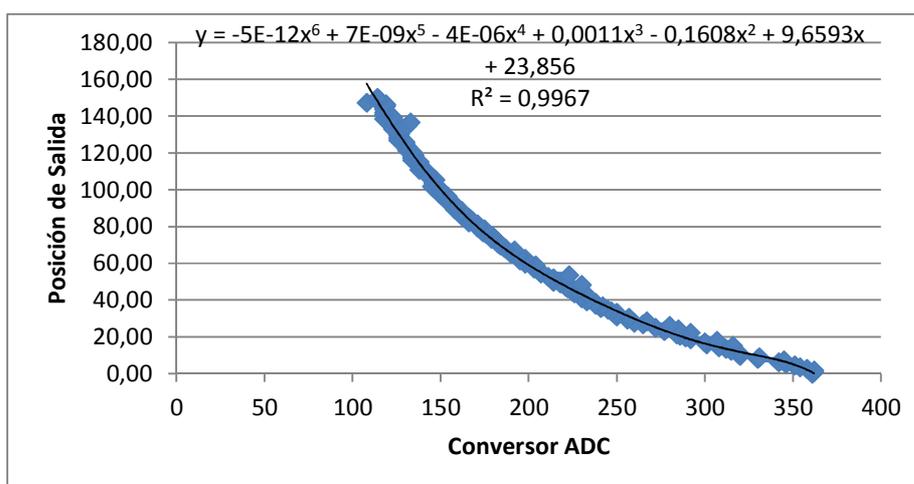


Figura 3.33 Curva del Sensor SHARP en base a Distancia

La curva posee una correlación de 0.9967 por lo que es adecuada para realizar la linealización y esta ecuación se debe colocar en la lectura analógica que realiza el Arduino a través de MATLAB. La linealización mediante la ecuación mostrada se la puede observar en la figura 3.34.

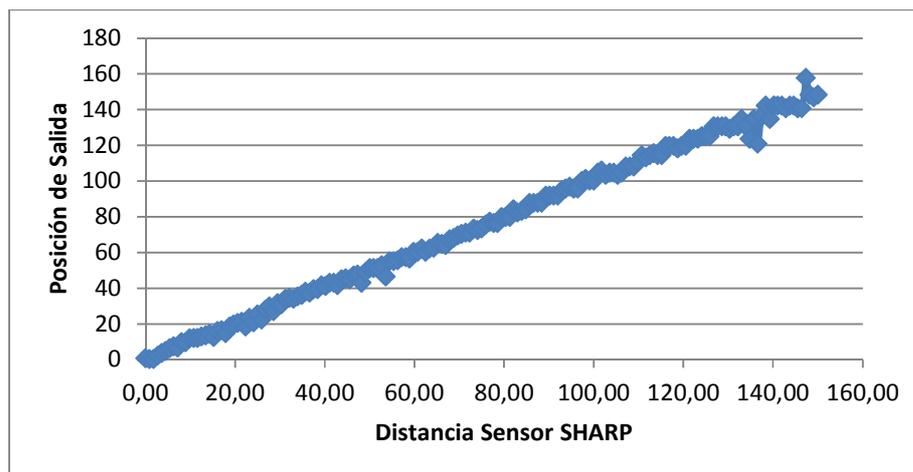


Figura 3.34 Linealización del Sensor SHARP

3.5. DISEÑO DEL CONTROL Y HMI

3.5.1. PANTALLA PRINCIPAL

Para las interfaces humano – máquina (HMI), se utilizó el entorno de programación gráfica GUI de MATLAB, cuyo modo de programación es bastante parecido al de un .m normal, pero sin embargo se deben tomar ciertas consideraciones, como el manejo de strings, pantallas, variables globales, entre otras cosas.

Para que la interfaz sea lo más amigable posible con el usuario, esta dispone de varias pantallas entre las que se encuentran la de presentación, principal, ingreso de intervalos, ayuda y visualización del comportamiento del mecanismo en tiempo real. Cada una de estas pantallas está diseñada de tal

forma que el usuario al leer el manual del mecanismo, comprenda en forma sencilla su modo de trabajar.

La pantalla principal se compone de varios botones cada uno de los cuales cumple una función específica, programada en un CALLBACK, es decir cuando se presionan dichos botones. A continuación se puede observar el diseño de la pantalla principal que el usuario verá cuando se encuentre manipulando el mecanismo:

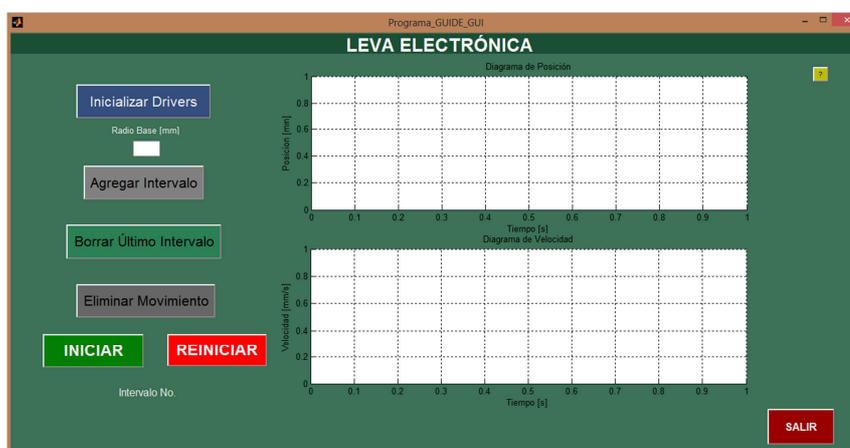


Figura 3.35 Pantalla Principal de la HMI

El botón con la etiqueta INICIALIZAR DRIVERS permite que todas las variables y controladores ARDUINO y OPEN CM 9.04b inicien la conexión con MATLAB y entre sí de forma adecuada. Una vez que todos los parámetros del sistema se hayan inicializado correctamente, el usuario observará una ventana de aviso, la cual le indicará que puede comenzar a trabajar en el movimiento.

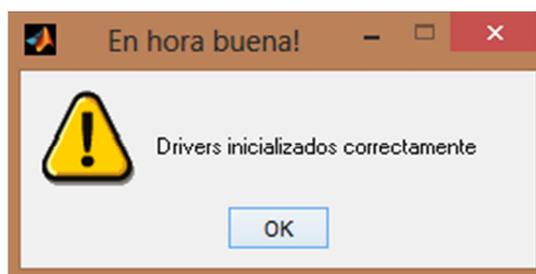


Figura 3.36 Indicador de que el sistema está listo para usar

Una vez que el sistema esté listo para su uso, el siguiente paso es ingresar intervalos en los que se seleccionará el tipo de movimiento, y el sentido, es decir de subida, bajada o reposo si fuese el caso. Para esto se dispone de un botón con la etiqueta AGREGAR INTERVALO, el cual al ser presionado abrirá una nueva ventana en donde se ingresarán todos los parámetros necesarios para el presente intervalo.

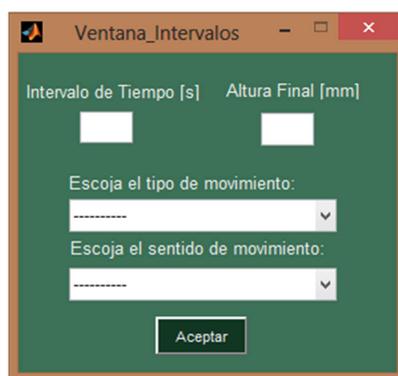


Figura 3.37 Ventana para agregar intervalos

Después de que se ingresen todos los parámetros requeridos para un intervalo, y se presione el botón ACEPTAR, entonces el programa regresará a la pantalla principal y se podrá observar en los ejes de la misma el comportamiento que tendrían todos los intervalos ingresados.

En caso de que el usuario haya cometido un error en algún intervalo o que no se encuentre conforme con el desempeño de velocidad y aceleración de algún intervalo se tienen las opciones de BORRAR ÚLTIMO INTERVALO, en donde se borrará el último intervalo consecutivamente, es decir se puede borrar n intervalos, pero uno a la vez. Por otro lado se tiene el botón con la etiqueta ELIMINAR MOVIMIENTO, el cual borrará todo el movimiento y se podrá ingresar otro.

En todo momento el indicador INTERVALO No. Mostrará el número de intervalos que componen el presente movimiento, sin importar si el usuario ha borrado algunos o cómo haya sido el movimiento previamente.

Una vez que se ha comprobado que el movimiento ingresado es correcto, entonces se presiona el botón INICIAR, el cual permitirá que el mecanismo comience a realizar el movimiento deseado.

En todo momento si el usuario tiene alguna duda sobre el modo de ejecución del programa, puede presionar el botón con la etiqueta "?", el cual abrirá una nueva ventana indicando la correcta forma de manejar el programa.

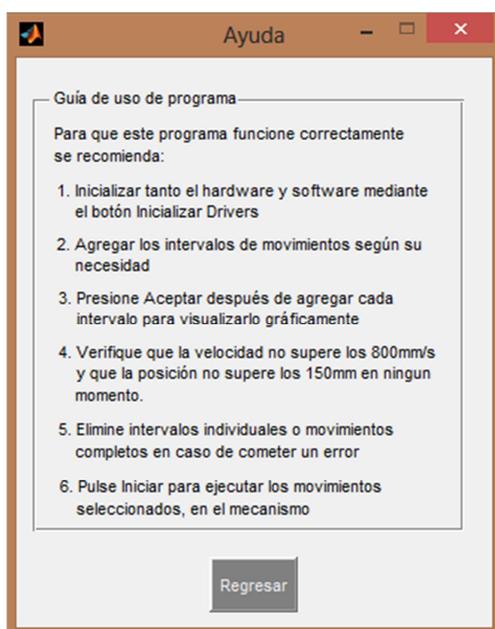


Figura 3.38 Ventana de Ayuda

La interfaz dispone además de cuadros indicativos en caso de que el usuario cometa un error o quiera realizar una acción. Esto facilita enormemente el manejo de la interfaz y hace que difícilmente se cometan errores en su ejecución, ya que los movimientos ingresados por el usuario deben tener ser lógicos desde un punto de vista mecánico.

