



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 INGENIERO MECATRÓNICO.

**TEMA: AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO DE LEVAS
TECQUIPMENT TM21 062 PARA EFECTUAR UN ESTUDIO
TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA INCERTIDUMBRE
PROVENIENTE DE LA MANUFACTURA**

AUTORES:

**SALAZAR CÁRDENAS, DAVID ALEXIS
JUIÑA QUILACHAMÍN, OSCAR ALBERTO**

DIRECTOR: ING. JAIME ECHEVERRÍA

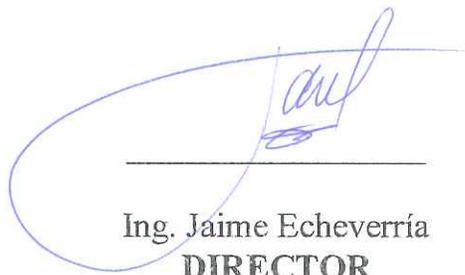
CODIRECTOR: ING. ALEJANDRO GÓMEZ

**SANGOLQUÍ
2015**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICADO

Certificamos que el proyecto 'AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO DE LEVAS TECQUIPMENT TM21 062 PARA EFECTUAR UN ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA INCERTIDUMBRE PROVENIENTE DE LA MANUFACTURA' fue realizado en su totalidad por David Alexis Salazar Cárdenas y Oscar Alberto Juiña Quilachamín, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica.



Ing. Jaime Echeverría
DIRECTOR



Ing. Alejandro Gómez
CODIRECTOR

Sangolquí, julio 2015

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

El presente proyecto titulado 'AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO DE LEVAS TECQUIPMENT TM21 062 PARA EFECTUAR UN ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA INCERTIDUMBRE PROVENIENTE DE LA MANUFACTURA', ha sido desarrollado tomando en cuenta los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándolos en el registro bibliográfico.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello, nos declaramos responsables de su contenido, veracidad y alcance del proyecto en mención.



David A. Salazar C.

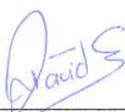


Oscar A. Juiña Q.

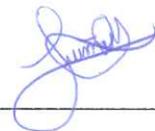
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución el proyecto de grado titulado 'AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO DE LEVAS TECQUIPMENT TM21 062 PARA EFECTUAR UN ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LA INCERTIDUMBRE PROVENIENTE DE LA MANUFACTURA', cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad.



David A. Salazar C.



Oscar A. Juiña Q.

Sangolquí, julio 2015

DEDICATORIA

A la Virgen Dolorosa, por guiarme y protegerme en todo este camino, dándome la fuerza necesaria para superar obstáculos y adversidades.

A mis padres, Sergio y Yoly, por su incondicional apoyo, amor y comprensión. Por ser la base que me ha permitido llegar hasta aquí.

A mi hermana Liz, por su ayuda y respaldo en todo momento.

David Alexis Salazar Cárdenas

DEDICATORIA

Dedico este escrito a mi familia, a mis padres Luis y Elvia, quienes me brindan su cariño y paciencia durante toda mi vida, todo su esfuerzo nunca será en vano. A mis hermanos Christian, Betty y Esteban por su apoyo siendo pilares en mi formación como persona.

Oscar Alberto Juiña Quilachamín

AGRADECIMIENTO

Gracias de corazón, a Dios, a la Dolorosa, a mis padres, a mi hermana y demás familiares, quienes son pilares fundamentales en mi formación.

A mi amigo y compañero de tesis Oscar, por juntar esfuerzos para llevar adelante este proyecto.

Al Ing. Fernando Olmedo, por su valioso aporte en la consecución del presente trabajo.

A mis amigos y compañeros, por haber hecho de esta etapa un trayecto de vivencia que nunca voy a olvidar.

David Alexis Salazar Cárdenas

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia, a mi Padre por ser ejemplo de esfuerzo, sacrificio y humildad, a mi Madre por su cariño y paciencia, por estar siempre junto a mí en buenos y malos momentos, siendo mi apoyo en la vida. A mis hermanos, Christian por la ayuda brindada en cada momento, a Betty por su cariño, preocupación y siempre cuidarme, a Esteban por ser un buen hermano.

A mi amigo y compañero de tesis David, por la paciencia y las horas de trabajo que nos permitieron la consecución de esta meta.

A mis amigos con los que compartí muchos momentos buenos y malos en la vida universitaria, y a cada persona que de una u otra manera formaron parte de mi vida estudiantil.

Oscar Alberto Juiña Quilachamín

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
ÍNDICE DE CUADROS	xviii
RESUMEN.....	xix
SUMMARY	xx
CAPITULO 1	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.1 Alcance.....	2
1.2 Justificación e importancia.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
CAPITULO 2	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 Principios de incertidumbre y análisis de sensibilidad.....	5
2.1.1 Historia de la modelización.....	5
2.1.2 Propagación de incertidumbre y análisis de sensibilidad.....	6
2.1.2.1 Modelos de sistemas físicos (Paso A).....	8
2.1.2.2 Cuantificación de fuentes de incertidumbre (Paso B).....	9
2.1.2.3 Propagación de incertidumbre (Paso C).....	10
2.1.2.4 Análisis de sensibilidad (Paso C').....	11
2.2 Mecanismo leva-seguidor.....	11
2.2.1 Clasificación.....	11

2.2.2	Geometría de la leva.	14
2.2.3	Ley Fundamental del Diseño de Levas.....	17
2.2.4	Secuencia de diseño.....	17
2.2.5	Movimiento armónico simple.....	18
2.2.6	Funciones de tipo polinómico.....	21
2.2.6.1	Leva polinómica 3 4 5.	21
2.2.6.2	Leva polinómica 4 5 6 7.	25
2.2.7	Curvas de Bezier.....	28
2.3	Sistemas dinámicos.....	33
2.3.1	Clasificación.....	33
2.4	Modelamiento del sistema.	34
2.5	Equipos de control	35
2.5.1	Fuente de voltaje.....	35
2.5.2	Arduino.....	36
2.5.3	Sensores.....	37
CAPITULO 3		40
SISTEMA DINÁMICO		40
3.1	Parámetros mecánicos del sistema.....	40
3.1.1	Rigidez del resorte de seguidor (real).....	40
3.1.2	Rigidez del seguidor (cilindro conexión).	41
3.1.3	Masa del seguidor.....	42
3.1.4	Amortiguación (fricción viscosa cilindro y cojinete).	43
3.1.5	Ley de desplazamiento.	44
3.2	Solución de la ecuación diferencial del modelo.....	46
3.3	Incertidumbre proveniente de la manufactura.	48
3.4	Análisis de geometría mecanismo Tecquipment TM21 062.	52

3.5	Diseño leva armónica.....	53
3.5.1	Comprobación del perfil.....	58
3.6	Diseño leva polinómica 3 4 5.....	59
3.6.1	Comprobación del perfil.....	63
3.7	Diseño leva Bezier 8	64
3.7.1	Comprobación del perfil.....	69
3.8	Comprobación de los perfiles de forma analítica.	70
3.9	Manufactura de levas.	73
3.9.1	Levas provistas por el equipo Tecquipment TM21 062.	73
3.9.2	Selección de material.....	75
3.9.3	Procesos de manufactura efectuados.	76
3.10	Diseño electrónico.....	89
3.10.1	Cambio de giro y modulación por ancho de pulso.	90
3.10.2	Alimentación al circuito.	95
3.10.3	Etapas de filtrado acelerómetro.....	96
3.10.4	Reducción de tensión para lectura sensor óptico.....	97
3.10.5	Circuito paro de emergencia.....	98
3.11	Diseño del circuito impreso (PCB - Printed Circuit Board).	100
3.11.1	Cálculo de anchos de pista.....	102
3.12	Diseño de interfaz.	104
CAPÍTULO 4		109
IMPLEMENTACIÓN		109
4.1	Implementación mecánica.....	109
4.1.1	Mantenimiento.....	109
4.1.2	Diseño de estructuras.....	113
4.1.3	Reemplazo de componentes.	114

4.2	Implementación eléctrica y electrónica.....	116
4.2.1	Componentes eléctricos.....	116
4.2.2	Componentes electrónicos.....	118
CAPÍTULO 5		121
PRUEBAS Y RESULTADOS		121
5.1	Pruebas de instrumentación.	121
5.2	Simulación del sistema.	121
5.3	Comparación diagramas.....	124
5.4	Prueba de incertidumbre proveniente de la manufactura.....	131
5.5	Pruebas de funcionamiento continuo.	132
CAPÍTULO 6		133
ANÁLISIS ECONÓMICO		133
6.1	Detalle de inversión eléctrico y electrónico.....	133
6.2	Detalle de inversión mecánica.	134
6.3	Detalle de inversión en varios.....	135
CONCLUSIONES		137
RECOMENDACIONES		139
BIBLIOGRAFÍA.....		140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estado previo del equipo.....	2
Figura 2.1 Bosquejo propagación de incertidumbre	7
Figura 2.2 Clasificación de los métodos de propagación de incertidumbre.....	10
Figura 2.3 Movimiento de seguidor oscilante.....	12
Figura 2.4 Movimiento de seguidor trasladante.....	12
Figura 2.5 Cierre de junta de forma	13
Figura 2.6 Leva tipo axial	13
Figura 2.7 Por el tipo de seguidor	14
Figura 2.8 Nomenclatura mecanismo leva-seguidor.....	15
Figura 2.9 Curvas leva armónica ascenso	19
Figura 2.10 Curvas leva armónica descenso	20
Figura 2.11 Curvas leva armónica.....	20
Figura 2.12 Condiciones de frontera leva polinómica 3 4 5	22
Figura 2.13 Curvas leva polinómica 3 4 5 ascenso	24
Figura 2.14 Curvas leva polinómica 3 4 5 descenso	25
Figura 2.15 Curvas leva polinómica 4 5 6 7 ascenso	27
Figura 2.16 Curvas leva polinómica 4 5 6 7 descenso	28
Figura 2.17 Polígono de control retorno	30
Figura 2.18 Curvas leva Bezier descenso.....	31
Figura 2.19 Curvas leva Bezier ascenso.....	32
Figura 2.20 Péndulo	33
Figura 2.21 Sistema equivalente y DCL	34
Figura 2.22 Fuente de voltaje variable Tecquipment 241	36
Figura 2.23 Conexión típica Shunt.....	36
Figura 2.24 Placa de desarrollo Arduino.....	37
Figura 2.25 Símbolo potenciómetro mecánico	38
Figura 2.26 Potenciómetro deslizante	38
Figura 2.27 Potenciómetro múltiple.....	38
Figura 2.28 Acelerómetro piezoeléctrico	39
Figura 2.29 Acelerómetro analógico MMA 7361	39

Figura 3.1 Resorte de seguidor.....	41
Figura 3.2 Seguidor de rodillo.....	41
Figura 3.3 Ensamble seguidor de rodillo	42
Figura 3.4 Simulación estudio de deformación.....	42
Figura 3.5 Comparativa de funciones polinomiales.....	44
Figura 3.6 Comparativa de aceleraciones polinomiales.....	45
Figura 3.7 Comparativa curvas de Bezier	45
Figura 3.8 Subrutina sistema de ecuaciones.....	47
Figura 3.9 Subrutina herramienta ode45	48
Figura 3.10 Función polinómica 3 4 5	48
Figura 3.11 Ingreso valores máximo y mínimo de desplazamiento.....	49
Figura 3.12 Ingreso de valores al programa	50
Figura 3.13 Respuesta a 150 rpm	50
Figura 3.14 Respuesta a 300 rpm	50
Figura 3.15 Respuesta a 450 rpm	51
Figura 3.16 Respuesta a 600 rpm	51
Figura 3.17 Respuesta a 750 rpm	51
Figura 3.18 Desplazamiento leva armónica	53
Figura 3.19 Velocidad leva armónica	54
Figura 3.20 Aceleración leva armónica.....	54
Figura 3.21 Golpeteo leva armónica	55
Figura 3.22 Construcción leva armónica.....	55
Figura 3.23 Construcción perfil leva armónica.....	57
Figura 3.24 Leva armónica.....	57
Figura 3.25 Ángulo de presión leva armónica	58
Figura 3.26 Desplazamiento leva polinómica 3 4 5	59
Figura 3.27 Velocidad leva polinómica 3 4 5	60
Figura 3.28 Aceleración leva polinómica 3 4 5	60
Figura 3.29 Golpeteo leva polinómica 3 4 5	61
Figura 3.30 Construcción leva polinómica 3 4 5	61
Figura 3.31 Construcción perfil leva polinómica 3 4 5.....	62
Figura 3.32 Leva polinómica 3 4 5	63

Figura 3.33 Ángulo de presión leva polinómica 3 4 5	64
Figura 3.34 Desplazamiento leva Bezier 8.....	65
Figura 3.35 Velocidad leva Bezier 8.....	66
Figura 3.36 Aceleración leva Bezier 8	66
Figura 3.37 Golpeteo leva Bezier 8.....	67
Figura 3.38 Construcción perfil leva Bezier 8	68
Figura 3.39 Leva Bezier 8.....	68
Figura 3.40 Ángulo de presión leva Bezier 8.....	69
Figura 3.41 Determinación analítica del perfil.....	70
Figura 3.42 Perfil analítico leva armónica	71
Figura 3.43 Perfil analítico leva polinómica 3 4 5	72
Figura 3.44 Perfil analítico leva Bezier 8.....	72
Figura 3.45 Levas provistas por el equipo Tecquipment TM21 062	73
Figura 3.46 Fundición gris	74
Figura 3.47 Acero de transmisión	76
Figura 3.48 Sierra de vaivén	77
Figura 3.49 Materia prima.....	77
Figura 3.50 Torno paralelo.....	78
Figura 3.51 Vista lateral perfil de leva.....	78
Figura 3.52 Mandril de cuatro mordazas	79
Figura 3.53 Sujeción de material. Materia prima maquinada	79
Figura 3.54 Plataforma giratoria graduada.....	80
Figura 3.55 Graduación plataforma giratoria.....	80
Figura 3.56 Prueba de dimensiones cono interno	80
Figura 3.57 Fresadora CNC Milltronics.....	81
Figura 3.58 Inicialización de herramientas	81
Figura 3.59 Pieza inicial y perfil final.....	82
Figura 3.60 Parámetros de fresado.....	82
Figura 3.61 Fresado de cavidad.....	83
Figura 3.62 Ingreso de avances y velocidades	83
Figura 3.63 Operación Zlevel en el perfil de leva.....	84
Figura 3.64 Operación Zlevel detalle de montaje superior	84

Figura 3.65 Post procesado	85
Figura 3.66 Comparador de reloj para herramienta	85
Figura 3.67 Panel ingreso de variables.....	86
Figura 3.68 Refrigerante sobre pieza	86
Figura 3.69 Perfil final maquinado	87
Figura 3.70 Corte por electro hilo	87
Figura 3.71 Vista frontal levas manufacturadas.....	88
Figura 3.72 Vista posterior levas manufacturadas	88
Figura 3.73 Arduino PWM.....	89
Figura 3.74 Optoacoplador 4N25.....	90
Figura 3.75 Circuito cambio de giro	90
Figura 3.76 Corriente de led vs. Corriente de colector 4N25	91
Figura 3.77 Transistor mosfet STF18N60M2	92
Figura 3.78 Circuito regulador de tensión.....	93
Figura 3.79 Circuito variación de velocidad	93
Figura 3.80 Circuito combinado control	95
Figura 3.81 Activación de relé fuente de alimentación.....	95
Figura 3.82 Filtro pasivo pasobajo acelerómetro	97
Figura 3.83 Divisor de tensión resistivo sensor óptico	97
Figura 3.84 Circuito paro de emergencia	99
Figura 3.85 Conexiones alimentación acelerómetro, potenciómetro	99
Figura 3.86 Conexiones Arduino	100
Figura 3.87 Diagrama de flujo diseño circuito impreso.....	101
Figura 3.88 Especificación para pads de soldadura	101
Figura 3.89 Especificación de centrado de componentes	102
Figura 3.90 Sección transversal vs. Intensidad de corriente	102
Figura 3.91 Sección transversal vs. Ancho del conductor	103
Figura 3.92 Diseño de circuito impreso	104
Figura 3.93 Vista 3D diseño de circuito.....	104
Figura 3.94 Ventana de inicio	105
Figura 3.95 Ventana control PC.....	106
Figura 3.96 Pestaña desplazamiento de leva.....	107

Figura 3.97 Pestaña velocidad de leva	107
Figura 3.98 Ventana control manual	108
Figura 4.1 Condiciones iniciales del equipo Tecquipment TM21 062	109
Figura 4.2 Desmontaje de elementos fase 1	110
Figura 4.3 Desmontaje de elementos fase 2	110
Figura 4.4 Desmontaje final	111
Figura 4.5 Cambio de lubricante	112
Figura 4.6 Despintado y pulido de piezas	112
Figura 4.7 Diseño de soporte para sensores	113
Figura 4.8 Implementación de soporte	114
Figura 4.9 Protecciones sensores	114
Figura 4.10 Reemplazo de rodillo	115
Figura 4.11 Cambio de marcas en volante	115
Figura 4.12 Caja de control	116
Figura 4.13 Pines conector 1	117
Figura 4.14 Pines conector 2	117
Figura 4.15 Identificación de conectores.	118
Figura 4.16 Soldadura de componentes	118
Figura 4.17 Montaje y protección de circuito impreso	119
Figura 4.18 Vista interior de conexiones	119
Figura 4.19 Sistema implementado	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.....	75
----------------	----

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1	46
Cuadro 3.1	52
Cuadro 3. 2.....	53
Cuadro 3.3.....	56
Cuadro 3.4.....	59
Cuadro 3.5.....	62
Cuadro 3.6.....	65
Cuadro 3.7.....	67
Cuadro 4. 1	116
Cuadro 6.1	133
Cuadro 6.2.....	134
Cuadro 6.3.....	134
Cuadro 6.4.....	134
Cuadro 6.5.....	135
Cuadro 6.6.....	135
Cuadro 6.7.....	136

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad la rehabilitación y automatización del equipo experimental de levas Tecquipment TM21 062 para efectuar un estudio teórico y práctico de la incertidumbre proveniente de la manufactura de levas. El laboratorio de mecanismos provee a los estudiantes de las carreras de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE las horas prácticas en las cuales validen sus conocimientos teóricos con los equipos. El excesivo uso de los mismos y el poco mantenimiento ha ocasionado que el desempeño de los equipos disminuya y el alcance práctico sea muy limitado al punto de llegar a ser inoperante. Por este motivo se implementó el sistema de instrumentación para la adquisición de datos, control de velocidad e interfaz gráfica, con lo cual el estudiante ya no solo verá el movimiento físico de leva, sino también podrá observar las curvas que genera la misma en desplazamiento, velocidad y aceleración, modificando la velocidad de giro para visualizar la variación de las mismas. Con el fin de comprobar el estudio realizado por los ingenieros Fernando Olmedo, Jaime Echeverría y el Doctor Marcelo Piovan, se complementó el proyecto con el enfoque de conocer la incertidumbre ocasionada en la manufactura de una leva, entendiéndose a la misma como un estudio estadístico aplicado a los sistemas mecánicos para encontrar respuestas más acordes a la realidad, con tal objetivo se manufactura tres tipos de levas: polinómica 345, armónica y Bezier, las cuales después de su manufactura no pasarán por ningún otro proceso de tal manera que se pueda obtener resultados en la variación del seguidor a una determinada velocidad.