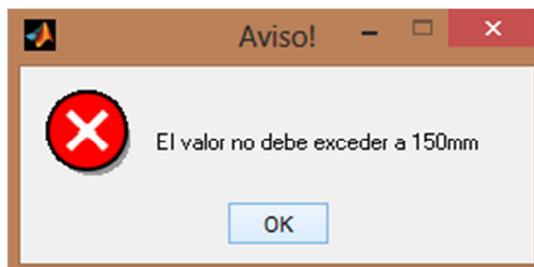


Figura 3.39 Ejemplo de guías durante la ejecución de la interfaz

3.5.2. ADQUISICIÓN DE SEÑALES Y CONTROL DE POSICIÓN

El sistema de leva electrónica planteado en el presente documento solamente tendrá como retroalimentación una señal de voltaje variante en el tiempo, que resulta de la salida de un sensor de proximidad SHARP GP2Y0A41SK0F, el cual indicará la distancia desde un punto fijo hacia la placa circular de DURALÓN que se encuentra colocada mediante un perno en el extremo superior de la cremallera.

Esta señal solamente servirá como comprobación de que el movimiento ejecutado por la cremallera es el ingresado por el usuario mediante la interfaz, más no como retroalimentación en el sistema de control, ya que debido a las avanzadas características del motor DYNAMIXEL MX-64T, el control se lo realiza internamente en el mismo vía software, aprovechando los sensores incorporados en el mismo.

Para la adquisición de la señal analógica de posición se empleó el conversor analógico – digital de la placa ARDUINO, el cual tiene una resolución de 10 bits.

Una vez que en la pantalla principal el usuario ha verificado que el movimiento a ejecutar sea el correcto, y haya presionado el botón INICIAR, tal como se recomienda en el manual de usuario del módulo, entonces se abrirá otra ventana en la cual se podrá observar el comportamiento del mecanismo y el usuario será capaz de comparar el movimiento que seleccionó, con el

movimiento que se está ejecutando en un instante dado. Es decir los datos solamente se adquirirán en el software MATLAB una vez que se ha presionado INICIAR, de esta forma se asegurará que se aprovechen de mejor manera los recursos de procesamiento.

3.5.3. VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS

La interfaz cuenta con una pantalla la cual se despliega una vez que el usuario ha presionado el botón INICIAR de la pantalla principal de control. Esta pantalla tiene como objetivo mostrar la evolución de la posición de la placa de duralón ubicada en el extremo de la cremallera, y por lo tanto de la cremallera, gracias a un registro de valores de voltaje provenientes del sensor SHARP GP2Y0A41SK0F. Esta pantalla permite al usuario visualizar en tiempo real la forma en que se encuentra moviéndose la cremallera en todo momento, y además cuenta con un botón de detención del mecanismo que a su vez funciona como paro de emergencia ya que en caso de ser presionado, detiene el mecanismo en la posición en que se encuentre.

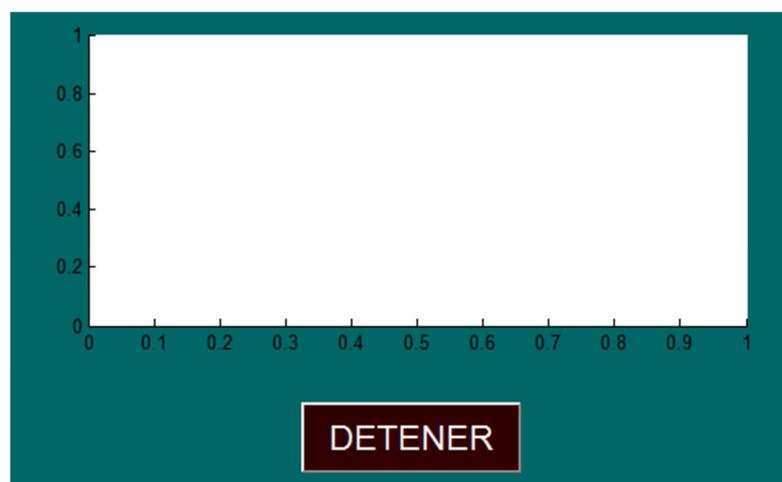


Figura 3.40 Pantalla de visualización del comportamiento del mecanismo

La programación de la interfaz está enfocada a visualizar continuamente el desempeño del mecanismo, y al tratarse de un módulo que ejecuta movimientos continuos y repetitivos, el usuario, gracias la programación de la

pantalla de visualización mostrada anteriormente, está en capacidad de comparar los ciclos de repetición del movimiento ingresado entre sí.

Evidentemente la retroalimentación del módulo se trata de un sensor que es empleado en aplicaciones robóticas de desempeño académico, por lo que la precisión del sensor no es muy alta, al igual que el rango de voltaje de salida es muy pequeño, lo cual dificulta obtener medidas precisas en movimientos veloces de la cremallera. Sin embargo, el modelamiento matemático del sensor es fundamental para aprovechar de forma óptima sus características electrónicas, y poder visualizar en la pantalla mostrada anteriormente el movimiento real que se encuentra ejecutando en un momento determinado el mecanismo.

CAPÍTULO 4

4 IMPLEMENTACIÓN

4.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MÓDULO

Una vez que los elementos mecánicos han sido dimensionados y manufacturados, se procedió a realizar el ensamble del mecanismo detallado en el presente documento.

Es fundamental que el eje del motor se encuentre totalmente paralelo y alineado con los ejes del mecanismo respectivamente, y a su vez que los ejes de giro de los mismos sean perpendiculares a las caras de los engranes mediante los cuales se transmitirá el movimiento en el mecanismo.

Por esta razón se procedió en primer lugar a ensamblar los ejes con sus respectivos engranes, acoplados mediante chaveteros y anillos de sujeción, así como con sus respectivos rodamientos, de tal forma que la alineación de los engranes sea adecuada y se faciliten los siguientes ensambles.

En la figura 4.1 se puede observar uno de los ejes ensamblado completamente.



Figura 4.1 Eje 2 ensamblado completamente

A continuación se procedió a fijar el motor de tal forma que su eje se encuentre a la misma altura que el centro de los agujeros de los soportes de los rodamientos de los ejes y a su vez perpendicular a las caras de dichos soportes.

Posteriormente se procedió a colocar el eje acoplado al motor, y se lo ajustó mediante una pieza dimensionada especialmente para dicho propósito.



Figura 4.2 Pieza diseñada para acoplar el eje 1 al eje del motor

Posteriormente se procedió a colocar el segundo eje sobre los soportes para los rodamientos, de tal forma que la guía de la cremallera se encuentre a la distancia adecuada del eje que transmitirá su movimiento a la misma.



Figura 4.3 Ensamble del segundo eje

Posteriormente se insertó la cremallera en la ranura y se calibró el cero del motor, de tal forma que la programación del mismo resulte más sencilla. Posteriormente se ajustaron los soportes de los rodamientos.

A continuación se colocó la pieza cilíndrica de duralón en la parte superior de la cremallera, de tal forma que se puedan colocar pequeñas pesas sobre esta una vez que el mecanismo haya sido instalado en el laboratorio de Mecanismos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Finalmente se incorporó al módulo el sensor SHARP GP2Y0A41SK0F, de tal forma que la distancia entre el emisor y la parte inferior de la placa circular ubicada en el extremo de la cremallera, sea de al menos 4cm, para que se pueda utilizar el mayor rango de voltaje de salida posible.



Figura 4.4 Placa cilíndrica de duralón y sensor ensamblado

4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

Una vez que toda la parte mecánica del módulo ha sido ensamblada, se procede a verificar el funcionamiento de los circuitos electrónicos tanto de fuerza como de control. Evidentemente en un inicio, para efectuar un diseño

electrónico adecuado, es necesario verificar el funcionamiento de los circuitos mencionados anteriormente mediante el uso de un protoboard. Una vez que se verificó que tanto la fuente de voltaje como los filtros de señales se adaptan a las necesidades del módulo, entonces se procede al diseño de las placas de circuito impreso PCBs.

En primer lugar fue necesario verificar el espacio disponible en la placa base de duralón de 250x250mm, de tal forma que tanto la parte electrónica como mecánica vayan montadas conjuntamente sobre dicha placa base, y así las personas que observen al módulo de leva electrónica entiendan la sinergia de las áreas mecánica y electrónica que involucra la Ingeniería Mecatrónica.

Una vez que se midió el área disponible en la placa base, se procedió a diseñar y construir los circuitos impresos con dimensiones que se ajusten a los requerimientos tanto de funcionalidad como de espacio.

En la figura 4.5 se pueden apreciar los circuitos impresos diseñados correspondientes a la fuente de voltaje y al filtro de señales.

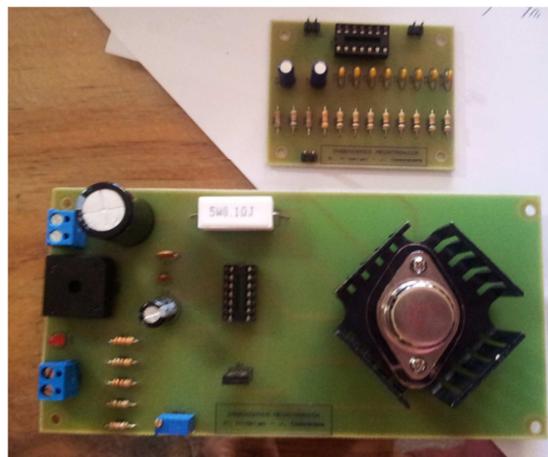


Figura 4.5 Circuitos impresos de la fuente de voltaje y filtro de señales

Posteriormente se procedió a diseñar una caja de acrílico transparente, de tal forma que sea modular, y permita contener en su interior a todos los elementos electrónicos del módulo. Esta caja se conformará de cuatro partes,

una fija, un piso intermedio en donde se ubicarán la placa ARDUINO, el controlador OPENCM 9.04b, y el filtro de señales, una tapa frontal, la cual irá empernada a la placa base de duralón del módulo, y una tapa. De esta forma se asegura a facilidad de manipular los elementos electrónicos dentro de esta caja.

En la figura4.6 se puede observar la forma de la caja mencionada anteriormente.

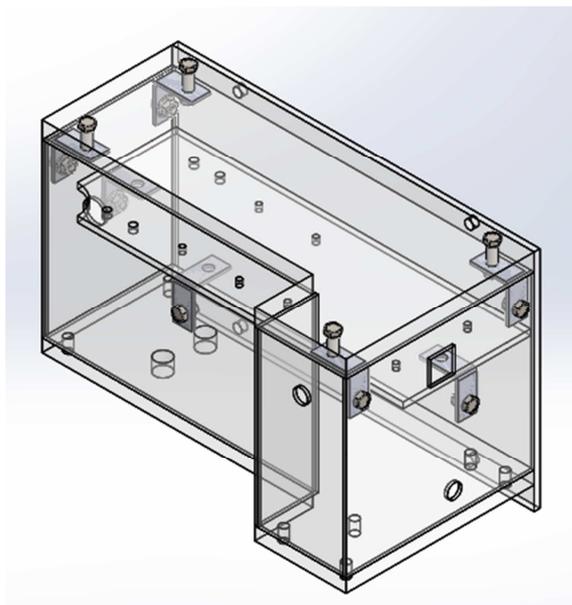


Figura 4.6 Caja de acrílico para elementos electrónicos

Para proceder a realizar el ensamble de la caja mostrada anteriormente, se procedió a cortar mediante laser las nueve placas que conforman la misma, y posteriormente se procedió a realizar el primer sub ensamble, mediante pegamento especial para acrílico, con ayuda de personal especializado ya que la venta de este pegamento es restringida por posibles usos en temas ilícitos. Este sub ensamble no es desmontable y se puede apreciar en la figura 4.7.

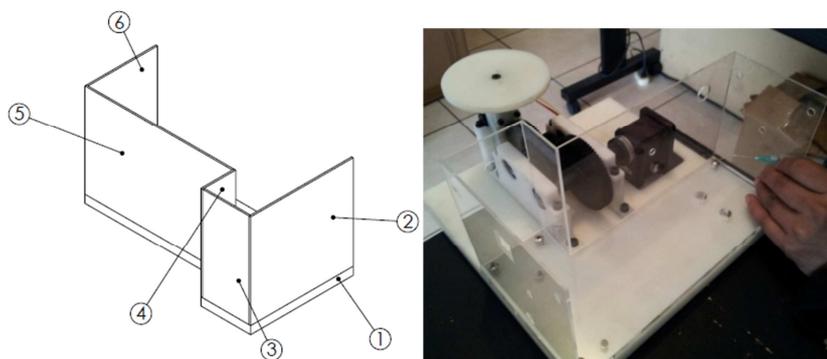


Figura 4.7 Primer sub ensamble de la caja de acrílico

Posteriormente se procedió a fijar las placas en el piso intermedio, de tal forma que se facilite el posterior ensamble.

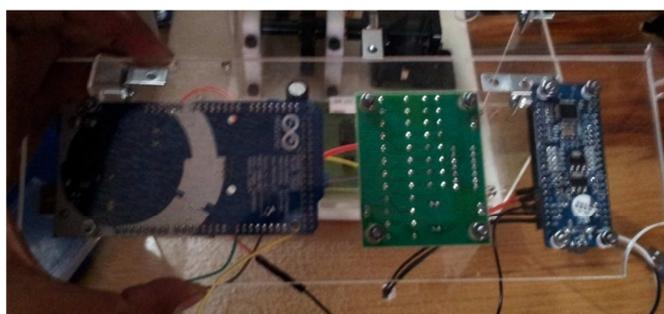


Figura 4.8 Sujeción de PCBs al piso intermedio

A continuación se ensamblaron los componentes electrónicos situados en el nivel inferior de la caja de acrílico, es decir el transformador y la fuente de voltaje DC.

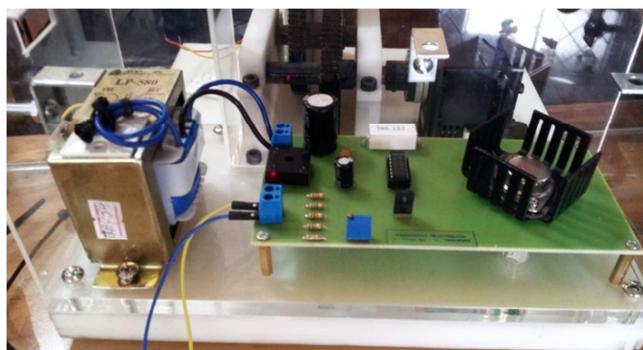


Figura 4.9 Ensamble de elementos electrónicos en el nivel inferior

Finalmente se colocó el piso intermedio previamente ensamblado, la tapa superior y la tapa frontal. El ensamble de la caja de acrílico conteniendo en su interior todos los elementos electrónicos del módulo se puede observar en la figura 4.10.



Figura 4.10 Ensamble de la caja de acrílico y elementos electrónicos

4.3. PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

El funcionamiento del módulo de leva electrónica depende de la correcta transmisión de datos entre MATLAB y ARDUINO. La placa ARDUINO MEGA 2560 sirve como un medio de transmisión de datos entre MATLAB y OPENCM 9.04b, pero debido a las características de los micro controladores de las placas ARDUINO y OPENCM 9.04b, se tomaron ciertas consideraciones al momento de realizar la programación del sistema de control del módulo.

La primera consideración que se tomó en cuenta fue la resolución que tienen los conversores análogo – digital del controlador OPENCM 9.04b, la cual es de 12 bits, pero además admiten un voltaje máximo de 3.3V, por lo que el rango de variación de voltaje eficaz de las salidas PWM utilizadas en la placa ARDUINO las cuales son de 8 bits, deberá limitarse de 0 a 168.

La segunda consideración que se tomó fueron los rangos de posición y velocidad en los que debe trabajar el motor DYNAMIXEL MX-64T de tal forma

que la cremallera no supere los 150mm de desplazamiento lineal máximo ni los 800mm/s de velocidad lineal máxima. Debido a que mediante la programación del controlador OPENCN 9.04b se puede lograr una precisión de posición de 0.088° y en velocidad 0.114rpm, los rangos máximos que se pueden programar en el software de ROBOTIS, el cual se encarga de programar el controlador del motor, son de 0 a 997 para posición y de 0 a 682 en velocidad.

La tercera consideración que se tomó en cuenta fue la relación de transmisión de los elementos mecánicos, sabiendo que la relación de transmisión del eje 1 al eje 2 es de 2.8 y que el radio base del engrane que se encuentra en contacto con la cremallera es de 35mm.

Una vez que las ecuaciones para que los datos transmitidos desde MATLAB hacia el sistema se transformen en un movimiento adecuado del extremo superior de la cremallera estaban listas, se procedió a realizar la programación del sistema de control en el software MATLAB. Dentro de esta programación, cuando el usuario ingresa los datos de un intervalo de movimiento, automáticamente inicializa las variables internas del programa de tal forma que el movimiento requerido se almacena en un vector y paralelamente se almacena un vector de tiempos, de tal forma que cuando el usuario presione el botón INICIAR, mediante el uso del RTC de MATLAB, se procede a leer los vectores previamente almacenados, sincronizándolos con el tiempo transcurrido en un momento dado. De esta forma los datos necesarios para que el sistema se comporte como el usuario esperaba son enviados hacia la placa ARDUINO, pero primero es necesario realizar un mapeo de dichos datos de tal forma que su rango sea de 0 a 168 para las salidas PWM de ARDUINO. Las siguientes ecuaciones muestran la forma de realizar dicho mapeo:

$$SALIDA_{PWM_{posición}} = \frac{Posición_{MATLAB}}{150} * 168 \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$SALIDA_{PWM_{velocidad}} = \frac{Velocidad_{MATLAB}}{800} * 168 \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Una vez que las señales de salida PWM de ARDUINO pasan por el filtro de señales y llegan a las entradas analógicas del controlador OPENCM 9.04b, son mapeadas dependiendo de la resolución de las entradas analógicas del conversor. A continuación se puede observar dicho mapeo:

$$\mathbf{Posición\ dentro\ de\ OPENCM9.04b = \frac{Lectura\ ADC}{4096} * 150} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

$$\mathbf{Velocidad\ dentro\ de\ OPENCM9.04b = \frac{Lectura\ ADC}{4096} * 800} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Finalmente para que el mecanismo ejecute el movimiento requerido por el usuario, internamente en el programa del controlador OPENCM 9.04b se realiza un mapeo final de tal forma que se envíen los valores exactos de posición y velocidad requeridos al motor en un instante dado. Estos mapeos se muestran a en las ecuaciones 4.5 y 4.6.

$$\mathbf{Valor\ de\ posición\ del\ motor = \frac{Posición\ OPENCM9.04b}{150} * 997} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

$$\mathbf{Valor\ de\ velocidad\ del\ motor = \frac{Velocidad\ OPENCM9.04b}{800} * 682} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

La programación que se implementó, se puede apreciar en el anexo 18.

CAPÍTULO 5

5 PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS

Una vez que todos los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos fueron correctamente diseñados, seleccionados y ensamblados, se procede a verificar el funcionamiento del módulo de leva electrónica. Para esto se siguió el siguiente protocolo de pruebas:

- Primeramente se verifica que los programas correctos hayan sido cargados a los microcontroladores tanto de la placa ARDUINO como de la placa OPENCM 9.04b.
- Verificación del funcionamiento del transformador tanto en la configuración 120VAC/12VAC como en 120VAC/24VAC.
- Verificación de que la resistencia eléctrica entre los puntos medio y el extremo conectado a R2 del potenciómetro en el PCB de la fuente de voltaje, sea de 0Ω .
- Posteriormente se mide el voltaje en la salida de la fuente y se regula el potenciómetro de precisión de tal forma que este sea de 12V y se apaga la fuente.
- A continuación se realiza la conexión entre el PCB de la fuente de voltaje con el controlador OPENCM 9.04b.
- Se procede a realizar la conexión entre el sensor y la placa ARDUINO.
- Se procede a realizar la conexión entre la placa ARDUINO, el filtro de señales, y la placa OPENCM 9.04b.
- Se procede a utilizar la interfaz programada en MATLAB para inicializar tanto la parte de hardware y software del módulo, y se verifica que todos

los parámetros referentes a la programación se encuentren funcionando adecuadamente.