- **AUTOMATIZACIÓN TECQUIPMENT TM21 062.**
- **INCERTIDUMBRE MANUFACTURA.**
- **CURVAS DE LEVA TIEMPO REAL.**
- **CURVAS DE BEZIER.**
- **MANUFACTURA DE LEVAS.**

SUMMARY

This project is aimed at rehabilitation and automation of the Tecquipment TM21 062 cam experimental equipment to make a theoretical and practical study of the uncertainty arising from the manufacture of cams. The mechanisms lab provides to Mechanical Engineering and Mechatronics at the University of the Armed Forces-ESPE students hour's practices which validate their theoretical knowledge with the equipment. The overuse of these and low maintenance has caused the decrease equipment performance and practicality very limited scope until getting to be inoperative. This is why the instrumentation system for data acquisition, control speed and graphical interface was implemented, which the student will not see only the physical movement of cam, but will also see the curves generated in the same shift, speed and acceleration modifying the speed to display the variation thereof. In order to check the study by engineers Fernando Olmedo, Jaime Echeverria and Dr. Marcelo Piovan, the project was complemented with the approach of knowing the uncertainty caused in the manufacture of a cam, meaning thereto as a statistical study applied the mechanics to find more according to the reality answers systems, with this aim three types of cams are manufacturing: polynomial 345, harmonica and Bezier, which after manufacturing not pass through any other process, so as to obtain results the variation of the follower at a certain speed.

- **AUTOMATION TECQUIPMENT TM21 062.**
- **UNCERTAINTY MANUFACTURING.**
- **REAL TIME CAM CURVES.**
- **BEZIER CURVES.**
- **CAM MANUFACTURING.**

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes.

El laboratorio de mecanismos del departamento de Ciencias De la Energía Y Mecánica, dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se crea con el fin de dar aplicación práctica a procesos dinámicos estudiados en mecánica, como lo son movimiento de levas, balanceo de sistemas, sistema de engranes, movimiento de cuatro barras, etc.

El presente proyecto se enfoca en el módulo de aplicación para análisis de levas Tecquipment TM21 062.

En la actualidad dicho módulo es usado por los estudiantes y profesores tutores de las carreras de ingeniería Mecánica y Mecatrónica. El módulo está compuesto de un motor eléctrico tipo shunt, acoplado al eje de leva y un seguidor de rodillo con cierre por fuerza mediante un resorte.

En las prácticas, el profesor tutor acopla una leva al eje y regula la velocidad del motor por medio de un reóstato. La velocidad en la práctica, únicamente se la conoce por porcentaje de giro de reóstato en un rango de 0 a 100%. La forma actual de funcionamiento no provee al estudiante los datos, como posición, velocidad y aceleración del seguidor, menos aún los diagramas generados a partir de estos datos, que harían de la práctica más demostrativa frente a lo estudiado en las aulas.

El equipo ha estado en los laboratorios varios años, en el que su funcionalidad se ha ido deteriorando a medida que transcurren los semestres, debido que el mismo es utilizado tanto para la carrera de Ingeniería Mecánica como para la carrera de Ingeniería Mecatrónica, y desde su llegada no ha sido sometido a un mantenimiento. Exceptuando una tesis previamente realizada en el año 2009, en la cual sus resultados no fueron los esperados y necesarios para que esté en un buen estado de funcionamiento.



Figura 1.1 Estado previo del equipo

A partir del análisis previo, se pone en ejecución el presente proyecto de tesis con el fin de desarrollar la automatización del equipo y realizar un estudio de incertidumbre en la manufactura con el diseño y fabricación de varios tipos de levas. Esto enfocado en la investigación realizada por el Dr. Ing. Marcelo Tulio Piovan (Prometeo asignado al DECEM) y los Ing. Fernando Olmedo y Jaime Echeverría, para caracterizar y estudiar la incertidumbre proveniente de la manufactura en la superficie de una leva maquinada, sin pasar por los costosos procesos de pulido.

1.1 Alcance.

El presente proyecto se enfoca en la optimización de los recursos del laboratorio de mecanismos que posee la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE sede Sangolquí, con la intención de rehabilitar y automatizar el equipo de levas Tecquipment TM21 062, logrando que el estudiante aproveche por completo la funcionalidad del equipo, realizando un estudio tanto teórico como práctico.

La importancia de la automatización radica en realizar un cambio en el manejo del equipo, en lugar de utilizar un reóstato y modificar la velocidad del motor de forma manual, se desea una independencia en el control de velocidad, mediante el diseño de un circuito electrónico de control y potencia, el cual será ejecutado en un interfaz agradable al usuario. Por cuestiones de uso se implementará también un modo manual, en el cual el operador podrá utilizar el reóstato, esto en el caso de no disponer de un ordenador al momento de realizar la práctica.

Empleando nuevas tecnologías en software y hardware será posible mostrar en una pantalla en tiempo real las funciones:

- Posición.
- Velocidad.
- Aceleración.

De las levas que se utilicen en la práctica. Con esta opción el estudiante podrá tomar datos provenientes de la interfaz y comprobar con los diseños en el aula.

En cuanto al estudio de incertidumbre proveniente de la manufactura, se dará respuesta práctica al estudio teórico realizado por los autores nombrados preliminarmente. En base al mismo, se procederá a diseñar los tipos de levas con los cuales se efectuará dicho estudio; integrando el mantenimiento del equipo, la manufactura de levas con las herramientas CAD/CAM/CAE y el desarrollo de una interfaz gráfica que proporcionará los resultados que los investigadores han propuesto.

1.2 Justificación e importancia.

En la actualidad se busca mejorar y automatizar las máquinas con mano de obra ecuatoriana, en contraposición de comprar nuevos dispositivos costosos y que requerirán la calibración por expertos extranjeros, es lo que precisamente se buscó con el presente proyecto, mejorar la utilización del equipo de levas Tecquipment TM21 062 que no se encontraba en las mejores condiciones y brindar a las nuevas generaciones una experiencia más visual e interactiva de lo que es un equipo de levas.

Previamente el equipo era limitado a una tarea bastante básica, que únicamente permitía ver el movimiento rotacional de una leva y el consiguiente movimiento de traslación del seguidor, este ejercicio no representaba mayor aporte en los conocimientos prácticos de la teoría de levas al no tener de manera gráfica los datos no visuales como velocidad y aceleración.

El proyecto permitirá al estudiante verificar prácticamente los diagramas que se han podido obtener en la teoría, y reforzar sus conocimientos.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

Automatizar y rehabilitar el equipo de levas Tecquipment TM21 062 del laboratorio de mecanismos de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Efectuar un estudio teórico y experimental de la incertidumbre proveniente de la manufactura.
- Desarrollar un sistema de monitoreo y control que permita visualizar las variables predominantes y necesarias en el estudio de levas.
- Diseñar y manufacturar distintos tipos de levas a probar en el equipo automatizado, implementando conocimientos de mecanismos y sistemas CAD/CAM/CAE.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Principios de incertidumbre y análisis de sensibilidad.

La ingeniería Mecánica Probabilística tiene como fin el análisis de las incertidumbres (falta de certeza) que se generan en los parámetros de entrada de la mayoría de modelos mecánicos. Así como su estudio en el impacto sobre la respuesta que suceda en el modelo. Este tipo de estudio se encuentra en una simbiosis entre la mecánica, estadística y teoría de la probabilidad. Aplicando para su desarrollo las numerosas aplicaciones matemáticas como análisis de elementos finitos estocásticos y vibraciones aleatorias.

Los esquemas globales para tratar con incertidumbres cumplen tres pasos o etapas, la definición del modelo matemático del sistema físico a ejecutar, la caracterización probabilística de la incertidumbre en los parámetros de entrada y la propagación de la incertidumbre a través del modelo.

Los métodos para la construcción del modelo probabilístico de los parámetros de entrada son dados a partir de los principios de máxima entropía, clásica e inferencia bayesiana. El modelado de datos variables utilizando campos aleatorios.

Los métodos de propagación de incertidumbre a usarse suelen ser, el método de simulación, de perturbación y cuadratura de Monte Carlo, además de los métodos existentes como el FORM SORM y muestreo de importancia.

En el enfoque estadístico, los métodos de propagación de incertidumbre tienen como base los modelos probabilísticos de los parámetros de entrada.

Ejemplos donde se utilizaron estas herramientas probabilísticas fueron para el diseño de fatiga térmica de tuberías en plantas de energía nuclear, estudios de durabilidad de las torres de refrigeración y la mecánica de fractura no lineal de tuberías agrietadas.

2.1.1 Historia de la modelización.

Las bases de la ciencia moderna se suelen atribuir a Descartes, Galileo y Newton, los cuales incorporaron el formalismo riguroso de las matemáticas en la física. De tal manera que un fenómeno físico se lo puede representar y ser definido en un conjunto de ecuaciones, cuyo resultado genera observaciones experimentales.

En un principio los modelos ayudaron a los científicos a dar solución a las leyes de la física, para citar ejemplos como la gravitación, la óptica, el electromagnetismo, etc.

A partir del siglo 20, lo que fueron casos experimentales, han evolucionado y el modelo es hoy en día la herramienta ineludible de ingenieros para el diseño, fabricación, operación y seguimiento de sistemas industriales, o estructuras civiles, según sea el caso.

Con el paso del tiempo, se generó un avance agigantado con la aparición de la simulación por ordenador. Los algoritmos realizados de forma manual, pasaron a ser efectuados mediante la técnica computacional, permitiendo a los analistas resolver las ecuaciones derivadas de sus modelos de complejidad cada vez más rápido y con mayor precisión. Los sistemas computarizados han llegado a convertirse en una herramienta de uso cotidiano, tanto para los estudiantes como para los profesionales.

Las aplicaciones indiscutibles se encuentran en la industria, en el diseño de productos manufacturados (aviones, automóviles, puentes, plantas de energía nuclear). También es muy usado en predicciones (meteorología, cambio climático, contaminación del aire).

Hay que tomar en cuenta que a pesar de la gran exactitud que actualmente representa el poder de las computadoras, los modelos nunca serán capaces de atrapar integralmente la complejidad del mundo real y todas sus variables. De hecho, siempre se basa sobre las interacciones de supuestos, que generalmente se validan a posteriori por causa experimental.

Los modelos son alimentados por valores, siendo estos parámetros de entrada cuya estimación puede ser incierta o inexacta. La probabilidad en la incertidumbre hace frente a estos inciertos.

2.1.2 Propagación de incertidumbre y análisis de sensibilidad.

Los estudios probabilísticos tienen como objetivo el análisis de incertidumbres que aparecen en los modelos de sistemas físicos, y estudiar el impacto de dichas incertidumbres sobre la respuesta que ofrezca el sistema. En este campo se encuentra la intersección de las ramas de la física (ingeniería civil, ambiental, y mecánica) y las matemáticas en el otro lado (estadística, probabilidad y simulación por ordenador).

La aplicabilidad puede ser en ingeniería química, electromagnetismo, neutrónica etc.

Los pasos principales para este tipo de análisis se resumen en la Figura 2.1.

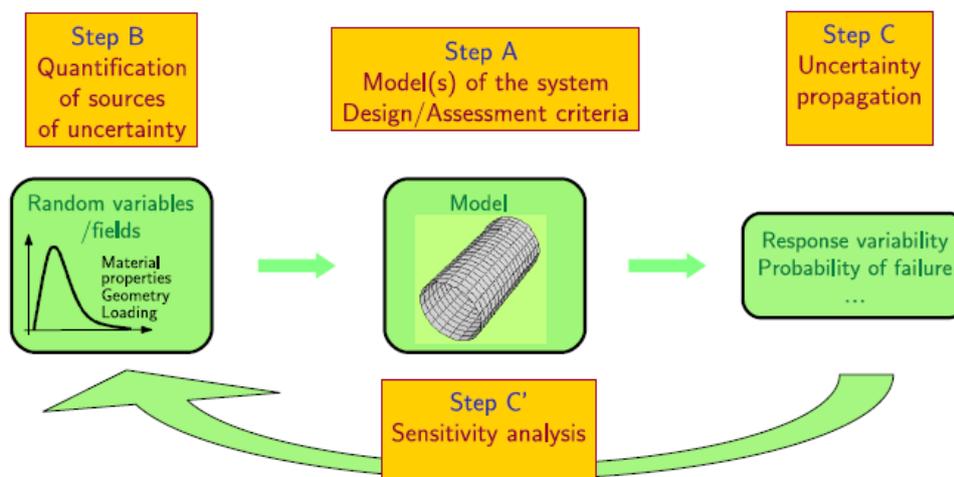


Figura 2.1 Bosquejo propagación de incertidumbre

(Sudret, 2008)

Paso A.

Consiste en la definición del modelo o secuencia de modelos y criterios a elegir, que se deben utilizar para evaluar el sistema físico considerado. En caso de complejos sistemas o diversos enfoques, se requiera la identificación clara de la entrada y salida de cada submodelo. Este paso reúne todos los elementos utilizados para un análisis determinista clásico del sistema físico a analizar.

Paso B.

Este paso abarca la cuantificación de las fuentes de incertidumbre, la identificación de los parámetros de entrada que no son muy conocidos y modelarlos en un contexto probabilístico.

El resultado final de este paso es un vector aleatorio de parámetros de entrada. En algunos casos, la descripción del tiempo (respuesta espacial) la variabilidad de los parámetros requiere la introducción de procesos aleatorios (respuesta de campos aleatorios).

Paso C.

En el paso C se caracteriza por la propagación de la incertidumbre en la entrada a través del modelo, esto no es más que la caracterización de la respuesta al azar con respecto a los criterios de evaluación definidos en el Paso A.

Proporciona información sobre el impacto respecto al azar de los parámetros de entrada, sobre la aleatoriedad de respuesta. La jerarquización de los parámetros de entrada se conoce como análisis de sensibilidad.

Estos pasos principales se describen ahora en detalles:

2.1.2.1 Modelos de sistemas físicos (Paso A).

Para fines explicativos un modelo de sistema físico será interpretado como una función general $M: \mathbf{x} \mapsto \mathbf{y} = M(\mathbf{x})$, con condiciones de regularidad suficientes para que existan derivados posteriores. En esta notación los parámetros de entrada del modelo se recogen en un vector $\mathbf{x} \in \mathcal{D} \subset \mathbb{R}^M$, el vector de respuesta es $\mathbf{y} = M(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^N$.

El modelo puede ser una simple función definida por su expresión matemática. Puede ser además una función a ejecutar en el ordenador, que toma valores de entrada y obtiene el resultado. En este caso el modelo M , se lo conoce a través de las evaluaciones de $\mathbf{y}^{(i)} = M(\mathbf{x}^{(i)})$ para cada vector de entrada $\mathbf{x}^{(i)}$, para la compilación del ordenador.

Para la ingeniería civil y mecánica son de interés entradas como:

- Parámetros que describen geometría del sistema, dimensiones, longitud, elementos estructurales, secciones transversales, etc.
- Parámetros que describen las leyes constitutivas de materiales, módulos de Young, relaciones de Poisson, rendimiento de tensiones, parámetros de endurecimiento, etc.
- Parámetros que describan la carga del sistema, presión aplicada, un estado pretensado, un campo de tensión inducida por la temperatura.
- Parámetros que describan las condiciones de contorno, desplazamiento de contactos.

En contraste, las cantidades de respuesta incluyen generalmente:

- Desplazamientos, vectores de desplazamiento nodales en el contexto de análisis de elementos finitos.
- Componentes de elasticidad, tensor, acumulativos de deformación plástica.
- Temperatura, etc.

Para estudios se supone implícitamente que el modelo es suficientemente preciso para predecir el comportamiento del sistema, pero se incorpora parámetros que describen el modelo incertidumbre, es decir factores de corrección que se le dará una descripción probabilística similar a la física. De tal manera que con los factores de corrección se puede predecir el comportamiento real del sistema.

2.1.2.2 Cuantificación de fuentes de incertidumbre (Paso B).

Un sistema diseñado es un objeto abstracto, el cual los parámetros del modelo y de entrada asociados, se han seleccionado de tal manera que los criterios de diseño se cumplan. En contraste, un sistema real es un objeto físico que ha sido construido de acuerdo a un diseño dado.

En la práctica, un sistema real no coincide completamente con el diseño inicial, al menos por las siguientes razones:

- Las dimensiones del sistema real no corresponden exactamente con el diseño, debido a la imperfección en el proceso de fabricación.
- Las propiedades del material del sistema real pueden diferir ligeramente de las propiedades codificadas del tipo de material que supone ser.
- La carga (respuesta a condiciones de contorno) del sistema diseñado están idealizadas para que más o menos represente la complejidad del sistema real.

Por las razones dichas, el modelamiento de los parámetros de entrada en un contexto probabilístico tiene fundamento.

La incertidumbre que afecta a los parámetros de entrada puede ser de varios tipos. Se clasifican de la siguiente manera:

Incetidumbre aleatoria.

Se refiere a situaciones en las que existe una variabilidad natural en el fenómeno bajo consideración. Ejemplo, el número de ciclos hasta el fallo de una muestra sometida a carga por fatiga, muestra la incertidumbre aleatoria, ya que el tiempo de vida varía experimentalmente de otra probeta del mismo material sometida a las mismas condiciones.

Incertidumbre epistémica.

Se refiere a la falta de conocimiento. Ejemplo, la resistencia a la compresión de concreto, en una obra de construcción la falta de conocimiento inicial para la medición de resistencia a la compresión de cualquier tipo de hormigón.