- Se ejecuta un movimiento cualquiera en el mecanismo, y se verifica que tanto la posición como la velocidad del extremo de la cremallera tengan relación con el movimiento deseado.
- Se procede a modelar el sensor matemáticamente, ingresando al sistema una señal de posición en forma de rampa, y registrando las lecturas del sensor.
- Se verifica que en la pantalla que se despliega una vez que el usuario ha presionado el botón INICIAR en la interfaz, muestre el comportamiento que se encuentra ejecutando en un momento dado el mecanismo. De esta forma se comprueba que el sensor haya sido modelado matemáticamente de forma correcta.
- Se verifica que el botón DETENER funcione correctamente, garantizando que se lo puede utilizar como un paro de emergencia.
- Se procede a ejecutar movimientos correspondientes a posibles levas reales y se verifica que el desempeño tanto mecánico como eléctrico del módulo sea adecuado, es decir que el mecanismo se mueva con facilidad, que no existan caídas de voltaje, que los componentes que disipan mayor calor en los circuitos, no se encuentren demasiado calientes, entre otros factores. De igual forma se verifica que el mecanismo se encuentre ejecutando efectivamente el movimiento para el que fue programado.

5.2. PRUEBAS Y RESULTADOS DE COMPONENTES MECÁNICOS

Después de que todos los componentes mecánicos fueron ensamblados adecuadamente, cuidando la alineación y transmisión de potencia, y estabilidad del módulo, se procedió a verificar que el comportamiento mecánico del mismo

fuera el correcto. Para esto se procedió en primer lugar a realizar un ensayo no destructivo visual de los componentes mecánicos, el cual se detalla en la tabla 5.1.

Tabla 5.1

Resultados del ensayo visual sobre los componentes mecánicos

Inspección	Resultado
Dientes de engranes y cremallera	Los dientes tanto de engranes como de la cremallera no presentaron imperfecciones, por lo que se descartó una falla temprana por desgaste.
Ejes	Los ejes no presentaron ningún agrietamiento ni reducción de volumen, lo que permitió garantizar la conservación del factor de seguridad de diseño.
Rodamientos	La parte móvil no presentó ningún signo de oposición al movimiento, y no se observó defecto alguno en los rodamientos.
Soportes de rodamientos	No presentaron ningún desperfecto, y se verificó que su tanto acople a los rodamientos, como a los elementos de sujeción (machuelado), fueran correctos.
Cremallera y engranes	No se evidenciaron reducciones de volumen, ni agrietamientos en los engranes y cremallera.
Tornillos autorroscantes, pernos y demás elementos de sujeción	Estos elementos no presentaron ningún tipo de falla, y se comprobó que se encuentren adecuadamente sujetos, para garantizar el funcionamiento del sistema.

CONTINÚA →

Acople entre eje del motor y eje principal	Se comprobó que el acople no presente ningún tipo de señal de falla y que ambos ejes roten con total facilidad, sin deslizarse el uno respecto al otro.
Base, placa en el extremo de la cremallera y demás elementos en DURALÓN	Se verificó que no presentaban ningún tipo de fallas, y que no intervenían en lo absoluto en el movimiento de los componentes mecánicos.

A continuación se analizó la facilidad con la que la cremallera se desplazaba por su guía vertical. De esta forma se tenía certeza de que la cremallera no se encontraba doblada por la naturaleza propia de los procesos de manufactura.

Posteriormente se verificó que la pintura anticorrosiva con la que fueron pintados los ejes y engranes no dificultara el movimiento de los mismos ni la transmisión de potencia del mecanismo.

Mediante un programa básico realizado en el controlador OPENCM 9.04b, en el cual se aplica una entrada tipo rampa al mecanismo, se procedió a sincronizar los movimientos del mecanismo con la programación del controlador, de tal forma que las distancias recorridas concuerden con lo esperado y con la relación de transmisión del tren de engranes.

A continuación se verificó que los movimientos a velocidades relativamente altas de la cremallera no afectaran la estabilidad de la estructura del módulo, o que las vibraciones provocadas afectaran el desempeño de sus movimientos.

A pesar de que los componentes mecánicos fueron dimensionados para transmitir un torque de 7.3Nm a una velocidad angular constante de 78rpm en el eje 1, el mecanismo trabajará con 12V, lo que significa que el torque máximo entregado por el motor será de 6Nm, por lo tanto la carga máxima que se puede colocar en el extremo de la cremallera será de aproximadamente 6kg. Fue

necesario verificar si esto se cumplía en la realidad, obteniendo los resultados descritos en la tabla 5.2.

Tabla 5.2

Error porcentual de torque y carga máxima

	Máximo teórico	Máximo experimental	Error porcentual
Carga En el extremo cremallera	6.24kg	4.2kg	32.70%
Torque entregado por el motor	6Nm	4.04Nm	32.70%

Como se puede observar en la tabla 5.2, el valor de torque máximo entregado por el motor DYNAMIXEL MX-64T, en la realidad, es menor que su valor teórico, deberá considerarse la carga máxima en el extremo de la cremallera. La potencia mecánica resultante del producto del torque entregado por el motor y la velocidad angular del mismo (78rpm ó 8.17rad/s), tiene un valor de 33W.

5.3. PRUEBAS Y RESULTADOS DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

Una vez que se realizó la selección de los controladores y elementos electrónicos que se iban a emplear en el módulo, se procedió a verificar en primer lugar la compatibilidad de la placa ARDUINO con el software MATLAB, de tal forma que desde el entorno gráfico se puedan efectuar transmisiones seriales mediante las librerías ARDUINO existentes, encontrando que la comunicación entre ARDUINO y MATLAB es muy robusta y sencilla de realizar.

Se verificó que el funcionamiento del controlador OPENCM 9.04b sea el correcto. Verificando que todos sus pines digitales, analógicos, seriales, funcionen correctamente. Para esto fue necesario primeramente entender la forma de programar este controlador mediante la interfaz de programación de ROBOTIS.

Después de haber adquirido el motor DYNAMIXEL MX-64T fue necesario comprender su funcionamiento, debido a que este se comunica serialmente con el controlador OPENCM 9.04b, inicialmente existieron ciertos problemas debido a que la velocidad de comunicación serial no estaba sincronizada con la que viene por defecto en el motor. Esto se debió a que este tipo de motores a diferencia de los DYNAMIXEL más comunes cuya velocidad de transmisión es de 1Mbps, tiene una configuración inicial a 57600bps, por lo que se tuvo que solicitar un manual más detallado del motor para encontrar esta configuración. Posteriormente se verificó con un programa de prueba que los movimientos del motor cumplan con lo requerido después de haber fijado todos los parámetros de control del mismo.

En el caso del filtro de señales moduladas por ancho de pulso, se debían tomar varias consideraciones, entre las cuales se encuentran la velocidad de respuesta a la salida del mismo debido a que como en la sección de Diseño Electrónico del Módulo, el amplificador operacional LM324N tiene un tiempo de retardo, muy pequeño, pero sumado con los condensadores y las redes RC del filtro, puede influir en el correcto desempeño del mecanismo debido a las inercias propias de sus características mecánicas. La estabilidad del voltaje de salida debe ser estable por lo que se hicieron varias pruebas mediante entradas tipo RAMPA y ESCALÓN al sistema, de tal forma que se observe el desempeño del voltaje de salida del filtro. En la tabla 5.3 se puede observar los voltajes obtenidos a la salida del filtro pasa bajas en función del valor PWM enviado desde ARDUINO.

Tabla 5.3**Voltajes registrados a la salida del filtro**

Valor PWM	Voltaje ideal (V)	Voltaje a la salida del filtro (V)	Error porcentual (%)
2	0,04	0,02	49,09
5	0,10	0,11	-12,00
17	0,33	0,31	7,17
29	0,57	0,56	1,69
42	0,83	0,81	1,82
50	0,98	0,96	2,25
60	1,18	1,2	-1,82
68	1,34	1,35	-1,07
79	1,55	1,57	-1,17
84	1,65	1,69	-2,42
99	1,94	1,96	-0,79
105	2,06	2,03	1,58
112	2,20	2,19	0,45
125	2,46	2,49	-1,41
133	2,61	2,61	0,10
145	2,85	2,85	-0,06
154	3,03	3,02	0,17
160	3,14	3,12	0,73
165	3,24	3,26	-0,58
168	3,30	3,32	-0,61

Una vez que se verificaron los factores descritos anteriormente, se procedió a elaborar la placa de circuito impreso del filtro, repitiendo las mismas pruebas, y encontrando que el funcionamiento del filtro es el adecuado para el módulo.

A continuación se procedió a las pruebas de la etapa de potencia, verificando el estado del transformador que formaría parte de la fuente de voltaje DC, elaborada específicamente para el módulo, al igual que sus capacidades eléctricas, es decir si es que este es capaz de soportar 4A sin sufrir algún desperfecto, y si en su salida entrega 24VAC y 12VAC exactamente. En esta etapa se encontró un problema ya que en su salida el

transformador entrega aproximadamente 19VAC y 32VAC respectivamente y ya que en cualquier fuente de voltaje DC se requiere de un capacitor con una capacitancia relativamente alta para mantener el voltaje estable, esto producía que el voltaje se mantenga estable en aproximadamente 22V y 36V, por esta razón fue necesario encontrar elementos reguladores de voltaje capaces de resistir estas tensiones en sus entradas. En función del tipo de regulador de voltaje que debe utilizarse, se procede a diseñar la fuente de voltaje como se explicó en la sección de Dimensionamiento de la Etapa de Potencia.

Una vez que la fuente ha sido dimensionada, se procedió a analizar su funcionamiento en un protoboard, resultando en una fuente con una salida bastante estable y con componentes con potencias nominales altas, por lo que podían soportar sin ningún problema una corriente de 3 o 4A. De esta forma se procedió a elaborar la placa de circuito impreso de la fuente de voltaje, consiguiendo de igual forma un comportamiento bastante aceptable en el voltaje de salida de la placa.

Después de que la implementación tanto en la parte mecánica como en la electrónica estaba lista, se procedió a verificar que el comportamiento global del módulo sea el adecuado, prestando especial atención al desempeño mecánico del módulo, de tal forma que se compruebe que los componentes eléctricos y electrónicos se encuentran realizando su trabajo adecuadamente.

Para la verificación de los parámetros eléctricos que debía entregar la fuente de voltaje al sistema, se probó el desempeño del módulo en condiciones mecánicas máximas, es decir se aplicó un torque máximo, considerando carga sobre la cremallera, aceleración angular máximas, y se realizaron mediciones de voltaje y corriente entregadas por la fuente de voltaje DC. En la tabla 5.4.