Cuando se dispone de datos, el establecimiento de un modelo probabilístico que presenta la dispersión es meramente un problema de estadística.

El resultado de la Etapa B es el vector aleatorio de parámetros de entrada X .

2.1.2.3 Propagación de incertidumbre (Paso C).

Considerando un modelo $M: x \mapsto y = M(x)$ y suponiendo una descripción probabilística de la entrada de parámetros, en términos de un vector aleatorio X . La respuesta al azar se define por $Y = M(X)$.

El objetivo principal de la ingeniería mecánica probabilística es estudiar el contenido probabilístico de Y , es decir, su función de densidad de probabilidad conjunta $f_Y(y)$. Sin embargo esta función no es directamente computable excepto en los casos académicos más simples.

Los métodos para la propagación de incertidumbre se clasifican en tres grupos de acuerdo a la información específica sobre la respuesta al azar que se busca.

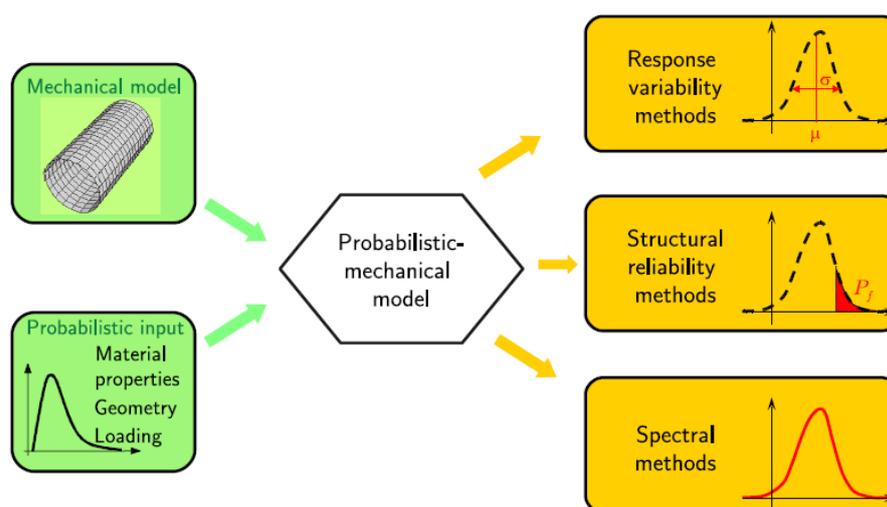


Figura 2.2 Clasificación de los métodos de propagación de incertidumbre

(Sudret, 2008)

Método momento.

Tratan de calcular el valor de la media y la varianza de la respuesta del modelo.

Método de fiabilidad estructural.

Trata esencialmente de investigar los restos de la respuesta, mediante el cálculo de la probabilidad de exceder un pre-umbral descrito (probabilidad de fallo).

Métodos espectrales.

Representan la aleatoriedad completa de la respuesta de una manera intrínseca. También conocido como métodos de los elementos finitos estocásticos en el contexto de la mecánica computacional.

2.1.2.4 Análisis de sensibilidad (Paso C').

El modelamiento de sistemas complejos requiere un gran número de parámetros a su entrada. La mayor parte de problemas reales, solo un número limitado de parámetros de entrada pasa a influir en la aleatoriedad dentro de la respuesta significativa.

El análisis de la sensibilidad tiene como objetivo seleccionar los parámetros importantes, por lo general definir medidas de importancia cuantitativa o índices de sensibilidad que permitan al analista clasificar cada uno.

2.2 Mecanismo leva-seguidor.

Se conoce como leva a un cuerpo sólido con una forma determinada, de manera que su movimiento provoca el desplazamiento de otro cuerpo, conocido como seguidor o palpador, que se mantiene en todo momento en contacto con la leva.

El movimiento motriz invariablemente lo realiza la leva, que al poseer cierto perfil, hace que el seguidor reproduzca de forma lineal el mismo.

El mecanismo es un generador de funciones bastante flexible y útil, tanto así que virtualmente se puede diseñar cualquier función de salida y crear un perfil de leva para reproducirlo en el movimiento del seguidor.

Este tipo de mecanismo es ampliamente utilizado en toda clase de máquinas ya que es capaz de generar complejos movimientos periódicos con buena precisión a un costo razonable.

2.2.1 Clasificación.

El mecanismo se clasifica de algunas maneras, las más relevantes son las siguientes:

Por el tipo de movimiento del seguidor.

En esta categoría entran los seguidores de tipo trasladante y oscilante. En el primero se obtiene una traslación rectilínea, en el segundo una rotación pura. Su elección dependerá de la aplicación.

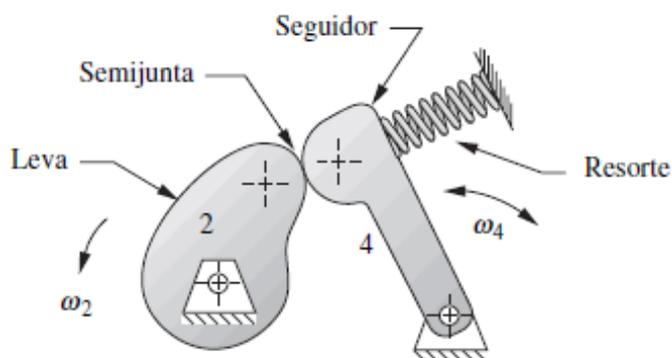


Figura 2.3 Movimiento de seguidor oscilante

(Norton, 2009)

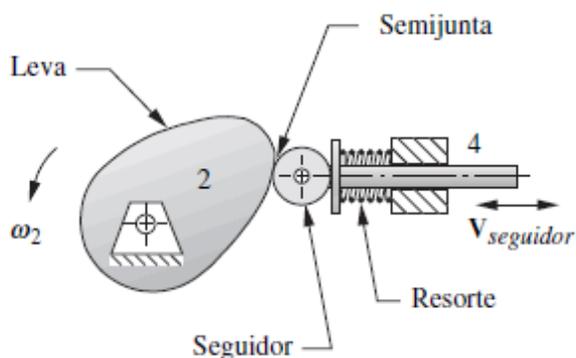


Figura 2.4 Movimiento de seguidor trasladante

(Norton, 2009)

Por el tipo de cierre de junta.

Pueden ser de fuerza o de forma. El de fuerza requiere aplicar una fuerza externa para mantener en contacto a leva y seguidor, la que es proporcionada por un resorte. Como se muestra en las Figuras 2.3 y 2.4.

El cierre de forma no necesita una fuerza exterior ya que cierra la junta por geometría.

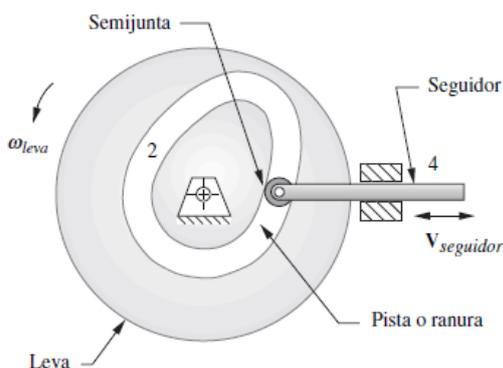


Figura 2.5 Cierre de junta de forma

(Norton, 2009)

Por el tipo de leva.

El movimiento del seguidor es quien determina si la leva es radial o axial. Una leva es radial si el movimiento del seguidor se realiza en una dirección radial. Si la leva es axial, el seguidor se mueve paralelo al eje de rotación de la leva.

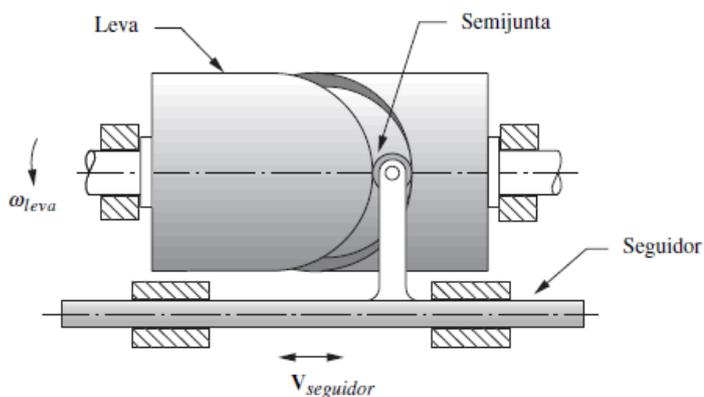


Figura 2.6 Leva tipo axial

(Norton, 2009)

Por el tipo de seguidor.

Se pueden encontrar comúnmente de cuatro tipos, de rodillo, hongo, cara plana y de punta. Los cuales son escogidos obviamente según la aplicación. Aquellos de rodillo son preferidos por la baja fricción pero tienden a ser costosos. Los de punta u hongo tienen la desventaja de ser muy propensos a desgaste.

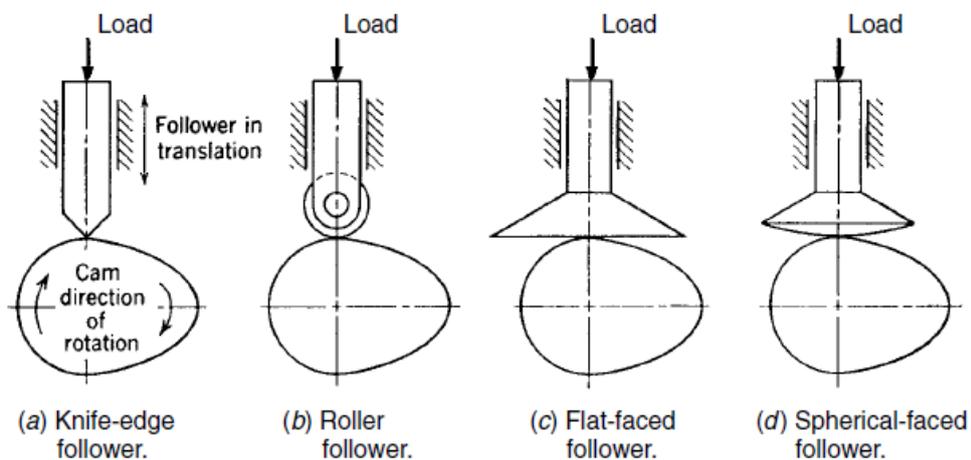


Figura 2.7 Por el tipo de seguidor

(Rothbart, 2004)

2.2.2 Geometría de la leva.

Términos asociados al mecanismo.

Antes de empezar con el diseño de una leva es necesario conocer los términos que se relacionan a la misma, tanto en su geometría como en la notación y simbología utilizada en sus ecuaciones y diagramas asociados.

h	Elevación o longitud de subida/bajada, unidades de longitud.
t	Tiempo, segundos.
θ	Ángulo de leva, variable independiente en las funciones de leva, grados o radianes.
β	Periodo de segmento de leva, grados o radianes.
ω	Velocidad angular de leva, radianes/segundo o revoluciones por minuto.
s	Función desplazamiento de seguidor, unidades de longitud.
v	Velocidad de seguidor en función del ángulo de leva, longitud/radianes o longitud/grados.
V	Velocidad de seguidor en función del tiempo, longitud/tiempo.
a	Aceleración de seguidor en función del ángulo de leva, longitud/radianes ² o longitud/grados ² .
A	Aceleración de seguidor en función del tiempo, longitud/tiempo.

- j Golpeteo de seguidor en función del ángulo de leva, longitud/radianes³ o longitud/grados³.
- J Golpeteo de seguidor en función del tiempo, longitud/tiempo.
- R_b Radio del círculo base, unidades de longitud.
- R_p Radio del círculo primario, unidades de longitud.
- R_f Radio seguidor de rodillo, unidades de longitud.
- ε Excentricidad, unidades de longitud.
- φ Ángulo de presión, grados o radianes.
- ρ Radio de curvatura, unidades de longitud.

Además es importante conocer que:

$$\theta = \omega t \quad \text{Ec 2.1}$$

La ecuación 2.1 relaciona el ángulo de leva con el tiempo al conocer la velocidad angular, lo que facilita la conversión de ángulo a tiempo y viceversa.

En la Figura 2.8 se muestra la nomenclatura del mecanismo leva-seguidor.

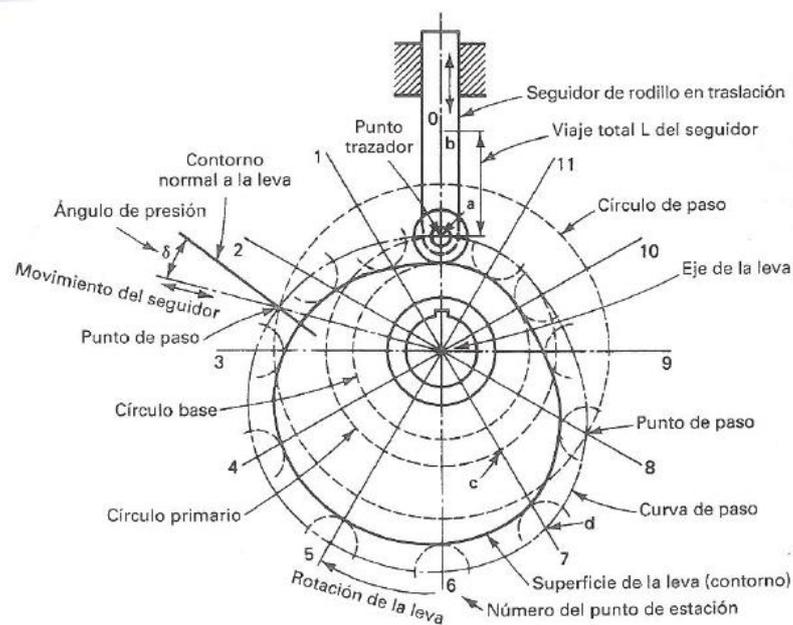


Figura 2.8 Nomenclatura mecanismo leva-seguidor

(Erdman & Sandor, 1998)

Punto de trazo.

Punto teórico ubicado en el centro del seguidor de rodillo.

Curva de paso.

Lugar geométrico que se genera por el punto de trazo. Describe una trayectoria similar al perfil de leva.

Círculo primario.

Círculo más pequeño que puede ser trazado con centro en el eje de rotación y además tangente a la curva de paso.

Círculo base.

Círculo más pequeño que puede ser trazado con centro en el eje de rotación y tangente al perfil de leva.

Ángulo de presión.

El ángulo de presión es el ángulo generado entre dos sólidos, es este caso, entre el seguidor y el perfil de leva.

Está comprendido entre la dirección de desplazamiento de seguidor y la línea de fuerza ejercida por la leva sobre el seguidor (normal común a ambas superficies).

Es un parámetro importante pues se puede predecir la facilidad con la que la leva transmite el movimiento hacia el seguidor. Un ángulo de presión elevado producirá una fuerza considerable sobre el vástago del seguidor, lo que provocará que se flexione sobre su guía causando mayor desgaste y vibraciones por fricción. Algunos autores afirman que para un correcto funcionamiento, el ángulo de presión no debe exceder los 30° en valor absoluto.

Puede ser calculado mediante la expresión:

$$\varphi = \arctan \frac{v - \varepsilon}{s + \sqrt{R_p^2 - \varepsilon^2}} \quad \text{Ec 2.2}$$

Donde la velocidad en la expresión se encuentra en unidades de longitud/rad y las demás en unidades de longitud compatibles. Además, ε representa la excentricidad del eje de la leva y el seguidor, que en el caso del equipo Tecquipment TM21 062 es nula.

Radio de curvatura.

Es también un parámetro importante en el diseño de una leva. El radio de curvatura posee un concepto simple, no importa la forma de una curva, ésta tendrá un

radio instantáneo de curvatura en cada uno de sus puntos. Estos puntos tendrán centros instantáneos que pueden estar en el infinito.

La regla empírica que se plantea en los diferentes textos es que el valor absoluto del radio de curvatura mínimo sea de entre 2 a 3 veces el radio del seguidor de rodillo.

$$|\rho_{\min}| \gg R_f \quad \text{Ec 2.3}$$

El radio de curvatura de paso puede ser calculado mediante la expresión:

$$\rho_{paso} = \frac{[(R_p + s)^2 + v^2]^{3/2}}{(R_p + s)^2 + 2v^2 - a(R_p + s)} \quad \text{Ec 2.4}$$

2.2.3 Ley Fundamental del Diseño de Levas.

Para efectuar un correcto diseño de una leva, ésta debe cumplir con ciertas restricciones para lograr que sea completamente operable y funcional, la principal condición es aquella conocida como la Ley Fundamental del Diseño de Levas, que indica lo siguiente:

‘La función de leva debe ser continua en la primera y segunda derivadas de desplazamiento a través de todo el intervalo (360 grados).’

Básicamente lo que afirma es que no debe existir discontinuidad alguna en las funciones de velocidad y aceleración, por lo que la función desplazamiento normalmente no puede ser definida por una sola expresión matemática, sino debe serlo por funciones a tramos o segmentos a lo largo del perfil de leva.

2.2.4 Secuencia de diseño.

Según (Cardona & Clos, 2001), la secuencia de diseño del mecanismo, en lo que concierne a aspectos tanto geométricos como dinámicos es la siguiente:

- Especificación de la ley de desplazamiento.
- Obtención del perfil de leva que impulsa un seguidor determinado según la ley de desplazamiento que sea necesaria o especificada.
- Comprobación del perfil, el cual no debe presentar características que impidan un correcto contacto leva-seguidor.

Es el procedimiento actual, ya que antiguamente por la escasa o nula existencia de ordenadores y máquinas de control numérico se buscaban perfiles de fácil mecanización y diseño, para escoger aquel que producía el desplazamiento más aproximando al buscado.

2.2.5 Movimiento armónico simple.

Para una leva que posea únicamente movimiento armónico simple y cumpla con la Ley Fundamental del Diseño de Levas es el caso de ascenso y descenso consecutivo, es decir, subida en 180° y bajada en 180° , sin detenimiento alguno. Únicamente de esta manera las funciones serán continuas en los diagramas de posición, velocidad y aceleración, cumpliendo con la Ley Fundamental.

Las ecuaciones para un movimiento armónico simple de ascenso son las siguientes:

$$s = \frac{h}{2} \left[1 - \cos \left(\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \right] \quad \text{Ec 2.5}$$

$$v = \frac{\pi h}{\beta} \sin \left(\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \quad \text{Ec 2.6}$$

$$a = \frac{\pi^2 h}{\beta^2} \cos \left(\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \quad \text{Ec 2.7}$$

$$j = -\frac{\pi^3 h}{\beta^3} \sin \left(\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \quad \text{Ec 2.8}$$

Las cuales, graficándolas con las siguientes condiciones, resultan:

$$h = 1 \text{ pulg.}$$

$$\beta = 180^\circ$$

$$\omega = 60 \text{ rpm}$$

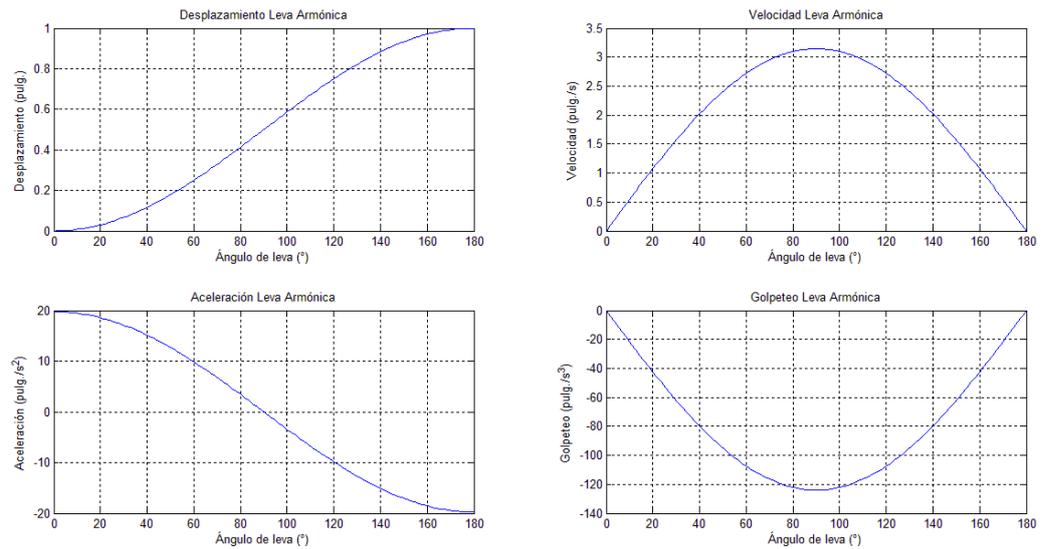


Figura 2.9 Curvas leva armónica ascenso

Mientras que las ecuaciones para el segmento de bajada resultan ser:

$$s = \frac{h}{2} \left[1 + \cos \left(\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \right] \quad \text{Ec 2.9}$$

$$v = -\frac{\pi h}{\beta} \frac{1}{2} \operatorname{sen} \left(\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \quad \text{Ec 2.10}$$

$$a = -\frac{\pi^2 h}{\beta^2} \frac{1}{2} \cos \left(\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \quad \text{Ec 2.11}$$

$$j = \frac{\pi^3 h}{\beta^3} \frac{1}{2} \operatorname{sen} \left(\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \quad \text{Ec 2.12}$$

Con las mismas condiciones anteriores, las gráficas son las siguientes:

$$h = 1 \text{ pulg.}$$

$$\beta = 180^\circ$$

$$\omega = 60 \text{ rpm}$$

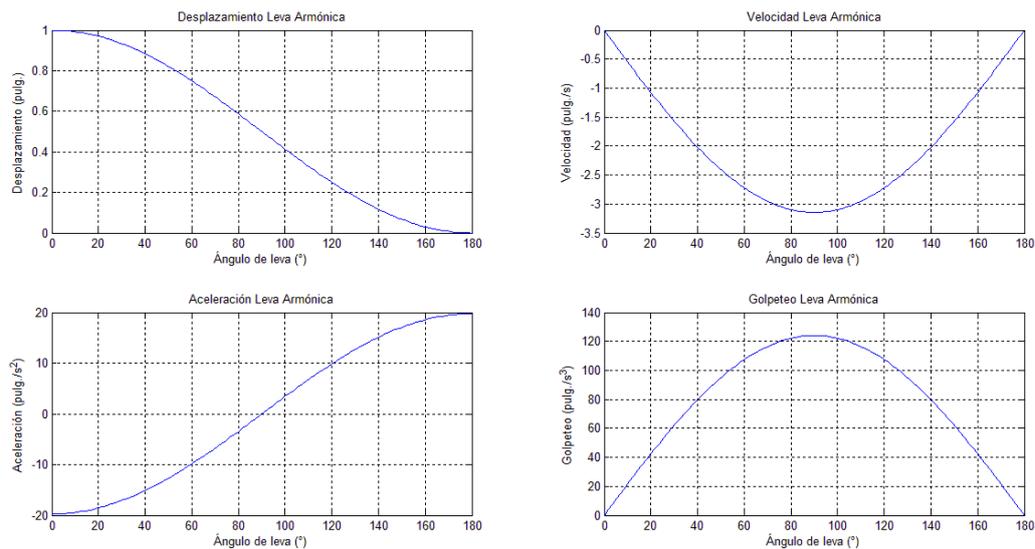


Figura 2.10 Curvas leva armónica descenso

Para explicar de mejor manera lo antes mencionado, se combinan ambos movimientos para obtener:

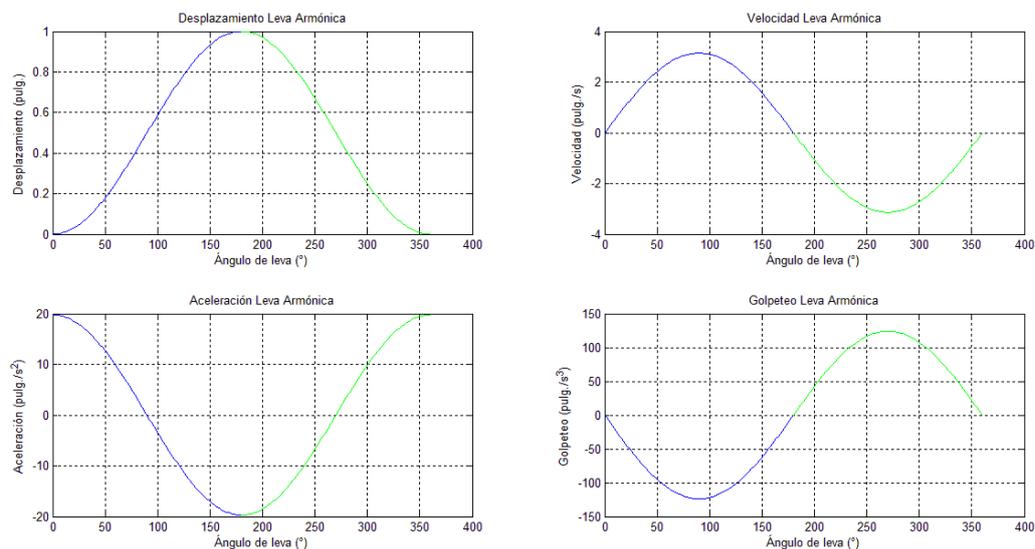


Figura 2.11 Curvas leva armónica

En las curvas fácilmente se puede observar que no es posible combinar el movimiento armónico simple con algún detenimiento, ya que es claro que la aceleración en los extremos de la curva es distinta de cero, por lo que no se cumpliría la Ley Fundamental.

2.2.6 Funciones de tipo polinómico.

Este tipo de funciones son quizá las más útiles, ya que son flexibles a las exigencias que se presentan en el diseño de una leva, pueden ser adaptadas a la variedad de especificaciones que presente el caso. Aunque presentan cierto inconveniente que puede provocar problemas. Al diferenciar este tipo de función, cada vez se reducen en un grado, por lo que eventualmente los polinomios degenerarán a grado cero, lo que inevitablemente concluirá en discontinuidades.

Este tipo de falla con los polinomios puede solucionarse si es obedecida la Ley Fundamental, iniciando en la función de desplazamiento con un polinomio de grado quinto, lo que asegurará una función cúbica en la aceleración, si se considera una leva con doble detenimiento.

La ecuación general de una función polinómica se define:

$$s = C_0 + C_1x + C_2x^2 + C_3x^3 + C_4x^4 + C_5x^5 + C_6x^6 + \dots + C_nx^n \quad \text{Ec 2.13}$$

Dónde:

- s Desplazamiento del seguidor.
- x Variable independiente, que para el caso es reemplazada por θ/β , o bien, el tiempo t .
- C_n Incógnitas a encontrar que satisfagan las exigencias del diseño.

Para el diseño es necesario primero definir cuántas condiciones de frontera son necesarias para solventar las especificaciones del problema. El número de las mismas determina el grado del polinomio obtenido.

Si existen k condiciones de frontera, el grado del polinomio será $n = k - 1$.

2.2.6.1 Leva polinómica 3 4 5.

Se establecen las condiciones de frontera para el segmento de ascenso, como se muestra en la Figura 2.12.

Ángulo de leva	Desplazamiento	Velocidad	Aceleración
$\theta = 0$	$s = 0$	$v = 0$	$a = 0$
$\theta = \beta$	$s = h$	$v = 0$	$a = 0$

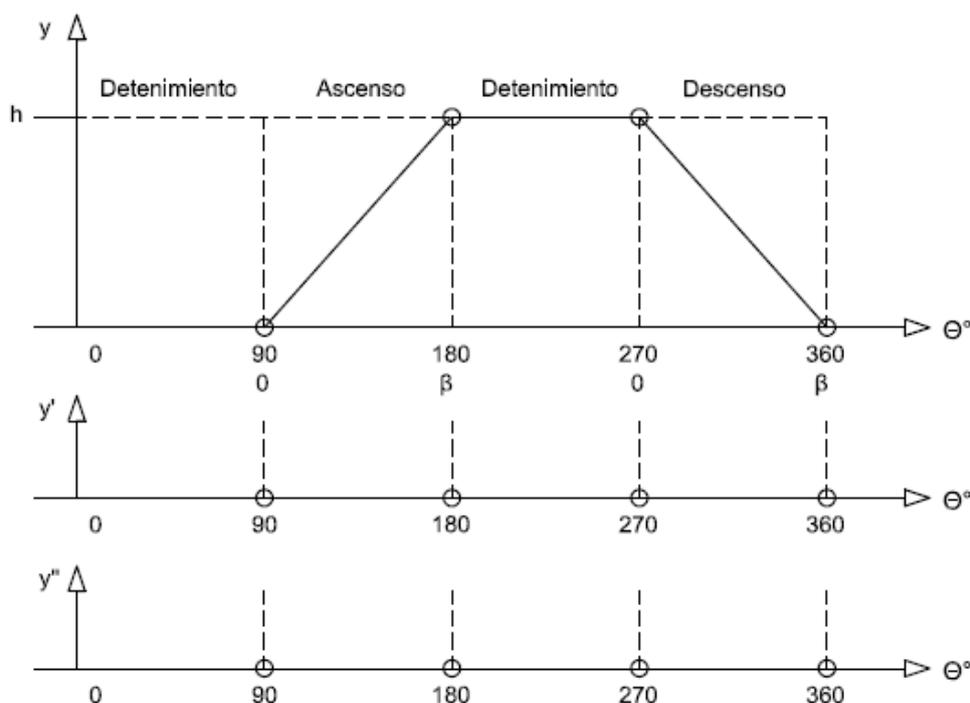


Figura 2.12 Condiciones de frontera leva polinómica 3 4 5

Se tienen seis condiciones de frontera para el caso, por lo que el polinomio será de quinto grado, la variable independiente será θ/β .

Al reescribir la ecuación general (Ec 2.13), resulta:

$$s = C_0 + C_1 \left(\frac{\theta}{\beta}\right) + C_2 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^2 + C_3 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^3 + C_4 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^4 + C_5 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^5 \quad \text{Ec 2.14}$$

Observando las condiciones de frontera, se hace necesario diferenciar la ecuación 2.14 en función de θ en dos ocasiones, para reemplazar los valores de dichas condiciones:

$$v = \frac{1}{\beta} \left[C_1 + 2C_2 \left(\frac{\theta}{\beta}\right) + 3C_3 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^2 + 4C_4 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^3 + 5C_5 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^4 \right] \quad \text{Ec 2.15}$$

$$a = \frac{1}{\beta^2} \left[2C_2 + 6C_3 \left(\frac{\theta}{\beta}\right) + 12C_4 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^2 + 20C_5 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^3 \right] \quad \text{Ec 2.16}$$

Sustituyendo las condiciones de frontera en las ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16.

$$\begin{aligned}0 &= C_0 \\h &= C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \\0 &= C_1 \\0 &= C_1 + 2C_2 + 3C_3 + 4C_4 + 5C_5 \\0 &= 2C_2 \\0 &= 2C_2 + 6C_3 + 12C_4 + 20C_5\end{aligned}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones lineales que se genera se obtiene.

$$\begin{aligned}C_0 &= C_1 = C_2 = 0 \\C_3 &= 10h \\C_4 &= -15h \\C_5 &= 6h\end{aligned}$$

Sustituyendo los valores obtenidos en las ecuaciones de posición, velocidad y aceleración:

$$s = h \left[10 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 15 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 6 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 \right] \quad \text{Ec 2.17}$$

$$v = \frac{h}{\beta} \left[30 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 - 60 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 + 30 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 \right] \quad \text{Ec 2.18}$$

$$a = \frac{h}{\beta^2} \left[60 \left(\frac{\theta}{\beta} \right) - 180 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 + 120 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 \right] \quad \text{Ec 2.19}$$

Se obtiene el golpeteo derivando la aceleración.

$$j = \frac{h}{\beta^3} \left[60 - 360 \left(\frac{\theta}{\beta} \right) + 360 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 \right] \quad \text{Ec 2.20}$$

En la Figura 2.13 se muestran las curvas teniendo en cuenta las condiciones:

$$\begin{aligned}h &= 1 \text{ pulg.} \\ \beta &= 90^\circ \\ \omega &= 60 \text{ rpm}\end{aligned}$$

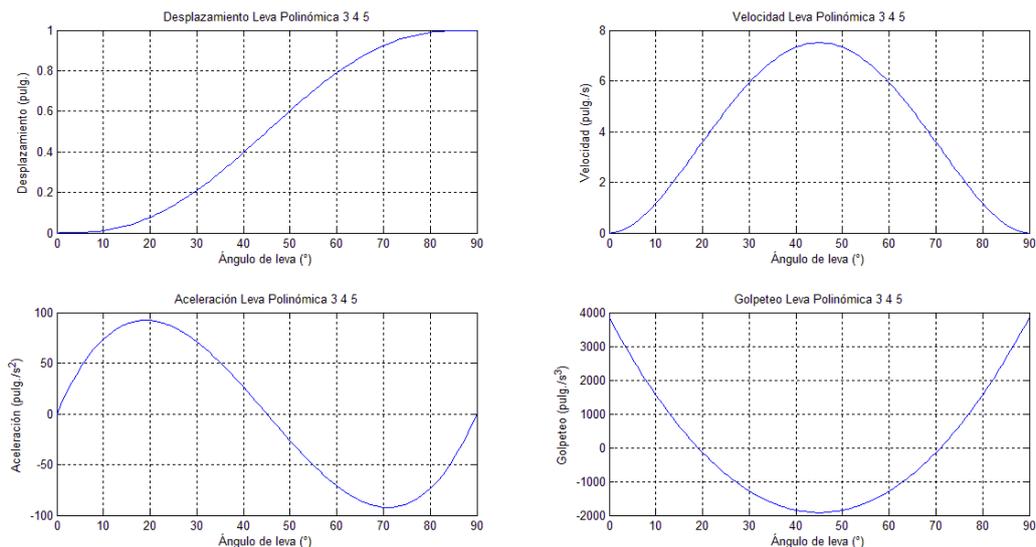


Figura 2.13 Curvas leva polinómica 3 4 5 ascenso

Aplicando un procedimiento similar al anterior, se pueden obtener las ecuaciones para el retorno completo.

Ángulo de leva	Desplazamiento	Velocidad	Aceleración
$\theta = 0$	$s = h$	$v = 0$	$a = 0$
$\theta = \beta$	$s = 0$	$v = 0$	$a = 0$

$$s = h \left[1 - 10 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 + 15 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 - 6 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 \right] \quad \text{Ec 2.21}$$

$$v = -\frac{h}{\beta} \left[30 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 - 60 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 + 30 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 \right] \quad \text{Ec 2.22}$$

$$a = -\frac{h}{\beta^2} \left[60 \left(\frac{\theta}{\beta} \right) - 180 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 + 120 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 \right] \quad \text{Ec 2.23}$$

$$j = -\frac{h}{\beta^3} \left[60 - 360 \left(\frac{\theta}{\beta} \right) + 360 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 \right] \quad \text{Ec 2.24}$$

En la Figura 2.14 se muestran las gráficas generadas por las ecuaciones que corresponden al descenso o retorno.

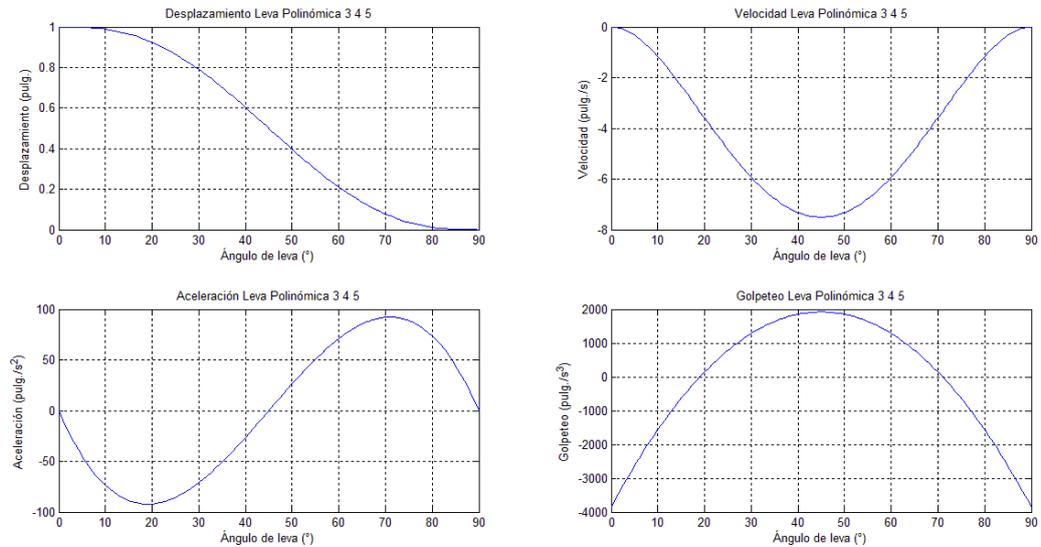


Figura 2.14 Curvas leva polinómica 3 4 5 descenso

Como se puede apreciar, el golpeteo es distinto de cero en sus extremos porque no se colocó restricciones de frontera en la función golpeteo. Por lo cual a continuación se analizará el mismo caso limitando a la función de golpeteo a cero en ambos extremos.