Tabla 5.4**Parámetros obtenidos con el máximo desempeño mecánico**

Parámetro Eléctrico	Valor
Voltaje DC	12V
Corriente DC	2.9 ^a
Potencia eléctrica	34.8W

La tabla 5.5 muestra la diferencia entre los valores de potencia mecánica y eléctrica obtenidos.

Tabla 5.5**Diferencia entre potencia eléctrica y mecánica**

Potencia mecánica	Potencia eléctrica	Error porcentual
33W	34.8W	5.17%

Como se puede observar con los resultados obtenidos, la potencia eléctrica que entrega la fuente de voltaje diseñada abastece perfectamente al sistema mecánico, el cual no aprovecha al 100% la potencia entregada debido a las pérdidas propias del mismo, como lo son la fricción, inercias, etc.

5.4. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL

Habiendo realizado la prueba de cada uno de los componentes electrónicos por separado, el siguiente paso es la realización de las pruebas en conjunto del motor DYNAMIXEL MX-64T, el controlador OPENCM 9.04b, el filtro de señales moduladas por ancho de pulso, el Arduino y el sensor de posición SHARP, que componen la etapa de control.

Primeramente se probó la conexión del controlador OPENCM 9.04b con el motor DYNAMIXEL MX-64T, para ello se utilizó la interfaz de programación de ROBOTIS con el programa que se muestra en el Anexo 16. Y de esa manera se comprobó que se realizaban correctamente los movimientos del Motor y que la comunicación sea correcta.

Posterior a ello se conectaron dos salidas PWM del Arduino (Una de posición y otra de Velocidad) al filtro, y del filtro hacia dos entradas análogas del Controlador, y también la señal del Sensor SHARP hacia una entrada análoga del Arduino, se elaboró un programa de prueba en MATLAB (Ver Anexo 17) que permitiera comprobar que la conexión entre todas las partes sea la correcta.

El programa lo que hace es leer del usuario la posición y la velocidad deseadas, envía la señal al Arduino y mediante las conexiones correctas de todos los dispositivos se envía la señal al Motor DYNAMIXEL. Se probaron varias posiciones a varias velocidades y los resultados fueron los esperados.

En la parte de la conexión del sensor, se tenía que comprobar que se recibía una señal análoga al Arduino, que posteriormente debía ser calibrada para ser utilizada en la programación final. El programa consistía en el mismo del Anexo 17 salvo que se incrementó una entrada analógica en el Arduino que daba los valores del Sensor SHARP. Realizando las pruebas a varias posiciones se comprobó que al no ser un sensor lineal se requería un moldeamiento del mismo, como se describe en el literal 3.4.3. A continuación se muestran en las tablas 5.6 los resultados obtenidos tras realizar estas pruebas.

Tabla 5.6**Datos de posición registradas por el sensor**

Posición deseada (mm)	Posición sensada (mm)	Error porcentual (%)
50	48	4,00
50	46	8,00
50	49	2,00
50	47	6,00
50	47	6,00
50	40	20,00
50	49	2,00
100	103	-3,00
100	104	-4,00
100	105	-5,00
100	80	20,00
100	102	-2,00
100	100	0,00
100	103	-3,00
150	150	0,00
150	145	3,33
150	148	1,33
150	147	2,00
150	112	25,33
150	148	1,33
150	153	-2,00

Una vez que se probó toda la etapa de control, el módulo estaba listo para que se realice la programación final que permita realizar las diferentes curvas de las levas de manera didáctica.

5.5. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL HMI

En el caso de la interfaz fue necesario verificar que la programación cumpla con los requerimientos del módulo, de tal forma que sea totalmente funcional y a la vez amigable con el usuario.

Inicialmente se verificó que los complementos para ARDUINO del software MATLAB funcionen correctamente en el complemento de programación gráfica del mismo, debido a que en este tipo de programación se necesita emplear el uso de variables globales y otros parámetros. Por esta razón fue necesario verificar que al almacenar en una variable global todas las características de comunicación entre MATLAB y ARDUINO, esta se podía utilizar en distintas partes de la interfaz, incluyendo pantallas emergentes, ayudas, etc. Se comprobó que la comunicación entre MATLAB y ARDUINO es muy robusta, y no se veía afectada con el uso de botones, cuadros emergentes, ayudas, etc.

Debido a todas a las demoras que tiene el funcionamiento de la interfaz, debido a la extensa programación de la misma, y debido a que la velocidad de respuesta del mecanismo debe ser muy alta, se debía evitar el uso de pausas en el programa para generar relojes y poder controlar el desempeño del mecanismo. Por esta razón se optó por emplear un RTC (Real Time Clock) incorporado en MATLAB, de tal forma que no existan retrasos en los movimientos del mecanismo, haciendo que el temporizador funcione independientemente y mantenga la cuenta precisa del tiempo que ha transcurrido hasta un momento determinado. Se verificó mediante retrasos provocados abriendo pantallas, presionando botones cuyos CALLBACKS tenían líneas de programación que demorarían el programa, que el RTC de MATLAB mantenía la cuenta exacta del tiempo que había transcurrido, por lo que se constituyó en una herramienta muy útil para el funcionamiento del módulo.

Una vez que toda la programación de la interfaz estaba lista se procedió a verificar que el botón INICIALIZAR DRIVERS funcione adecuadamente y que

en un tiempo prudente tanto la el software como el hardware del módulo se encuentre listo para que el usuario comience a trabajar con el mismo. Se comprobó que el CALLBACK del botón se encontraba bien programado y que en el 100% de las oportunidades en las que se inicializó el módulo, este respondió adecuadamente.

A continuación se verificó que cada vez que el usuario ingrese un intervalo mediante la ventana emergente para dicho propósito, este se pueda visualizar en los PLOTS ubicados en la pantalla principal, y que se desplieguen los mensajes correspondientes de alerta en caso de que se sobrepasen las capacidades mecánicas del módulo. Para esto se ingresaron deliberadamente movimientos en donde existan instantes en que la velocidad de la cremallera supere los 800mm/s, comprobando que el programa alerta al usuario sobre posibles comportamientos erróneos del mecanismo.

Se verificó que todas las ayudas del programa funcionen adecuadamente y se desplieguen en el momento justo de tal forma que se garantice un desempeño adecuado del módulo.

Posteriormente se probó que la ventana emergente con la información proveniente del sensor SHARP funcione adecuadamente, mostrando en tiempo real los movimientos que se encuentra ejecutando el mecanismo. El botón con la etiqueta DETENER, que se encuentra en la ventana emergente descrita anteriormente, cumple la función de botón de seguridad en caso de accidentes, por lo que se verificó en varias ocasiones que su funcionamiento sea el adecuado, para evitar posibles daños al mecanismo e incluso a operadores del mismo.

5.6. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA MECATRÓNICO

Una vez que se ha verificado que el funcionamiento individual de los sistemas mecánico, electrónico, y la interfaz de usuario, se procede a realizar

las pruebas sobre el módulo de leva electrónica considerándolo como un sistema mecatrónico, el cual debe ser capaz de realizar los mismos movimientos que efectuaría el seguidor acoplado a una leva plana. Para probar el sistema mecatrónico, se prestará especial atención en los movimientos de la cremallera, ya que si los movimientos ejecutados por la misma son correctos, quiere decir que toda la ingeniería que se encuentra detrás de dichos movimientos se encuentra bien realizada.

La primera prueba que se realizó fue la de ingresar mediante la interfaz un movimiento de cuatro intervalos con una duración de 8 segundos, en donde los 2 primeros segundos el mecanismo efectúa una subida uniforme hasta una altura de 50mm, posteriormente existe un reposo de 2s, una bajada uniforme de 2s y un reposo final de 2s. En la figura 5.1 se puede observar el movimiento descrito anteriormente, tras haber sido ingresado mediante la interfaz.

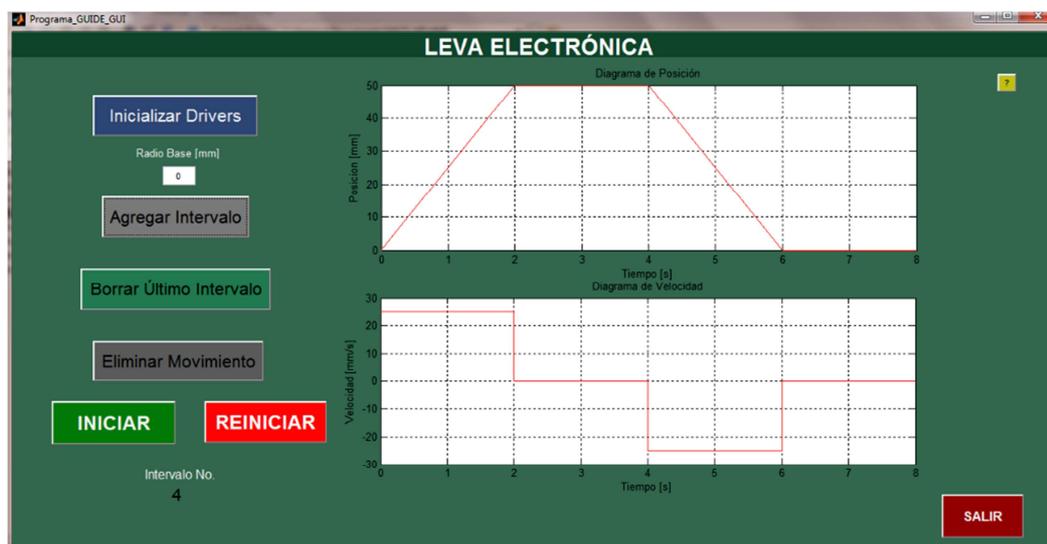


Figura 5.1 Primer movimiento de prueba

A continuación, en la figura 5.2, se muestra la curva de datos adquiridos mediante el sensor SHARP. Como se puede observar a pesar de que el sensor tiene una resolución relativamente baja, permite observar que el movimiento que el mecanismo realizó es el correcto.

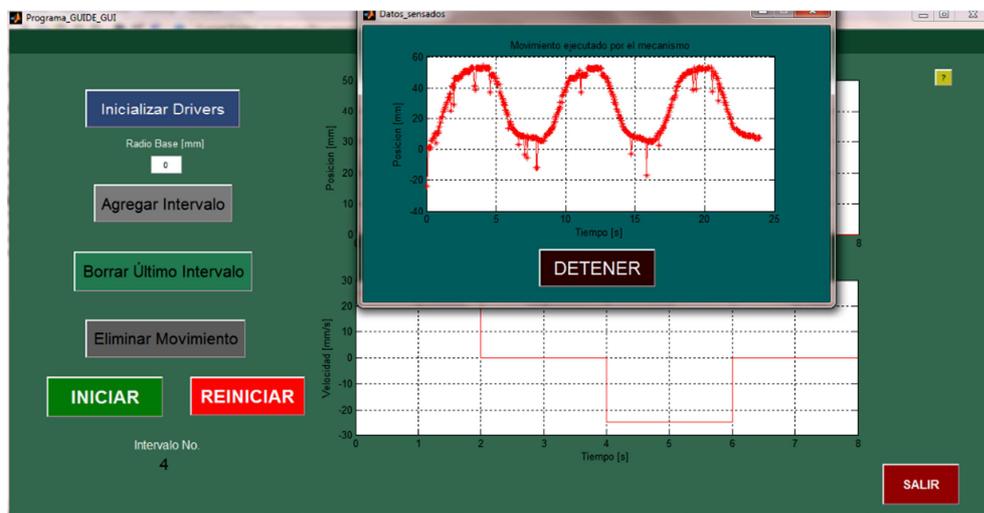


Figura 5.2 Datos adquiridos del movimiento de prueba 1

Posteriormente se ingresó en la interfaz un movimiento similar al anterior pero con ascensos y descensos de tipo cicloidal, con 8 segundos de duración de igual forma. A continuación, en las figuras 5.3 y 5.4, se puede visualizar el movimiento ingresado y la verificación de que el movimiento realizado por la cremallera, cuyos datos fueron adquiridos mediante el sensor SHARP, es correcto.

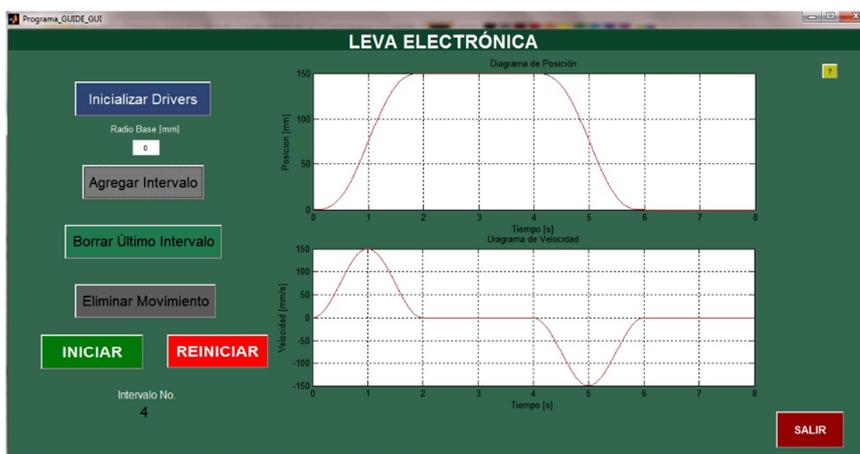


Figura 5.3 Segundo movimiento de prueba

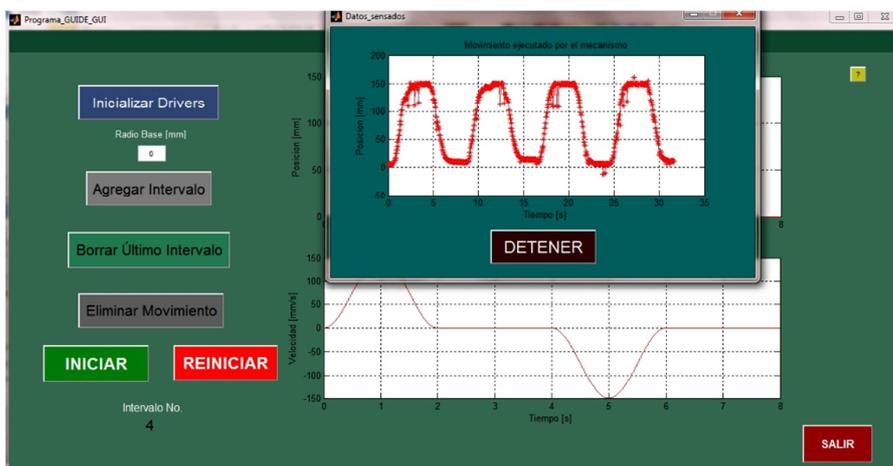


Figura 5.4 Datos adquiridos del movimiento de prueba 2

Posteriormente se ingresó en la interfaz un movimiento ascensos y descensos de tipo armónico, con 6 segundos de duración, de los cuales 2 son de ascenso hasta una altura de 100mm, 2s de reposo y 2s de descenso. A continuación, en las figuras 5.5 y 5.6, se puede visualizar el movimiento ingresado y la verificación de que el movimiento realizado por la cremallera es correcto.

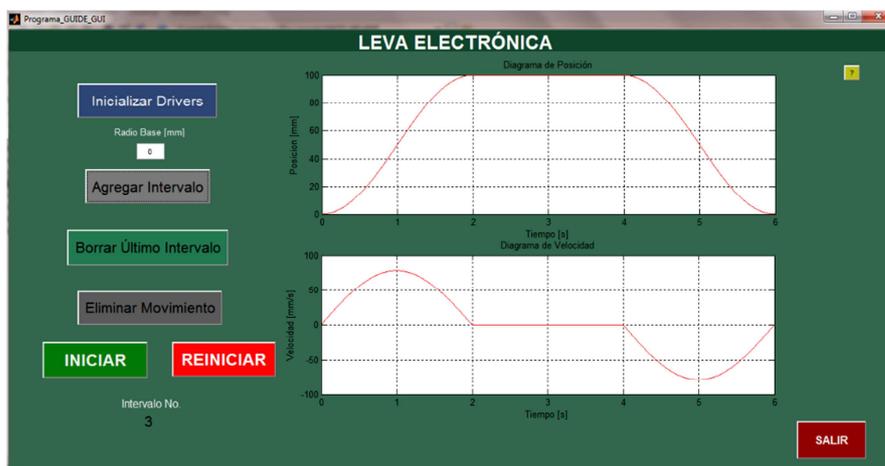


Figura 5.5 Tercer movimiento de prueba

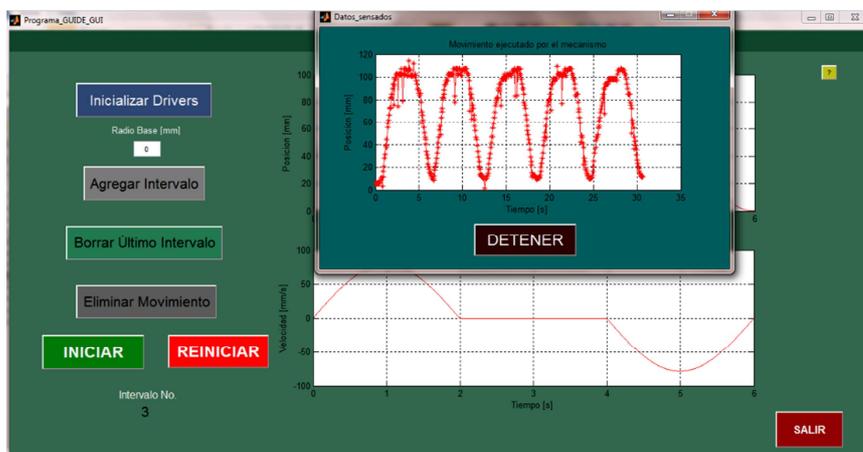


Figura 5.6 Datos adquiridos del movimiento de prueba 3

Finalmente se ingresó en la interfaz un movimiento compuesto, el cual tuvo dos propósitos. El primero fue el de evidenciar que tanto la parte mecánica, electrónica y la programación de la interfaz del módulo, funcionan adecuadamente. El segundo propósito fue el de mostrar la ventaja de este sistema mecatrónico con respecto a las levas ordinarias, ya que la manufactura de una leva que permita efectuar un movimiento compuesto resulta bastante complicada y costosa.

A continuación se puede apreciar en la figura 5.7 el movimiento compuesto, el cual consta de 2 segundos en ascenso armónico hasta una altura de 150mm, un reposo de 2 segundos, un descenso de 2 segundos en movimiento cicloidal, un reposo de 2 segundos, un intervalo de descenso polinomial hasta 0mm, y finalmente un reposo de 2 segundos. Como se puede evidenciar el movimiento es bastante complejo, por lo que un sistema mecatrónico como el descrito en el presente documento resulta ser una opción bastante considerable.

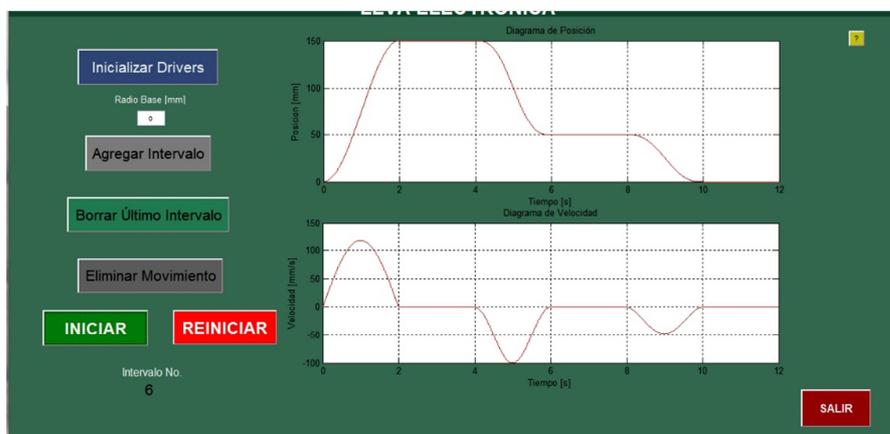


Figura 5.7 Cuarto movimiento de prueba

A continuación en la figura 5.8 se puede observar de igual manera los datos adquiridos por el sensor de proximidad del sistema, evidenciando que este se adapta bastante bien al movimiento combinado requerido por el usuario.