2.2.6.2 Leva polinómica 4 5 6 7.

Condiciones de frontera:

Ángulo de leva	Desplazamiento	Velocidad	Aceleración	Golpeteo
$\theta = 0$	$s = 0$	$v = 0$	$a = 0$	$j = 0$
$\theta = \beta$	$s = h$	$v = 0$	$a = 0$	$j = 0$

En este caso, se tienen ocho condiciones de frontera, por lo que el polinomio será de séptimo grado, la variable independiente será θ/β , como antes.

Al reescribir la ecuación general considerando el número de condiciones de frontera, resulta:

$$s = C_0 + C_1 \left(\frac{\theta}{\beta}\right) + C_2 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^2 + C_3 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^3 + C_4 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^4 + C_5 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^5 + C_6 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^6 + C_7 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^7 \quad \text{Ec 2.25}$$

Observando las condiciones de frontera, se hace necesario diferenciar la anterior ecuación en función de θ en tres ocasiones, para poder reemplazar los valores de dichas condiciones.

$$v = \frac{1}{\beta} \left[C_1 + 2C_2 \left(\frac{\theta}{\beta}\right) + 3C_3 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^2 + 4C_4 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^3 + 5C_5 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^4 + 6C_6 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^5 + 7C_7 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^6 \right] \quad \text{Ec 2.26}$$

$$a = \frac{1}{\beta^2} \left[2C_2 + 6C_3 \left(\frac{\theta}{\beta}\right) + 12C_4 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^2 + 20C_5 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^3 + 30C_6 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^4 + 42C_7 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^5 \right] \quad \text{Ec 2.27}$$

$$j = \frac{1}{\beta^3} \left[6C_3 + 24C_4 \left(\frac{\theta}{\beta}\right) + 60C_5 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^2 + 120C_6 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^3 + 210C_7 \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^4 \right] \quad \text{Ec 2.28}$$

Sustituyendo las condiciones de frontera en las ecuaciones 2.26, 2.27 y 2.28:

$$0 = C_0$$

$$h = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7$$

$$0 = C_1$$

$$0 = C_1 + 2C_2 + 3C_3 + 4C_4 + 5C_5 + 6C_6 + 7C_7$$

$$0 = 2C_2$$

$$0 = 2C_2 + 6C_3 + 12C_4 + 20C_5 + 30C_6 + 42C_7$$

$$0 = 6C_3$$

$$0 = 6C_3 + 24C_4 + 60C_5 + 120C_6 + 210C_7$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones lineales que se genera se obtiene:

$$C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = 0$$

$$C_4 = 35h$$

$$C_5 = -84h$$

$$C_6 = 70h$$

$$C_7 = -20h$$

Sustituyendo los valores obtenidos en las ecuaciones de posición, velocidad, aceleración y golpeteo:

$$s = h \left[35 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 - 84 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 + 70 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^6 - 20 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^7 \right] \quad \text{Ec 2.29}$$

$$v = \frac{h}{\beta} \left[140 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 420 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 420 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 - 140 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^6 \right] \quad \text{Ec 2.30}$$

$$a = \frac{h}{\beta^2} \left[420 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 - 1680 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 + 2100 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 - 840 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 \right] \quad \text{Ec 2.31}$$

$$j = \frac{h}{\beta^3} \left[840 \left(\frac{\theta}{\beta} \right) - 5040 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 + 8400 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 4200 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 \right] \quad \text{Ec 2.32}$$

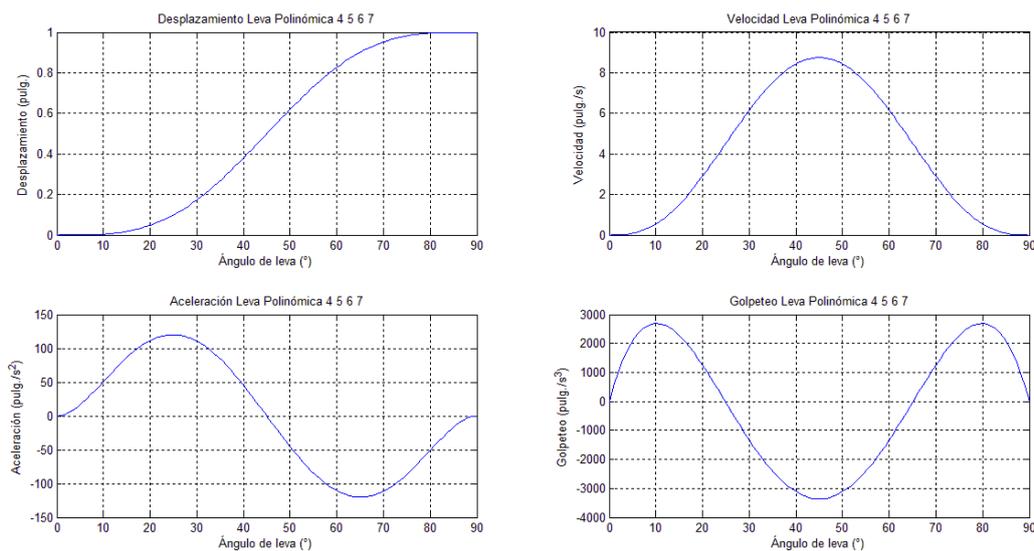


Figura 2.15 Curvas leva polinómica 4 5 6 7 ascenso

Se procede de la misma manera para obtener las funciones de retorno, resultando estas:

$$s = h \left[1 - 35 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 - 84 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 + 70 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^6 - 20 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^7 \right] \quad \text{Ec 2.33}$$

$$v = -\frac{h}{\beta} \left[140 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 420 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 420 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 - 140 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^6 \right] \quad \text{Ec 2.34}$$

$$a = -\frac{h}{\beta^2} \left[420 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 - 1680 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 + 2100 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 - 840 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 \right] \quad \text{Ec 2.35}$$

$$j = -\frac{h}{\beta^3} \left[840 \left(\frac{\theta}{\beta} \right) - 5040 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 + 8400 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 4200 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 \right] \quad \text{Ec 2.36}$$

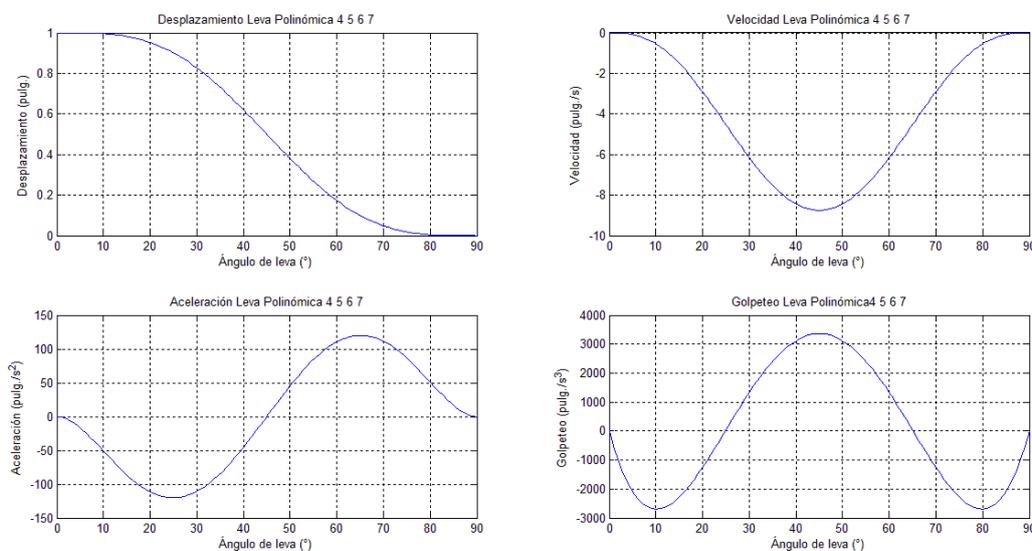


Figura 2.16 Curvas leva polinómica 4 5 6 7 descenso

Con las gráficas obtenidas, se concluye que a diferencia de la leva armónica, la polinómica 4 5 6 7 puede ser combinada con detenimientos porque es fácilmente observable que los extremos de todas las curvas son nulos, lo que permitiría cumplir con la Ley Fundamental del Diseño de Levas.

2.2.7 Curvas de Bezier.

En el estudio de la función desplazamiento es posible utilizar casi cualquier tipo de función para tratar de controlar los parámetros dinámicos del sistema de la mejor manera. Es por esta razón que en el mecanismo de leva y seguidor se han involucrado nuevas funciones, como las curvas de Bezier.

Las curvas de Bezier son una excelente herramienta para generar funciones desplazamiento, velocidad, aceleración e incluso sobreaceleración (golpeteo), por el motivo de que las condiciones de continuidad que presentan en los puntos de unión de tramos son mucho mejores que las tradicionales.

La función de desplazamiento por curvas de Bezier está definida por polinomios algebraicos con base de Bernstein de la siguiente manera:

$$B_{i,n} = C_{i,n} u^i (1 - u)^{n-i} \quad \text{Ec 2.37}$$

$$i = 0, 1, \dots, n \quad \text{Ec 2.38}$$

$$C_{i,n} = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad \text{Ec 2.39}$$

Dónde:

n Grado del polinomio.

i Número de coordenadas de interpolación $n + 1$.

u Variable independiente del polinomio de interpolación.

Para la construcción del perfil es tomado:

$$n = 7$$

$$i = 0, 1, \dots, 7$$

Los coeficientes desarrollados resultan:

$$M(u) = C_{i,n} u^i (1 - u)^{n-i} = \begin{pmatrix} -(u - 1)^7 \\ 7u(u - 1)^6 \\ -21u^2(u - 1)^6 \\ 35u^3(u - 1)^4 \\ -35u^4(u - 1)^3 \\ 21u^5(u - 1)^2 \\ -7u^6(u - 1) \\ (u)^7 \end{pmatrix}$$

Para la obtención de la función desplazamiento, es necesario multiplicar la matriz transpuesta por las ordenadas de un polígono de control que represente los puntos de interpolación de la curva.

$$C(u) = M(u)^T \{P\} \quad \text{Ec 2.40}$$

Polígono de control:

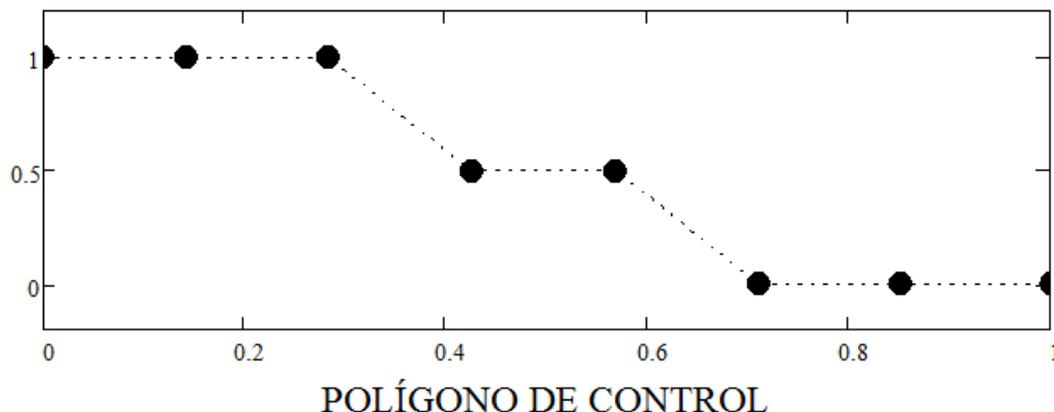


Figura 2.17 Polígono de control retorno

(Olmedo, Echeverría, & Piovan, 2015)

Los puntos del polígono son asignados de manera intuitiva tomando en cuenta el grado del polinomio y el espaciado uniforme en las abscisas.

Las ordenadas del polígono son representadas mediante la matriz $\{P\}$:

$$\{P\}^T = \{1 \ 1 \ 1 \ .5 \ .5 \ 0 \ 0 \ 0\}$$

Finalmente se obtiene la función desplazamiento con las curvas de Bezier, que como se puede apreciar en el polígono de control, corresponde a la función de descenso.

$$C(u) = 7u(u-1)^6 - 21u^2(u-1)^5 - (u-1)^7 + \frac{35}{2}u^3(u-1)^4 - \frac{35}{2}u^4(u-1)^3 \quad \text{Ec 2.41}$$

Para representar la función en la misma forma como se venía realizando, simplemente debe ser reemplazada la variable independiente u por θ/β , resultando finalmente.

$$s = h \left[7 \left(\frac{\theta}{\beta} \right) \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^6 - 21 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^5 - \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^7 + \frac{35}{2} \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^4 - \frac{35}{2} \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^3 \right] \quad \text{Ec 2.42}$$

Diferenciando la función desplazamiento para obtener velocidad, aceleración y golpeteo.

$$v = -\frac{h}{\beta} \left[52.5 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^4 + 52.5 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^2 \right] \quad \text{Ec 2.43}$$

$$a = -\frac{h}{\beta^2} \left[105 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right) + 210 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^2 + 210 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^3 + 105 \left(\frac{\theta}{\beta} \right) \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^4 \right] \quad \text{Ec 2.44}$$

$$j = -\frac{h}{\beta^3} \left[105 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 840 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right) + 1260 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^2 + 840 \left(\frac{\theta}{\beta} \right) \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^3 + 105 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^4 \right] \quad \text{Ec 2.45}$$

Se grafican las funciones con las condiciones siguientes:

$$h = 1 \text{ pulg.}$$

$$\beta = 180^\circ$$

$$\omega = 60 \text{ rpm}$$

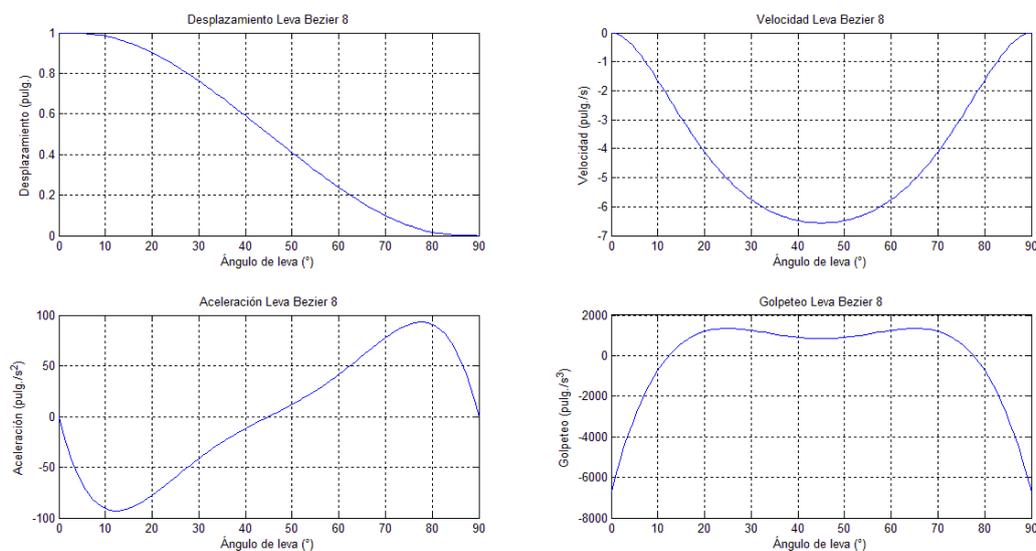


Figura 2.18 Curvas leva Bezier descenso

Para obtener las funciones de ascenso es necesario cambiar el polinomio de control, y se procede de la misma manera.

$$\{P\}^T = \{0 \ 0 \ 0.5 \ 0.5 \ 1 \ 1 \ 1\}$$

$$s = h \left[-7 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^6 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right) + 21 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^2 - \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^7 + \frac{35}{2} \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^4 - \frac{35}{2} \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^3 \right] \quad \text{Ec 2.46}$$

$$v = \frac{h}{\beta} \left[52.5 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^2 + 52.5 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^4 \right] \quad \text{Ec 2.47}$$

$$a = \frac{h}{\beta^2} \left[105 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right) + 210 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^2 + 210 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^3 + 105 \left(\frac{\theta}{\beta} \right) \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^4 \right] \quad \text{Ec 2.48}$$

$$j = \frac{h}{\beta^3} \left[105 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 840 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right) + 1260 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^2 + 840 \left(\frac{\theta}{\beta} \right) \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^3 + 105 \left(\frac{\theta}{\beta} - 1 \right)^4 \right] \quad \text{Ec 2.49}$$

Graficando con las mismas condiciones anteriores:

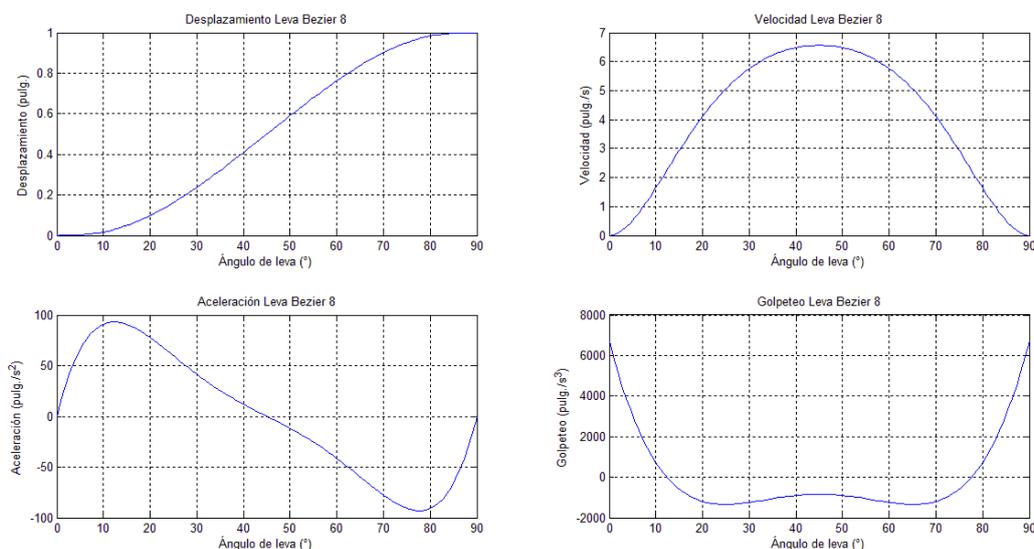


Figura 2.19 Curvas leva Bezier ascenso

2.3 Sistemas dinámicos.

Se conocen como sistemas porque están representados por una serie de ecuaciones que describen el comportamiento del mismo.