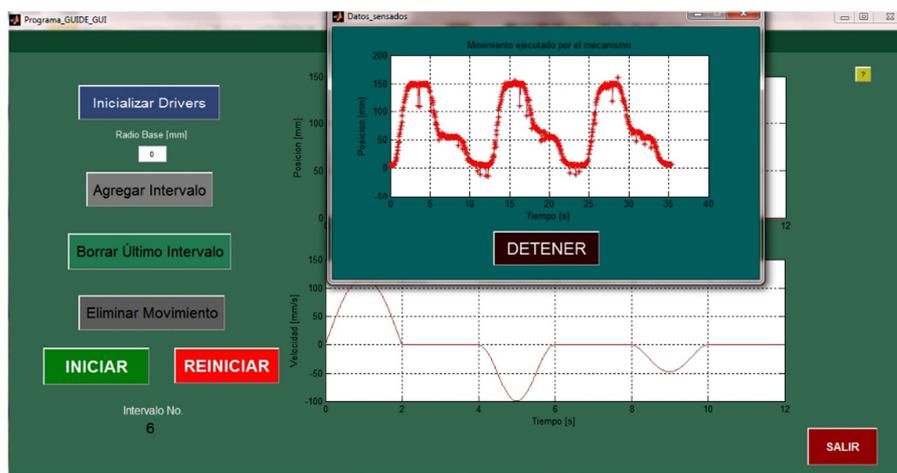


Figura 5.8 Datos adquiridos del movimiento de prueba 4

CAPÍTULO 6

6 ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

6.1. COSTOS DE MATERIA PRIMA

Tabla 6.1

Costos de Materia Prima

No	Material	Especificación	Costo (USD/m)	Costo (USD/u)	Peso (Kg)	Cant	Subtotal (USD)
1	Nylon Poliamida (Duralón)	Plancha 300x300x20mm	N/A	21.00	2.52	1	21.00
2	Acero AISI 1045	Varilla d= 3 1/2 in y longitud 100mm	102.50	N/A	5.85	0.1	10.25
3	Acero SAE 1018	Varilla d= 7/8 in y longitud 100mm	85.30	N/A	0.31	0.1	8.53
4	Acero AISI 1045	Varilla 10x10mm y longitud 300mm	52.83	N/A	0.24	0.3	15.85
5	Nylon Poliamida (Duralón)	Plancha 150x150x12mm	N/A	12.00	0.38	1	12.00
6	Acero A36	Varilla d= 30mm y longitud 15mm	35.10	N/A	0.09	0.015	0.53
7	Acero A36	Plancha de 48x100x6mm	N/A	1.00	0.23	1	1.00
8	Rodamiento	Rodamiento #6000, d=10mm	N/A	3.50	N/A	4	14.00
9	Acrílico	Plancha de 250x130x9	N/A	2.70	N/A	1	2.70
10	Acrílico	Plancha de 250x250x4	N/A	2.45	N/A	1	2.45
11	Acrílico	Plancha de 510x120x2	N/A	7.90	N/A	1	7.90
12	Acrílico	Plancha de 250x130x12	N/A	3.20	N/A	1	3.20
13	Perno M5	M-5x0.8x12, agujero hexagonal	N/A	0.041	N/A	11	0.45
14	Perno M4	M-4x0.7x12, agujero hexagonal	N/A	0.039	N/A	3	0.12
15	Perno M2.5	M-2.5x0.45x8, agujero hexagonal	N/A	0.035	N/A	16	0.56
16	Tornillo M5	M-5x0.8x12, cabeza redonda	N/A	0.036	N/A	20	0.72
17	Tuerca M5	Tuerca Hexagonal	N/A	0.071	N/A	11	0.78
18	Tornillo M2.5	M-2.5x0.45x8, cabeza redonda	N/A	0.031	N/A	14	0.43
19	Tuerca M2.5	Tuerca Hexagonal	N/A	0.063	N/A	10	0.63
20	Rosca Hexagonal	Para placas	N/A	0.13	N/A	4	0.52
21	Ángulos	Espesor de 2mm	N/A	0.39	N/A	7	2.73
TOTAL							106.35

6.2. COSTOS DE EQUIPOS, MATERIALES Y HERRAMIENTAS

A continuación en la tabla 6.2 se detallan los costos de los equipos utilizados para la elaboración del módulo de leva electrónica.

Tabla 6.2

Costo de equipos del módulo de leva electrónica

No	Item	Descripción	Cantidad	c/u	Impuesto salida Capital (5%)	Traslado	Costo total
1	ARDUINO MEGA 2560	Placa basada en un microcontrolador ATMEGA 2560	1	27,25	1,36		28,61
2	DYNAMIXEL MX-64T	Servomotor con PID interno	1	299,90	15,00	10	324,90
3	OPENCM 9.04B	Driver para motores DYNAMIXEL	1	19,90	1,00	10	30,90
4	Fuente de voltaje de 12V	Fuente para pruebas	1	16,00			16,00
5	PCB - fuente de voltaje de 12VDC	Circuito impreso para fuente de voltaje del módulo	1	44,90			44,90
6	PCB - filtro de señales	Circuito impreso para filtro de señales del módulo	1	38,17			38,17
Costo Total							483,47

En la tabla 6.3 se detallan los costos de los materiales empleados, tanto en la fase de pruebas como de implementación.

Tabla 6.3

Costo de materiales del módulo

Elementos Electrónicos				
No.	Item	Cant.	Costo Unitario	Costo Total
1	Resistencias eléctricas	17	0,03	0,51
2	Condensadores de 2.2uF	5	0,2	1
3	Condensadores de 100uF	1	0,4	0,4
4	Condensadores de 2200uF	1	1,25	1,25
5	Condensadores cerámicos	10	0,1	1
6	Amplificador Operacional LM324N	1	0,8	0,8
7	Cables de proto Macho-Macho	10	0,25	2,5

CONTINÚA →

8	Baquelita	1	10	10
9	Transformador 110VAC a 12VAC con tap central	1	17,2	17,2
10	BD135	1	0,8	0,8
11	2N3055	1	5,5	5,5
Costo Total				40,96

Los costos de las herramientas menores empleadas en el proceso de implementación del módulo se pueden apreciar en la tabla 6.4.

Tabla 6.4

Costo de herramientas menores del módulo

Herramientas				
No.	Item	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
1	Multímetro	1	17,5	17,5
2	Protoboard	1	14,5	14,5
3	Espiral para cableado estructurado	1	2,25	2,25
4	Desarmadores de bornera	1	3,5	3,5
5	Desarmadores de bornera	2	3	6
Costo Total				43,75

6.3. COSTOS DE MANO DE OBRA

Los costos de la materia prima utilizada en el proyecto, se especifican en la tabla 6.5.

Tabla 6.5

Costos de Mano de Obra

No	Operación	Descripción	Costo (USD/h)	Tiempo (h)	Subtotal
1	Corte por Electrohilo	Corte de dientes de cremallera	53.40	1.0	53.40
2	Fresado	Elaboración engranes de 70 dientes	40.00	2.0	80.00
3	Fresado	Elaboración engranes de 25 dientes	40.00	1.0	40.00

CONTINÚA →

4	Torneado	Elaboración placa circular de Duralón	30.00	0.5	15.00
5	Fresado	Elaboración guía para a cremallera	25.00	0.5	12.50
6	Fresado	Vaciado para alineación del motor	55.00	0.5	27.50
7	Corte y limado	Elaboración de soportes de rodamientos	25.00	1.0	25.00
8	Torneado	Elaboración de los ejes del mecanismo	30.00	1.0	30.00
9	Fresado	Elaboración de chaveteros y chavetas	55.00	1.0	55.00
10	Perforado	Elaboración de agujeros de fijación	20.00	1.0	20.00
11	Soldado	Soldado de elementos PCB1	8.56	0.5	4.28
12	Soldado	Soldado de elementos PCB2	6.40	0.5	3.20
13	Corte por Láser	Corte de las placas de acrílico	32.72	1.0	32.72
14	Pintado	Pintado para evitar la corrosión	10.00	1.0	10.00
15	Pegado	Pegado de las placas de acrílico	30.00	0.1	3.00
				TOTAL	411.60

6.4. COSTO TOTAL

El costo total del módulo, se muestra en la tabla 6.6.

Tabla 6.6

Costo Total del Módulo

DETALLE	Costo (USD)
COSTO DE MATERIA PRIMA	106.35
COSTO DE EQUIPOS	483.47
COSTO DE MATERIALES	40.96
COSTO DE HERRAMIENTAS	43.75
COSTO DE MANO DE OBRA	411.6
COSTO TOTAL	1086.13

CAPÍTULO 7

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- Un sistema mecatrónico al ser una sinergia entre las áreas de la mecánica, la electrónica y la programación, debe ser concebido desde su diseño de tal forma que dicho sistema sea totalmente funcional bajo los requerimientos de comportamiento mecánico, eléctrico y electrónico y con un nivel de dificultad no excesivamente alto, utilizando un entorno de programación sencillo y lo más económico posible para una aplicación dada. De esta forma se pueden ahorrar recursos materiales económicos tanto en la parte mecánica como eléctrica y electrónica.
- Una leva electrónica puede realizar movimientos combinados, más complicados y con intervalos de tiempo más largos, lo que difícilmente se puede conseguir con una leva mecánica además de que su manufactura tiene costos elevados.
- En el módulo construido se obtuvo una resolución en cuanto tiene que ver a la posición de 0.89 mm en un rango de 150mm y en velocidad de 0.47 cm/s en un rango de hasta 80cm/s, esto se debió a que el conversor digital/análogo que proporciona el Arduino es de 0-255 en PWM que corresponde de 0 a 5V, y además el controlador OPENCM 9.04-b solo admite hasta 3.3V por lo que el PWM del Arduino queda limitado a un rango de 0-168 en PWM.
- Dado que el módulo elaborado es un prototipo para fines didácticos, para realizar trabajos en los que se requiera más fuerza y potencia, es decir a nivel industrial, se necesita una mayor inversión con motores de mayor potencia, sensores industriales con más resolución y un control industrial

realizado con PLC para que pueda adaptarse a otros sistemas que funcionen simultáneamente con la leva electrónica.