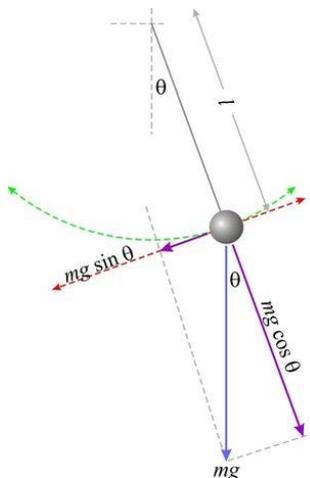


Figura 2.20 Péndulo

Se dice que son dinámicos porque sus variables cambian con respecto a alguna variable que generalmente es el tiempo.

Por lo tanto, se puede decir que un sistema dinámico se define básicamente como un conjunto de magnitudes que cambian y evolucionan con el tiempo.

2.3.1 Clasificación.

Los sistemas dinámicos pueden ser clasificados en dos grandes grupos, en los que el tiempo varía de forma continua y en los que lo hace discretamente.

Sistemas continuos.

Son aquellos sistemas que aparecen no solo en la física, sino que también en la economía, biología, etc., los cuales pueden ser modelados por medio de ecuaciones diferenciales.

Considerando un campo vectorial X definido en \mathbb{R}^n . Se asocia un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, que vectorialmente pueden ser escritas:

$$\dot{x} = X(x) \quad \text{Ec 2.50}$$

Donde \dot{x} representa derivada con respecto al tiempo. Es importante recordar que una condición inicial x_0 determina también una solución.

Se puede decir que el campo vectorial X define un sistema dinámico a tiempo continuo.

Sistemas discretos.

Un sistema dinámico es discreto si el tiempo es medido en pequeños lapsos.

Otra forma de estudiar los sistemas dinámicos, es mediante iteración de funciones.

Si f es una función real, la ecuación a tiempo discreto es:

$$x_{k+1} = f(x_k), \text{ para } k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad \text{Ec 2.51}$$

Con una condición inicial x_0 una solución será una sucesión de puntos x_0, x_1, x_2, \dots

Así que a diferencia de los sistemas continuos, el resultado en lugar de ser una curva, es una sucesión de puntos que pueden ser finitos.

2.4 Modelamiento del sistema.

Considerando el equipo de prueba de levas Tecquipment TM21 062, el sistema dinámico equivalente de un grado de libertad del mecanismo de leva-seguidor es el siguiente:

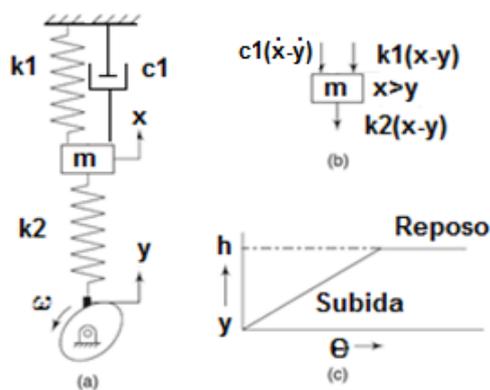


Figura 2.21 Sistema equivalente y DCL

Dónde:

- k_1 Rigidez del resorte de seguidor (real).
- c_1 Amortiguación (fricción viscosa cilindro y cojinete).
- m Masa del seguidor.
- k_2 Rigidez del seguidor (cilindro conexión rodillo y masa impulsada).
- y Desplazamiento de seguidor (movimiento correspondiente a la función desplazamiento).

Del diagrama del cuerpo libre se obtiene:

$$\sum F = m \ddot{x} \quad \text{Ec 2.52}$$

$$\sum F = -k_1x - c_1\dot{x} - k_2(x - y) = m \ddot{x} \quad \text{Ec 2.53}$$

La ecuación diferencial del sistema finalmente resulta:

$$m \ddot{x} + c_1\dot{x} + (k_1 + k_2)x = k_2y \quad \text{Ec 2.54}$$

Donde x es el desplazamiento de la masa, mientras que y representa la función desplazamiento de la leva que sea utilizada.

2.5 Equipos de control

2.5.1 Fuente de voltaje.

Una fuente de poder es aquella que es capaz de suministrar energía, alimentando circuitos de aparatos electrónicos.

Su función es la de convertir corriente alterna en continua de la forma más estable posible. Para lo cual utiliza diversos componentes electrónicos, ya sean transformadores, diodos, filtros.

La fuente de alimentación debe ser elegida según la aplicación, considerando la tensión y corriente que puede suministrar.

Para la presente aplicación, en la que se debe alimentar un motor de corriente continua de 110 V en configuración Shunt con un consumo de 3.6 A, el equipo idóneo es el siguiente.

Marca:	Tecquipment
Serie:	241
Frecuencia:	50 - 60 Hz
Voltaje:	110 VDC
Intensidad:	4 A
Fase:	1



Figura 2.22 Fuente de voltaje variable Tecquipment 241

La fuente es capaz de proporcionar dos tensiones diferentes, una de 110 V constante y otra variable mediante un cursor (reóstato). Lo que la convierte en la fuente idónea, ya que la configuración típica del motor Shunt para variar su velocidad es de la siguiente manera.

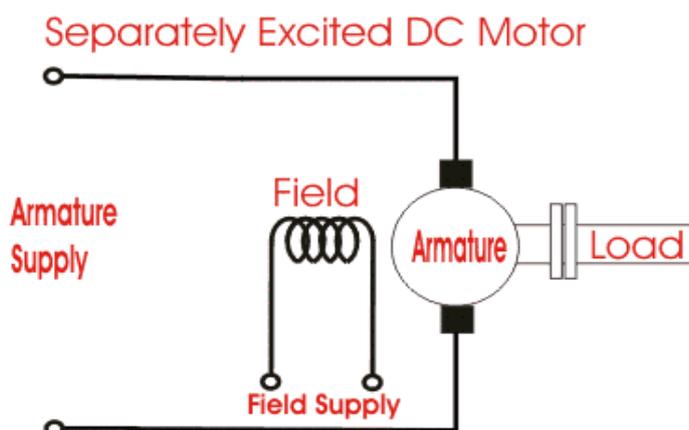


Figura 2.23 Conexión típica Shunt

Donde el bobinado de campo será alimentado directamente con 110 V, mientras que la armadura lo será con la fuente de alimentación variable, con lo que será posible la variación de la velocidad del motor mediante el cursor (reóstato).

2.5.2 Arduino.

Arduino es una placa electrónica simple comandada por un microcontrolador Atmel AVR programado mediante el lenguaje de programación Arduino y con un entorno de desarrollo Arduino.

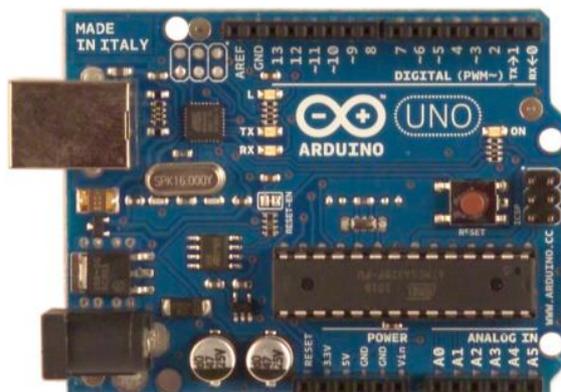


Figura 2.24 Placa de desarrollo Arduino

La placa electrónica es capaz de realizar un sinnúmero de tareas, incluyendo recepción de datos de sensores, control de motores, diferentes actuadores, además de una variedad de opciones de comunicación.

Arduino utiliza código abierto con la intención de impulsar proyectos funcionales y creativos. El software puede ser descargado de la página oficial de Arduino.

El dispositivo ofrece varias ventajas para quienes lo utilizan, como foros, comunidades, ejemplos, que lo convierten en una gran herramienta para la implementación del mismo en un proyecto.

2.5.3 Sensores.

Potenciómetro.

Se trata de un resistor de valor variable.

Limitan la intensidad de corriente, provocando una caída de tensión al variar el cursor y por ende la resistencia eléctrica.

Son transductores de distancia y posición con contacto y rozamiento. Algunos tipos se detallan a continuación:

Potenciómetro rotatorio.

Son los más utilizados por su robustez y tamaño. Controlados mediante el giro de su eje.

Potenciómetro deslizante.

El valor de resistencia se obtiene mediante el deslizamiento de un cursor sobre una pista resistiva recta.

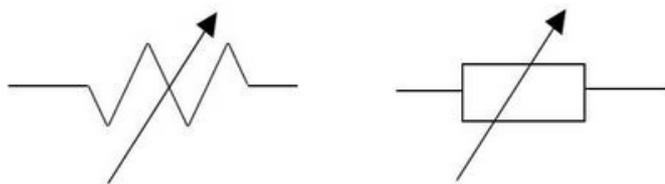


Figura 2.25 Símbolo potenciómetro mecánico



Figura 2.26 Potenciómetro deslizante

Será considerado un potenciómetro para el registro de datos del perfil de leva (mediante ADC), los cuales serán enviados al controlador.

Potenciómetro múltiple.

Se trata de varios potenciómetros conectados mediante sus ejes, de modo que ocupan menor espacio.



Figura 2.27 Potenciómetro múltiple

Acelerómetro.

Instrumento destinado a medir aceleraciones o bien, realizar una medida de vibración, proporcionando una señal eléctrica según la variación física (vibración).

Para el propósito existen varios modelos de acuerdo a las tecnologías existentes, algunos de los cuales se mencionan a continuación:

CAPITULO 3

SISTEMA DINÁMICO

3.1 Parámetros mecánicos del sistema.

Como fue indicado en la teoría, el modelado del sistema requiere de la cuantificación de varios parámetros involucrados, tal es el caso de las rigideces tanto del resorte como del seguidor, así como sus masas y constantes de amortiguación.

Se muestra la ecuación obtenida en el modelado:

$$m \ddot{x} + c_1 \dot{x} + (k_1 + k_2)x = k_2 y \quad \text{Ec 2.54}$$

Dónde:

- k_1 Rigidez del resorte de seguidor (real).
- c_1 Amortiguación (fricción viscosa cilindro y cojinete).
- m Masa del seguidor.
- k_2 Rigidez del seguidor (cilindro conexión rodillo y masa impulsada).
- y Desplazamiento de seguidor (movimiento correspondiente a la función desplazamiento).

Es preciso ahora determinar los parámetros reales requeridos del equipo de análisis de levas Tecquipment TM21 062.

3.1.1 Rigidez del resorte de seguidor (real).

La expresión para encontrar la constante de un resorte a compresión de espiras helicoidales:

$$k_1 = \frac{d^4 G}{8D^3 N} \quad \text{Ec 3.1}$$

Dónde:

- k_1 Rigidez del resorte de seguidor (real).
- d Diámetro del alambre.
- G Módulo de elasticidad al corte del material.
- D Diámetro medio de espira.
- N Número de espiras activas.

Visualizando y tomando medidas del resorte implicado, se resuelve la ecuación, obteniendo:

$$k_1 = \frac{(3.31 \text{ mm})^4 \cdot 79300 \text{ MPa}}{8 \cdot (36.6 \text{ mm})^3 \cdot 6} = 4.03 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$



Figura 3.1 Resorte de seguidor

3.1.2 Rigidez del seguidor (cilindro conexión).

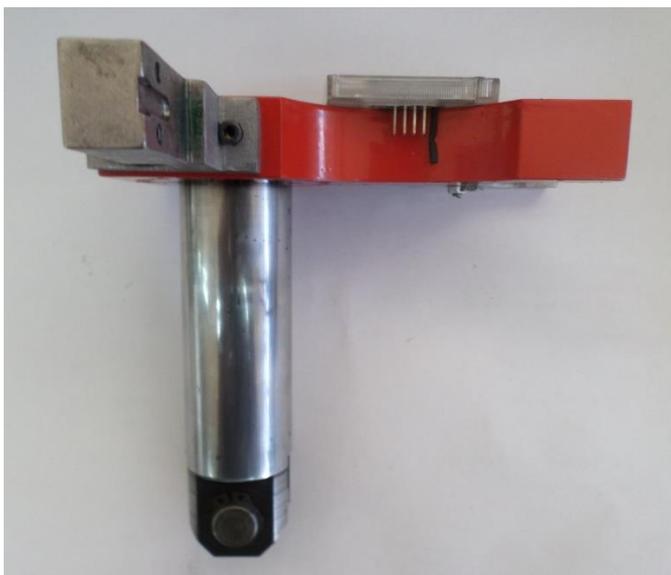


Figura 3.2 Seguidor de rodillo

La rigidez del cilindro será obtenida a partir del modelado y análisis en un programa de elementos finitos.

Aplicando una fuerza de tracción de 100 N se puede apreciar en la Figura 3.4 que ocurre una deformación de 0.0003691 mm. Por lo que aplicando la Ley de Hooke para resortes:

$$F = k_2 \cdot x \quad \text{Ec 3.2}$$

Dónde:

- k_2 Rigidez del seguidor.
- x Elongación o deformación.
- F Fuerza ejercida sobre el seguidor.

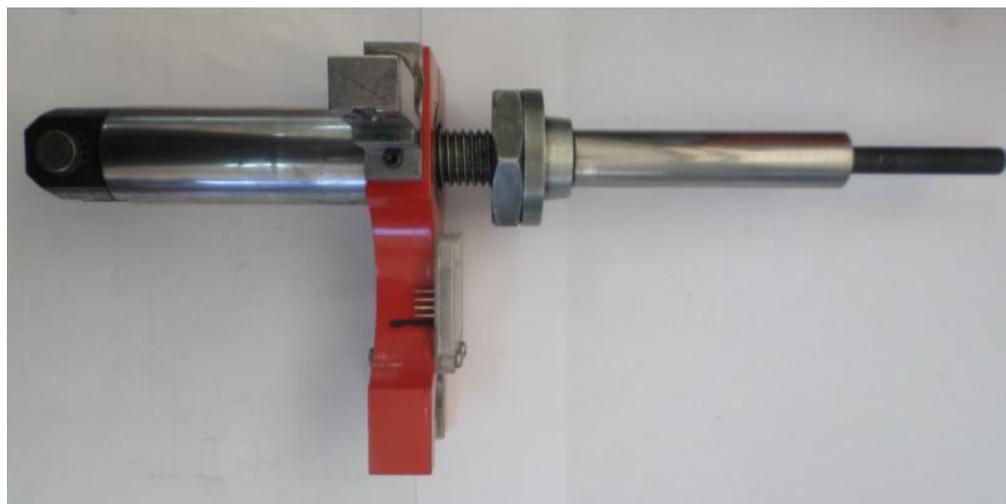


Figura 3.3 Ensamble seguidor de rodillo

Resolviendo:

$$100 \text{ N} = k_2 \cdot 0.0003691 \text{ mm}$$

$$k_2 = 271000 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

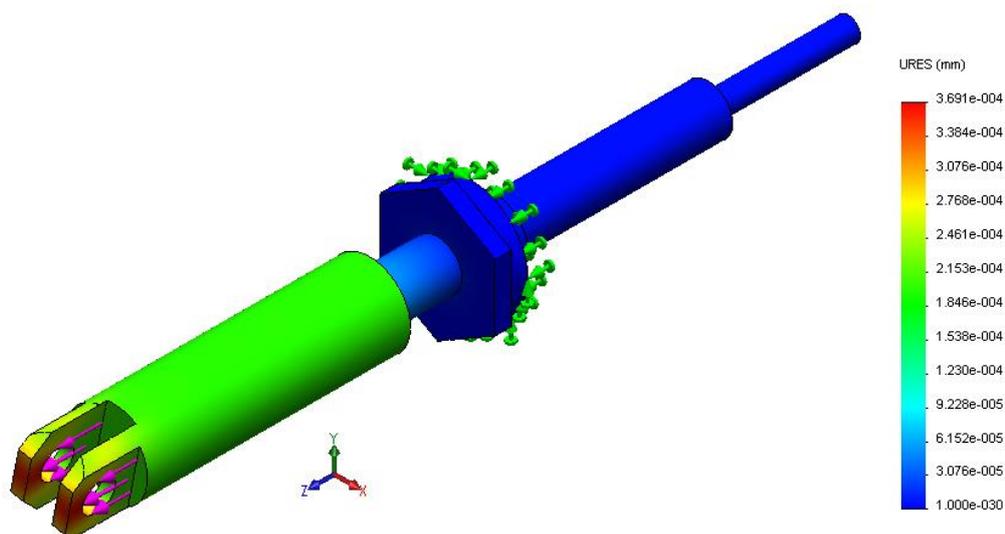


Figura 3.4 Simulación estudio de deformación

3.1.3 Masa del seguidor.

La masa del seguidor es obtenida mediante el mismo modelado en el programa de elementos finitos.

Se obtiene el valor de la masa mediante las propiedades del ensamble, de lo cual resulta:

$$m = 1.1 \text{ kg}$$

3.1.4 Amortiguación (fricción viscosa cilindro y cojinete).

El valor de la constante de amortiguación real será obtenido a partir de una relación de amortiguación típica en los mecanismos de leva y seguidor.

Koster, en 1974 encontró que un valor típico de la relación de amortiguamiento en los sistemas de leva y seguidor es:

$$\zeta = 0.06$$

Es decir, existe un caso subamortiguado, ya que $\zeta < 1$.

La relación de amortiguamiento, relaciona el amortiguamiento real con el amortiguamiento crítico de la siguiente manera:

$$\zeta = \frac{c_1}{c_c} \quad \text{Ec 3.3}$$

$$\zeta = \frac{c_1}{2m\omega_n} \quad \text{Ec 3.4}$$

Dónde:

ζ Relación de amortiguación.

c_1 Amortiguación real.

c_c Amortiguación crítica.

m Masa de seguidor.