- El encoder magnético incorporado en el motor DYNAMIXEL MX-64T permite que el control de posición y velocidad sea extremadamente preciso, logrando cambios de posición de hasta 0.088° y de velocidad de hasta 0.114rpm, esto junto a un correcto diseño de los componentes mecánicos, electrónicos y una programación bien elaborada, permiten que el mecanismo se comporte como lo haría una leva común, pero con la versatilidad de realizar movimientos complicados que resultarían imposibles con una leva ordinaria por la complejidad de su manufactura.
- En lo que respecta a la instrumentación utilizada en el módulo para la visualización de resultados por parte del usuario mediante una ventana emergente, esta no requiere una precisión muy elevada ya que al tratarse de un módulo didáctico, lo importante es saber si el desempeño de la cremallera tiene relación con el esperado por el usuario. Por esta razón se optó por el sensor SHARP GP2Y0A41SK0F el cual tiene una precisión bastante aceptable para un sensor no industrial. Sin embargo si se necesitara que los resultados mostrados en la interfaz fuesen más precisos, se optaría por sensores industriales, cuyo costo es alto.
- La selección del modo de transmisión de señales mediante modulación por ancho de pulso y conversión análogo a digital, resultó de un trabajo de comparación entre las distintas formas de hacer que los datos llegaran del software MATLAB hacia el controlador OPENCM 9.04b las cuales se detallan en la tabla 3.9. El filtro fue diseñado de tal forma que permita tener una alta velocidad de respuesta y una gran estabilidad en su salida, evitando afectar el desempeño del módulo, sin embargo no es la mejor opción de transmisión de datos, ya que las señales al pasar por circuitos analógicos y ser mapeadas varias veces, pueden hacer que se pierda precisión en los movimientos realizados por el mecanismo.

- Al momento de diseñar un circuito impreso, generalmente importa mucho la reducción de tamaño del mismo para disminuir su costo, sin embargo cuando se diseñó el circuito impreso correspondiente a la fuente de voltaje DC, se tomaron otras consideraciones como la temperatura que podían alcanzar ciertos componentes en el circuito, especialmente el elemento 2N3055, que libera una gran cantidad de calor, por lo que requiere un disipador grande y no deberían estar cerca a otros elementos susceptibles a sufrir daños debido a cambios térmicos. De igual forma la parte estética del módulo tuvo un papel influyente en la forma de los PCBs del filtro de señales y a la fuente de voltaje.

7.2. RECOMENDACIONES

- Si bien es cierto el módulo de leva electrónica debe ser lo suficientemente robusto para soportar errores de manipulación al ser ubicado en un laboratorio, no se debe pasar por alto que quienes manejarán el sistema serán estudiantes o profesores con nociones claras sobre sistemas mecánicos y/o mecatrónicos, por lo tanto el sistema es susceptible a daños por una mala manipulación de sus elementos mecánicos y electrónicos. Por esta razón la lectura y comprensión del manual de usuario del sistema es esencial para precautelar su integridad.
- Es importante estar actualizado en conocimientos de diseño electrónico y mecatrónico al momento de elaborar un sistema mecatrónico, debido a que en la actualidad, gracias a los avances tecnológicos alrededor del mundo, se puede simplificar mucho un trabajo, siempre y cuando se tenga los conocimientos necesarios para poder manejar tecnologías de software y hardware avanzadas. El caso de los controladores ARDUINO es un claro ejemplo de esto.

- Si es que el módulo fuera trasladado a un nivel industrial se debería pensar en un modo de transmisión WIRELESS o mediante comunicación ZIGBEE, ya que estos garantizarían que no exista ninguna pérdida de datos. Debido a los altos costos de estos modos de transmisión, y a que el módulo de leva electrónica elaborado consiste en un producto de fines estudiantiles, se optó por diseñar el filtro de señales mencionado anteriormente.
- Dentro de MATLAB existen varias librerías y funciones especializadas en la simulación y control en tiempo real de sistemas, como por ejemplo el toolbox RTW (Real Time Workshop), el cual trabaja con modelos en SIMULINK en tiempo real, ejecutando incluso funciones de disparo y detenciones, manejando una precisión muy alta del tiempo transcurrido del sistema. Otro ejemplo de estas librerías es el RTWT (Real Time Workshop Target), el cual permite procesar un modelo de SIMULINK en tiempo real conectado a dispositivos físicos, mediante un motor en tiempo real que trabaja con el KERNEL (parte fundamental de un Sistema operativo) de Windows. Para futuras mejoras en el sistema de leva electrónica se podría pensar en el uso de modelamientos mediante SIMULINK, ya que es compatible con ARDUINO, y el uso ya no solamente del RTC de MATLAB sino también de las librerías RTW y RTWT explicadas anteriormente.

BIBLIOGRAFÍA

- Arduino. (2013). *Arduino Mega2560*. Recuperado el 26 de Marzo de 2014, de <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
- Arduino. (2013). *Arduino UNO*. Recuperado el 26 de Marzo de 2014, de <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
- ATMEL. (2012). *MICROCONTROLADORES DE 8 BITS*. Recuperado el 11 de Abril de 2014, de http://www.atmel.com/images/atmel-8271-8-bit-avr-microcontroller-atmega48a-48pa-88a-88pa-168a-168pa-328-328p_datasheet.pdf
- Budinas, R., & Nisbett, K. (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (9 ed.). New York: McGraw-Hill.
- Creus, A. (2000). *Instrumentación Industrial* (6 ed.). Barcelona: Alfaomega.
- Electronica Pascual. (2010). *Control PID*. Recuperado el Enero de 2014, de http://electronicapascual.com/Img%20Blog/C_PID/CPID_4.png
- Elek Freaks. (2013). *Ultrasonic Ranging Module HC - SR04*. Recuperado el 19 de Mayo de 2014, de <http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>
- Fries, B. (2005). *Audio Digital Práctico*. Londres: Anaya Multimedia.
- García, H. (2012). *Motores de Corriente Directa*. Recuperado el 25 de Marzo de 2014, de <http://www.hgm.shibanazihuatanejo.com/ME/Notascurso/U2.pdf>
- González, J. (2008). *Transductores de Desplazamiento Lineal*. Recuperado el 24 de Marzo de 2014, de http://www.acema.com.ar/biblioteca/databases/download/T13_desplin.pdf
- Hispavista. (2010). *Microcontrolador*. Recuperado el 26 de Marzo de 2014, de <http://microcontroladores-e.galeon.com/>
- ITESCAM. (2008). *Características de las Señales*. Recuperado el 26 de Marzo de 2014, de <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r87842.PDF>

- Johnson Electric. (2012). *Teoría de los motores AC*. Recuperado el 25 de Marzo de 2014, de <http://www.johnsonelectric.com/es/resources-for-engineers/motors/basics-of-motors/ac-motors-theory.html>
- Machine Design. (Marzo de 2012). *The latest developments in electronic camming*. Recuperado el Enero de 2014, de <http://machinedesign.com/motorsdrives/latest-developments-electronic-camming>
- Maser, Grupo Tecnológico. (s.f.). *Automatización*. Recuperado el 22 de Marzo de 2014, de http://www.grupo-maser.com/PAG_Cursos/Auto/auto2/auto2/PAGINA%20PRINCIPAL/Automatizacion/Automatizacion.htm.
- MECAPEDIA. (s.f.). *Tipos de Levas*. Recuperado el 30 de Marzo de 2014, de <http://www.mecapedia.uji.es/images/leva.2.png>
- Miranda, J. C. (2003). *Mecanismos*. Toluca.
- Norton, R. (2011). *Diseño de Máquinas* (4 ed.). México DF: Prentice Hall.
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. México: Pearson Educación.
- Olmedo, F. (2011). *Teoría de Mecanismos y Servomecanismos*. Quito.
- Pintor Borobia, J. (s.f.). *Teoría de Máquinas*. Recuperado el 22 de Marzo de 2014, de http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/tm/pdfdoc_th/apuntes/apuntes_tema7.pdf.
- ROBOTIS . (2010). *ROBOTIS e-MANUAL*. Recuperado el 11 de Abril de 2014, de <http://support.robotis.com/en/>
- Savant, C. J., Roden, M. S., & Carpenter, G. (2004). *Diseño Electrónico - Circuitos y Sistemas*.
- SHARP. (2012). *GP2Y0A41SK0F-Sheet No.: OP13008EN*. Recuperado el 10 de Julio de 2014
- Shigley, J. E., & Uicker, J. J. (2001). *Teoría de Máquinas y Mecanismos*. México: Mc Graw Hill.

- TechDesign. (2013). *Servos*. Recuperado el 25 de Marzo de 2014, de http://www.techdesign.com.ec/techdesign/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=66
- The Mathworks, Inc. (2014). *MATLAB GUI*. Recuperado el 11 de Abril de 2014, de <http://www.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>
- The Mathworks, Inc. (s.f.). *MATLAB GUI*. Recuperado el 11 de Abril de 2014, de <http://www.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>
- Tuveras. (s.f.). *El Motor Asíncrono*. Recuperado el 25 de Marzo de 2014, de <http://www.tuveras.com/maquinaasincrona/motorasincrono1.htm>
- Universidad Nacional de Rosario. (2006). *Teoría de Máquinas - Máquina y Mecanismo*. Recuperado el 27 de Marzo de 2014, de <http://www.franjafceia.com.ar/i/apuntes/72.pdf>.
- Universidad Politécnica de Cataluña. (s.f.). *Visión General a los Sistemas de Control*. Recuperado el 25 de Marzo de 2014, de <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3330/5/34059-5.pdf>.
- Universidad Tecnológica de Pereira. (s.f.). *Mecanismo de Leva y Seguidor*. Recuperado el 29 de Marzo de 2014, de <http://blog.utp.edu.co/adriamec/files/2012/07/LECCI%C3%93N-11-MECANISMOS-DE-LEVA-Y-SEGUIDOR.pdf>.
- Uvigo. (2005). *Tutorial de Labview*. Recuperado el 27 de Marzo de 2014, de http://webs.uvigo.es/euiti_ie1/ie2/Tutorial%20de%20Labview.pdf
- Zinoviev, V. (1969). *Teoría de los Mecanismos y Máquinas*. Moscú: MIR.