ω_n Frecuencia natural del sistema.

La frecuencia natural es obtenida mediante la siguiente expresión:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Ec 3.5}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{m}} = \sqrt{\frac{(271000 + 4.03) \cdot 1000}{1.1}} \cdot \frac{60}{2\pi} = 149887 \text{ rpm}$$

$$\omega_n = 15696 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

La amortiguación real del sistema es calculada mediante la ecuación 3.4:

$$c_1 = 2 \cdot \zeta \cdot m \cdot \omega_n$$

$$c_1 = 2 \cdot 0.06 \cdot 1.1 \cdot 15696$$

$$c_1 = 2072 \frac{kg}{s}$$

3.1.5 Ley de desplazamiento.

Tanto la selección de la ley de desplazamiento como la incertidumbre que proviene de la manufactura se basa en el estudio teórico realizado por parte de los ingenieros Fernando Olmedo, Jaime Echeverría y el doctor Marcelo Tulio Piovan, investigadores de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, denominado: ‘Dinámica de levas planas. Análisis de incertidumbre de tipo paramétrico para precisión en altas velocidades’.

En el cual se muestra que las leyes de desplazamiento idóneas para realizar el estudio son la polinómica 3 4 5 y las curvas de Bezier, focalizándose en los enlaces producidos entre reposos y mejor respuesta a elevadas velocidades. Idea que puede ser verificada mediante las Figuras 3.5 y 3.6, en las cuales se hace una comparativa de las respuestas de polinomios de distintos grados y la Figura 3.7 en la que se compara las curvas de Bezier de distintos grados.

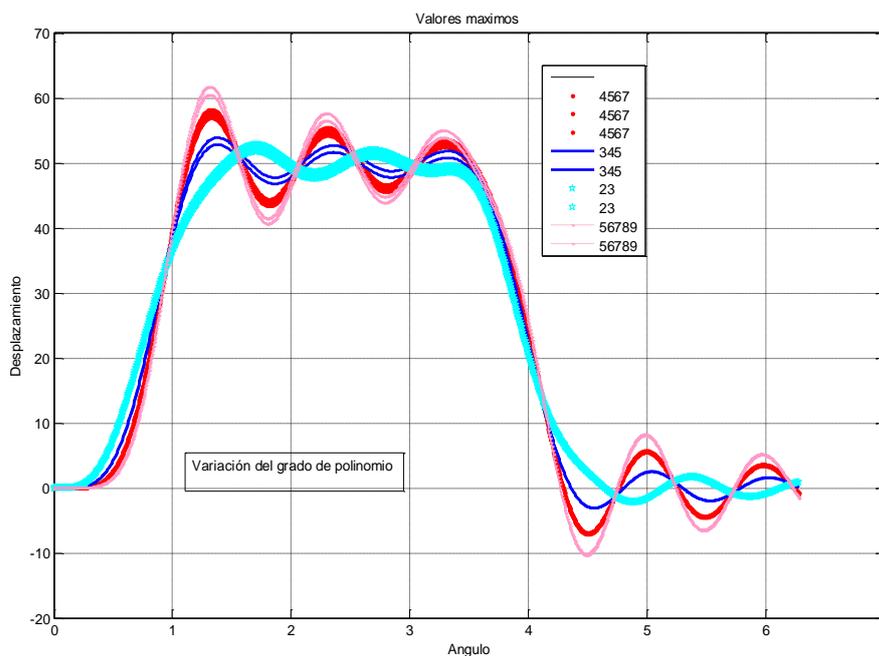


Figura 3.5 Comparativa de funciones polinomiales
(Olmedo, Echeverría, & Piovan, 2015)

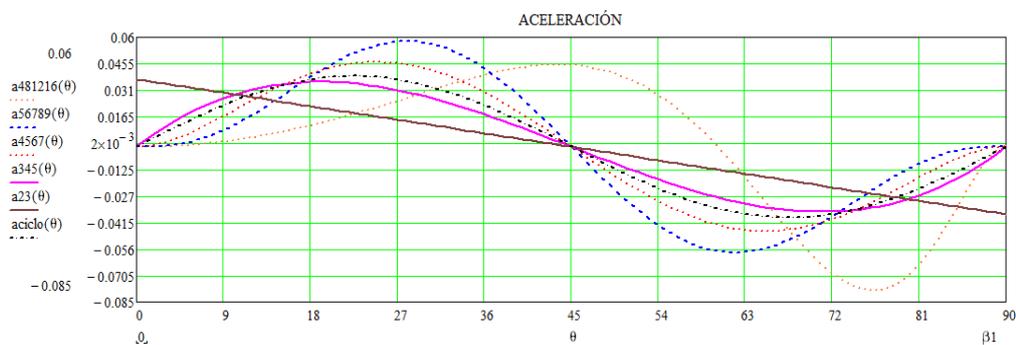


Figura 3.6 Comparativa de aceleraciones polinomiales
(Olmedo, Echeverría, & Piovan, 2015)

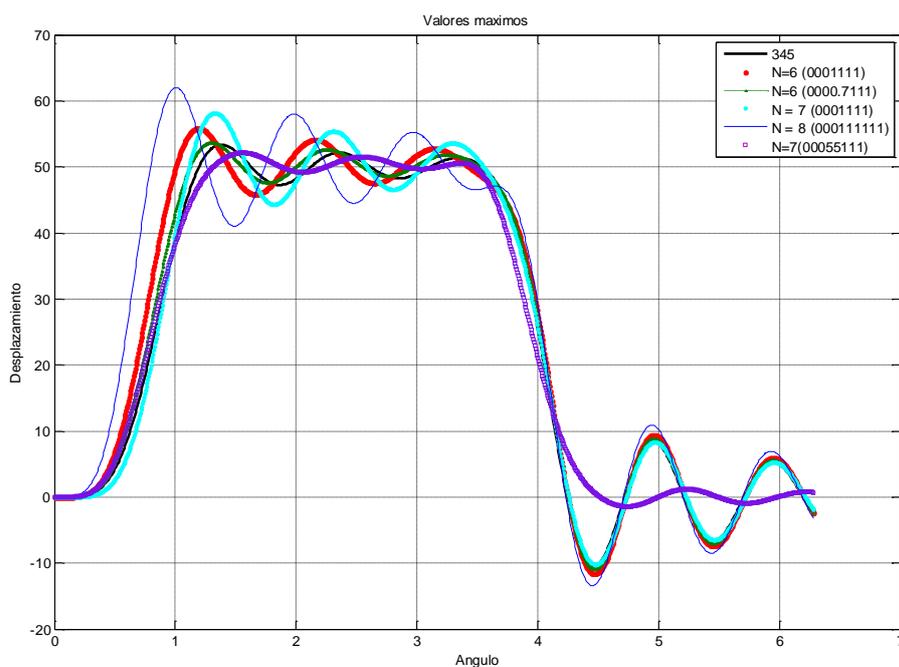


Figura 3.7 Comparativa curvas de Bezier
(Olmedo, Echeverría, & Piovan, 2015)

La Figura 3.7 muestra que la mejor respuesta a altas velocidades se obtiene con la polinómica 3 4 5, motivo por el cual se realizará el estudio con dicha función.

Al ser un estudio también de tipo práctico, será necesaria la elaboración de estos tipos de leva (polinómica 3 4 5, Bezier 8) además de una leva armónica diseñada para altas velocidades.

A continuación se presenta un cuadro resumen de valores de los parámetros necesarios para la resolución del sistema.

Cuadro 3.1
Resumen parámetros del sistema

Parámetro	Símbolo	Valor
Rigidez del resorte	k_1	$4.03 \frac{N}{mm}$
Rigidez del seguidor	k_2	$271000 \frac{N}{mm}$
Masa del seguidor	m	$1.1 kg$
Amortiguación	c_1	$2072 \frac{kg}{s}$
Ley desplazamiento	y	Polinómica 3 4 5

3.2 Solución de la ecuación diferencial del modelo.

Una vez modelado y cuantificados los parámetros del sistema, se procede a generar la solución.

Como fue desarrollado en teoría, la ecuación diferencial es:

$$m \ddot{x} + c_1 \dot{x} + (k_1 + k_2)x = k_2 y \quad \text{Ec 2.55}$$

Resulta ser una diferencial de segundo orden del tipo lineal y no homogénea.

Conociendo que las ecuaciones de segundo orden son bastante difíciles de resolver de forma analítica (salvo en excepcionales casos), es planteada la necesidad de utilizar un procedimiento de aproximaciones precisas para la solución, es decir, mediante métodos numéricos.

Matlab dispone de varias funciones para la resolución a partir de procedimientos numéricos como la orden ode45, para lo cual es necesario plantear un sistema de ecuaciones a partir de la ecuación original (Ec 2.54).

Conociendo que la velocidad es la primera derivada del desplazamiento respecto al tiempo:

$$\dot{x} = v = \frac{dx}{dt} \quad \text{Ec 3.6}$$

$$\ddot{x} = \frac{dv}{dt} \quad \text{Ec 3.7}$$

Reemplazando las ecuaciones 3.6 y 3.7 en la ecuación original:

$$m \frac{dv}{dt} + c_1 v + (k_1 + k_2)x = k_2 y \quad \text{Ec 3.8}$$

Se plantea un sistema de dos ecuaciones diferenciales de primer orden.

$$\left\{ \begin{array}{l} v = \frac{dx}{dt} \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} (-c_1 v - (k_1 + k_2)x + k_2 y) \end{array} \right. \quad \text{Ec 3.9}$$

Donde las variables m , c_1 , k_1 , k_2 e y , representan parámetros inciertos.

La variable y es aleatoria debido a que contiene a la variable incierta h que representa la elevación del seguidor.

El programa para la solución de la ecuación con parámetros inciertos mediante el método de Montecarlo fue desarrollado junto al estudio: ‘Dinámica de levas planas. Análisis de incertidumbre de tipo paramétrico para precisión en altas velocidades’ por los autores antes mencionados.

Algunas partes importantes del programa se exponen a continuación:

```

%*****
% resuelve m x''+ c x' + (k1+k2) x = f(t)= k2*y(t)
%*****
function xdot = rhs(t,x,args,angs)
omega = args(1);
m = args(2);
c = args(3);
k = args(4);
k2 = args(5);
h = args(6);

xdot_1 = x(2)* omega;
xdot_2 = (1/omega)*(-(c/m)*x(2) - (k/m)*x(1) +
fuerza(t,k2,h,angs)/(m));
xdot = [xdot_1 ; xdot_2 ];

```

Figura 3.8 Subrutina sistema de ecuaciones
(Olmedo, Echeverría, & Piovan, 2015)

```

posicion_inicial = 0;
velocidad_inicial = 0;

x0 = [posicion_inicial velocidad_inicial ];
args(1) = omega;
args(2) = m;
args(3) = c;
args(4) = k;
args(5) = k2;
args(6) = h;

options = odeset('RelTol',1e-8,'AbsTol',1e-8);

[t,x] = ode45(@rhs,time_span,x0,options,args,angs);
for i = 1:n;
x(i,3) =(x(i+1,2)- x(i,2))/(t fin/n);

```

Figura 3.9 Subrutina herramienta ode45
(Olmedo, Echeverría, & Piovan, 2015)

```

function f = fuerza(t,k2,h,angs)

BETA1 = angs(1);
BETA2 = angs(2);
BETA3 = angs(3);
BETA4 = angs(4);
dt1 = BETA1+BETA2;
dt2 = dt1+BETA3;
dt3 = dt2+BETA4;

f1 = k2*(h*(10*(t/BETA1)^3 -15*(t/BETA1)^4 + 6*(t/BETA1)^5));
f2 = k2*h;
f3 = k2*(h-h*(10*((t-dt1)/BETA3)^3 -15*((t-dt1)/BETA3)^4 + 6*((t-
dt1)/BETA3)^5));
f4 = k2*0;

f = f1*((0<=t)&(t<BETA1)) + f2*((BETA1<=t)&(t<=dt1))+
f3*((dt1<=t)&(t<=dt2))+f4*((dt2<=t)&(t<=dt3));
end

```

Figura 3.10 Función polinómica 3 4 5
(Olmedo, Echeverría, & Piovan, 2015)

3.3 Incertidumbre proveniente de la manufactura.

El proyecto de tesis incluye un estudio tanto teórico como experimental de la incertidumbre que se genera en la alzada del seguidor al manufacturar el perfil de leva y poner el mismo en marcha sin pasar por procedimientos como el pulido.

La manufactura de la leva se presume incide directamente en la altura que alcanza el seguidor, generando una incertidumbre en la altura h que alcanza el mismo.

Al ser el fresado un proceso de mecanizado por arranque de viruta, el mismo generará ciertas rugosidades y posibles ondulaciones que incurran en el desplazamiento que pueda tener el seguidor, afectando seriamente el correcto funcionamiento del sistema.

Para obtener un parámetro de rugosidad se emplea la fórmula de rugosidad pico valle en el fresado.

$$R_t = \frac{125 \cdot a_z^2}{R_h} \quad \text{Ec 3.10}$$

Dónde:

R_t Rugosidad pico valle.

a_z^2 Avance por diente (mm./rev./diente).

R_h Radio de la herramienta.

El radio de la herramienta que será utilizada es de 12 mm., mientras que el avance será de 0.15 mm. por diente. Los parámetros de manufactura podrán ser examinados posteriormente en el capítulo correspondiente a manufactura de levas.

$$R_t = \frac{125 \cdot 0.15^2}{12}$$

$$R_t = 0.2 \text{ } \mu\text{m} = 7.9 \cdot 10^{-6} \text{ pulg.}$$

Lo que se traduce a un acabado N4.

La leva será manufacturada con un ascenso de 0.85 pulgadas debido a las condiciones del equipo. Se calculan los valores máximos y mínimos correspondientes:

Valor mínimo:

$$0.85 - 7.9 \cdot 10^{-6} = 0.8499921 \text{ pulg.}$$

Valor máximo:

$$0.85 + 7.9 \cdot 10^{-6} = 0.8500079 \text{ pulg.}$$

Calculados los valores, se ingresan los datos al programa.

```
hinf = h*0.99;
hsup = h*1.01;
```

Figura 3.11 Ingreso valores máximo y mínimo de desplazamiento

```

h = 0.85;           % Altura del seguidor (pulg.)
omega = 150;       % Velocidad angular (rpm.)
n = 1000;          % Número de pasos para la
                   % integración (rad)

k1 = 4.03;         % Constante de resorte de cierre
                   % (N/mm)
k2 = 271000;      % Constante elástica del seguidor
                   % (N/mm)
k = k1+k2;         % Suma de rigidez del sistema
m = 1.1;          % Masa (kg)
zeta = 0.06;      % Según Robert L. Norton
cr = 2*sqrt(1000*k*m); % Amortiguación crítica 1000 debido
                   % a las unidades
c = zeta*cr;      % Amortiguación real

```

Figura 3.12 Ingreso de valores al programa

Al poner en marcha el programa variando la velocidad angular, se puede obtener las respuestas:

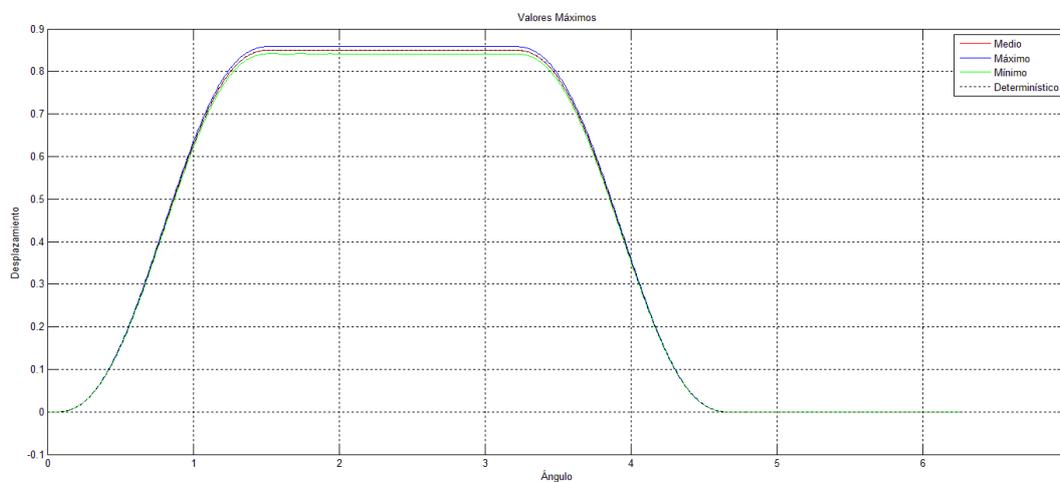


Figura 3.13 Respuesta a 150 rpm

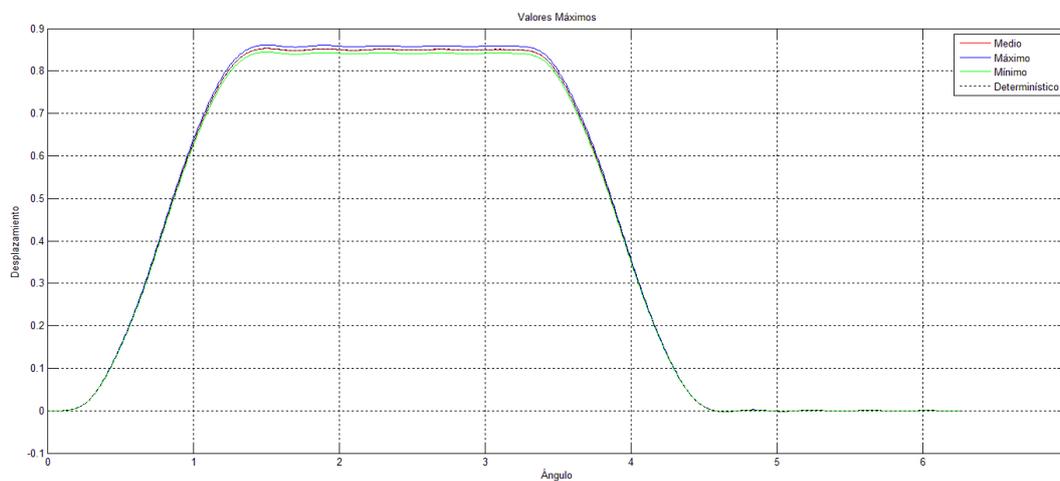


Figura 3.14 Respuesta a 300 rpm

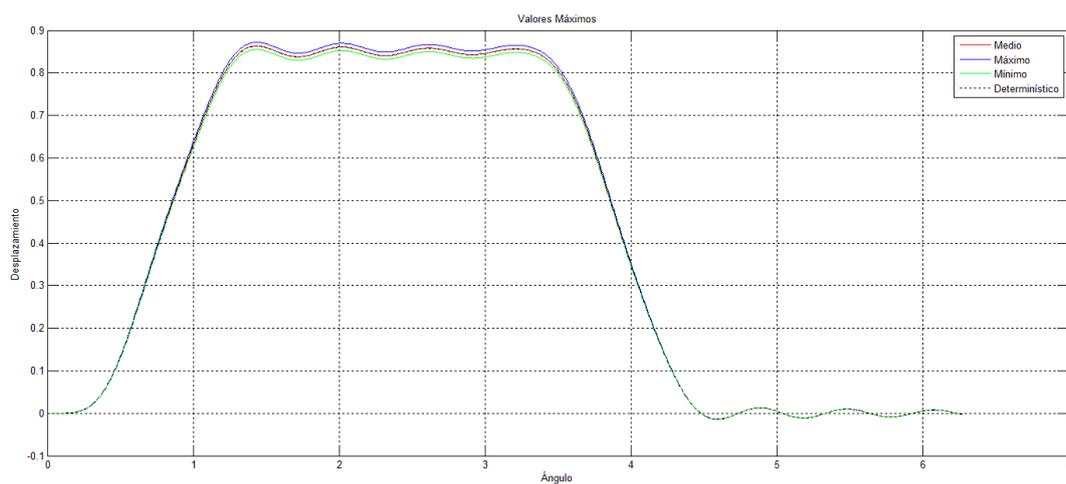


Figura 3.15 Respuesta a 450 rpm

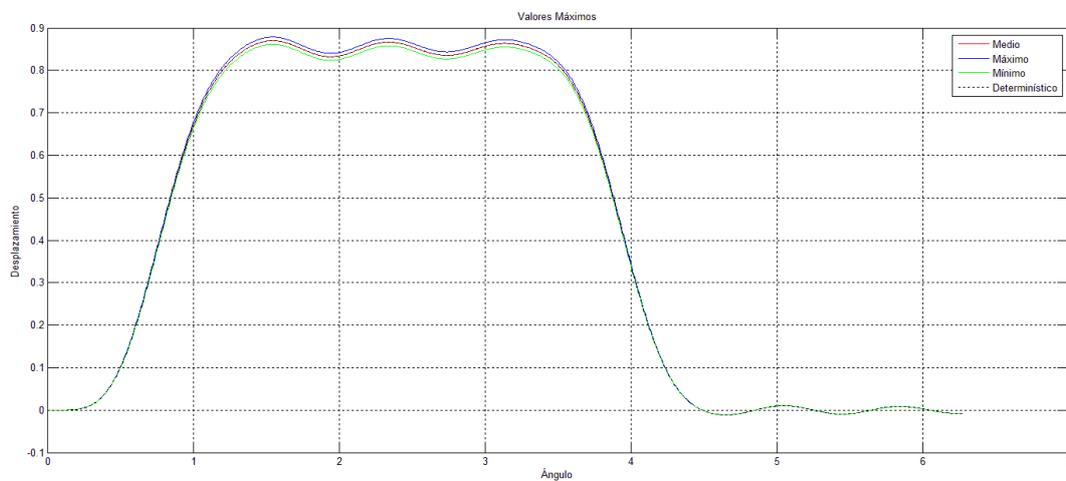


Figura 3.16 Respuesta a 600 rpm

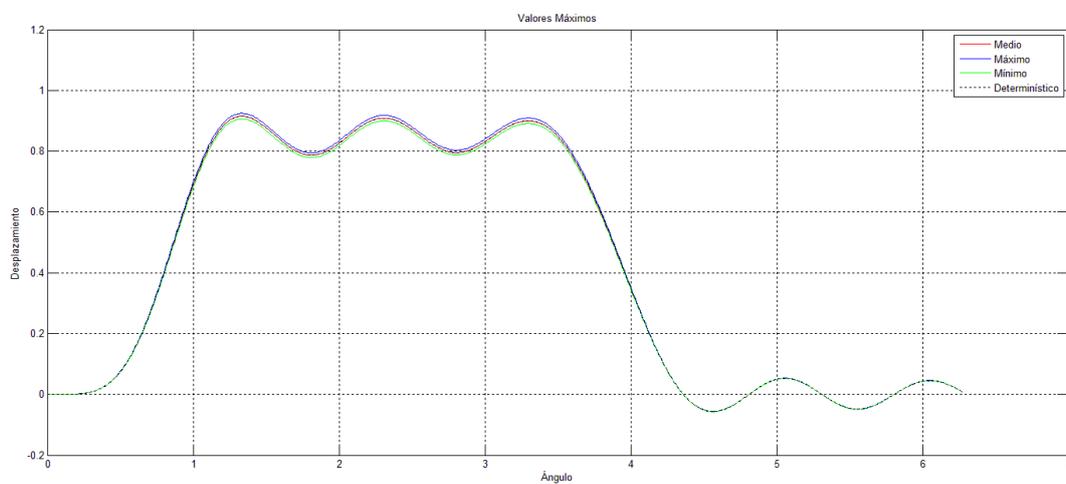


Figura 3.17 Respuesta a 750 rpm

Como se observa en las figuras previas, hasta 300 rpm se puede ver la variación correspondiente a la incertidumbre proveniente de la manufactura. Sin embargo, a 450 rpm cobran significativa importancia los efectos dinámicos del sistema.

En las Figuras 3.16 y 3.17 se muestran cómo los efectos dinámicos son de mayor relevancia, en donde el desplazamiento se separa de una manera importante al previsto.

3.4 Análisis de geometría mecanismo Tecquipment TM21 062.

Antes de iniciar con el diseño de las levas que exige el estudio, es necesario analizar la geometría tanto del equipo como de las levas ya existentes con el fin de realizar una correcta dimensión de las levas a fabricar.

Cuadro 3.2

Análisis de geometría Tecquipment TM21 062

Leva	Radio círculo base (pulg.)	Radio seguidor (pulg.)	Longitud total (pulg.)	Radio círculo primario (pulg.)	Elevación (pulg.)
	R_b	R_f	L	$R_p = R_b + R_f$	$h = L - 2R_b$
Leva convexa 1	1.1875		3	1.75	0.625
Leva convexa 2	1	0.5625	3	1.5625	1
Leva cóncava	1.1875		3.225	1.75	0.85
Leva tangencial	1		3	1.5625	1

Con los datos obtenidos, inicialmente se puede deducir que para acoplar una leva correctamente al equipo es necesario que la misma posea un radio del círculo base de 1.1875 pulgadas y una elevación de 0.85 pulgadas, o bien, un radio base de 1 pulgada y una elevación de 1 pulgada igualmente.

3.5 Diseño leva armónica.

Como fue expuesto en la teoría, para que una leva con movimiento armónico simple cumpla con la Ley Fundamental del Diseño de Levas debe tener una subida y bajada de 180° sin detenimientos, de esta manera:

Cuadro 3. 3
Condiciones de diseño leva armónica

Condición	Periodo ($^\circ$)	Ángulo inicial ($^\circ$)	Ángulo final ($^\circ$)	Elevación (pulg.)
	β	θ_1	θ_2	h
Ascenso	180	0	180	0 - 1
Descenso	180	180	360	1 - 0

Fue planteado un desplazamiento del seguidor de una pulgada, ya que las condiciones del equipo lo permiten, teniendo siempre en cuenta el radio base de la leva que para las provistas por el equipo es de una pulgada.

Con las ecuaciones obtenidas en la parte de teoría se grafican los diagramas con las condiciones planteadas de diseño y una velocidad angular de 100 rpm.

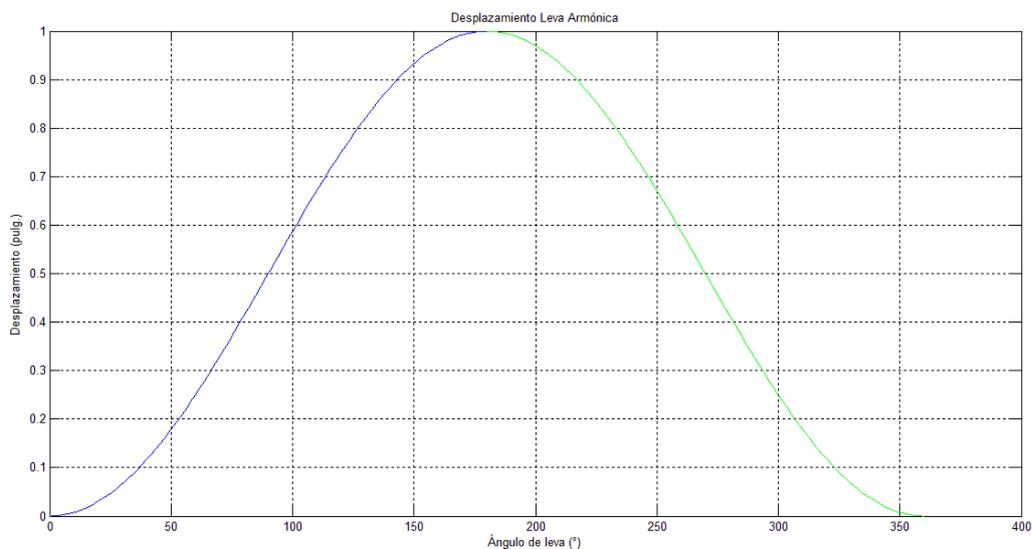


Figura 3.18 Desplazamiento leva armónica

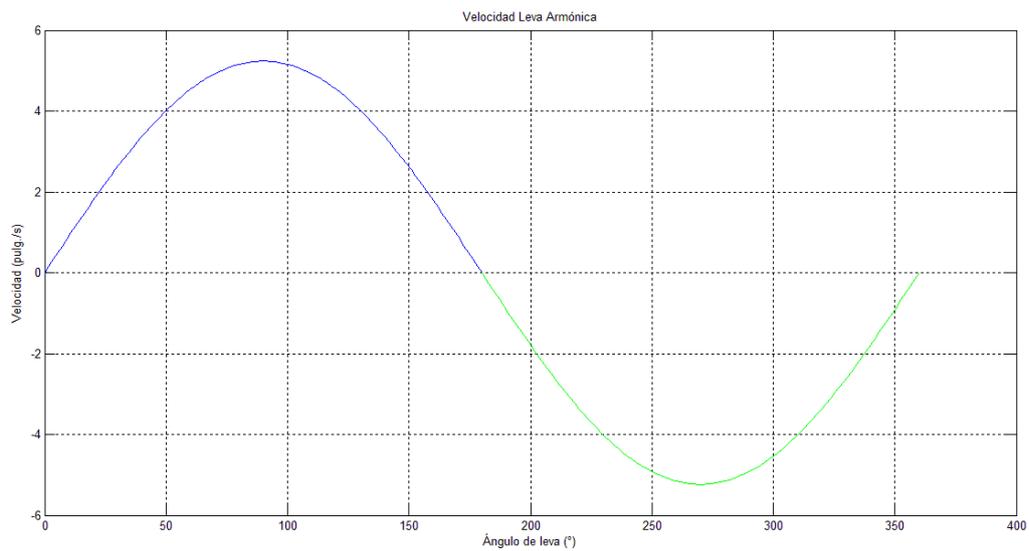


Figura 3.19 Velocidad leva armónica

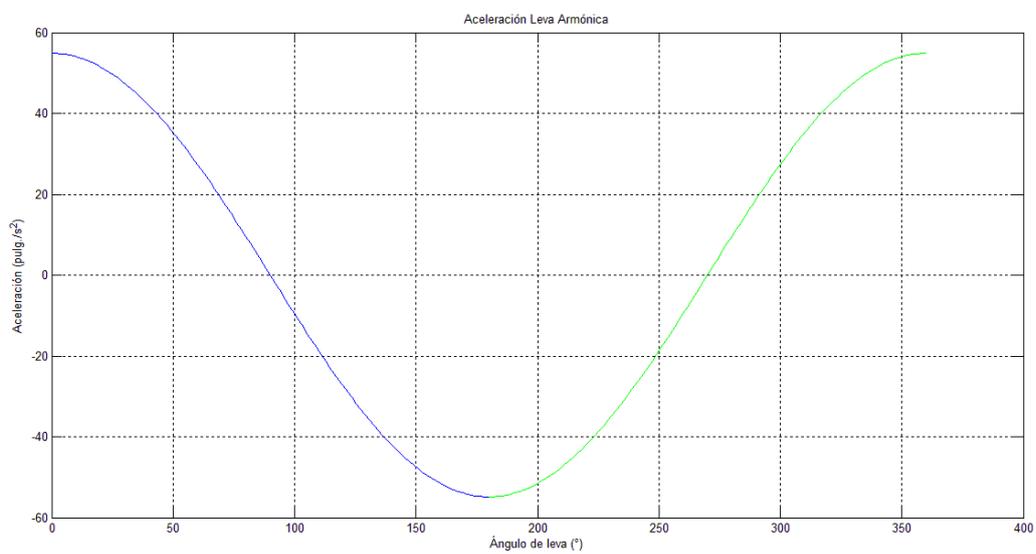


Figura 3.20 Aceleración leva armónica

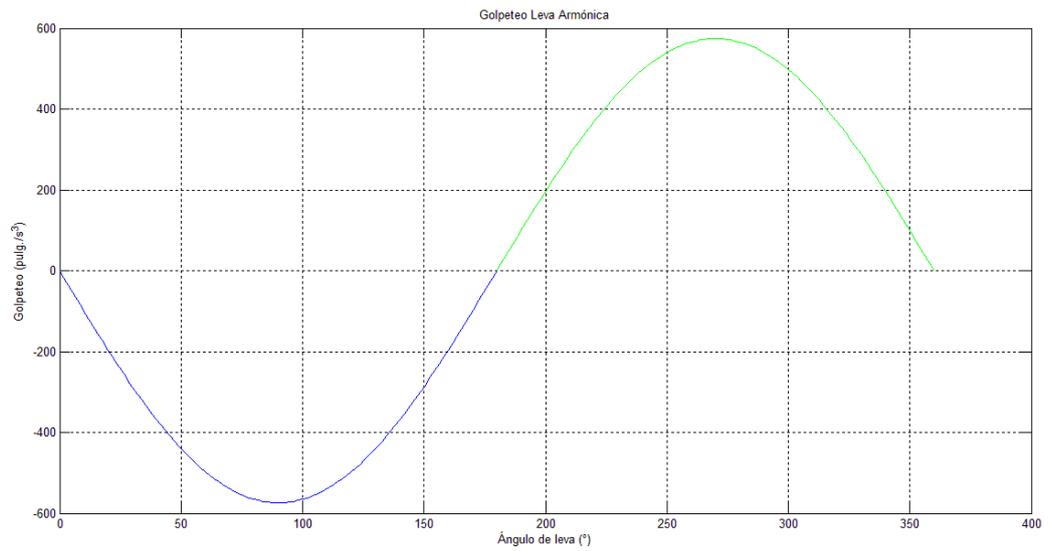


Figura 3.21 Golpeteo leva armónica

Se dibuja el círculo base de una pulgada, y se divide el mismo en 24 partes para lograr una buena precisión en el perfil.

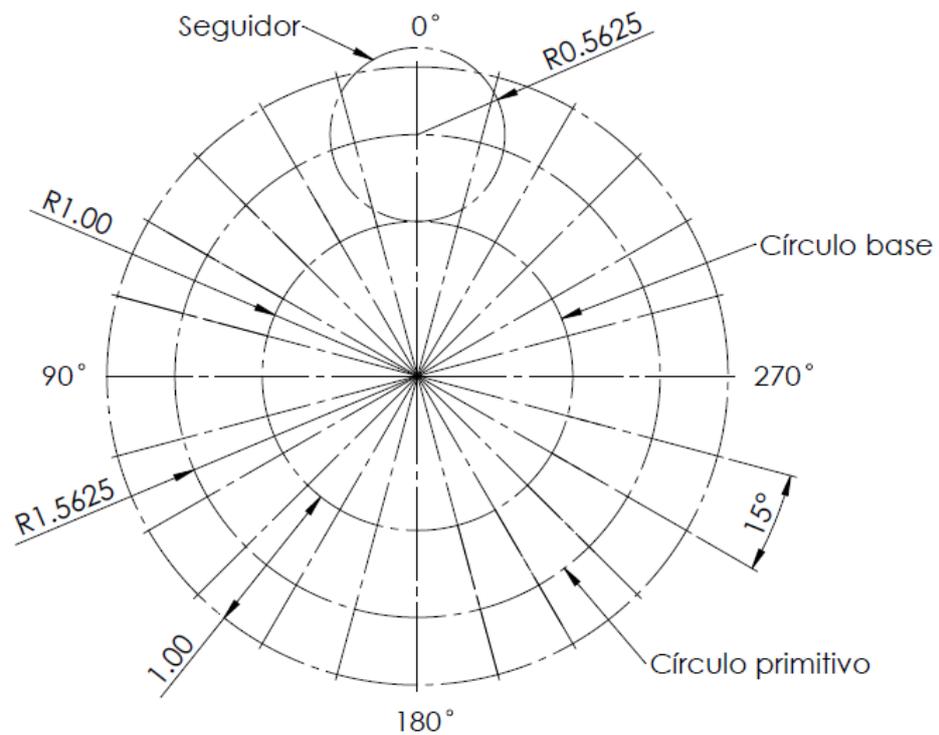


Figura 3.22 Construcción leva armónica

Al evaluar la función desplazamiento con un intervalo de 15° se obtiene:

Cuadro 3.4
Evaluación función desplazamiento leva armónica

Ángulo de leva ($^\circ$)	Radio (pulg.)
θ	R
0	0
15	0.0170
30	0.0670
45	0.1464
60	0.2500
75	0.3706
90	0.5000
105	0.6294
120	0.7500
135	0.8536
150	0.9300
165	0.9830
180	1
195	0.9830
210	0.9300
225	0.8536
240	0.7500
255	0.6294
270	0.5000
285	0.3706
300	0.2500
315	0.1464
330	0.0670
345	0.0170
360	0

Se transmiten los puntos y se unen mediante una spline para obtener el perfil final.

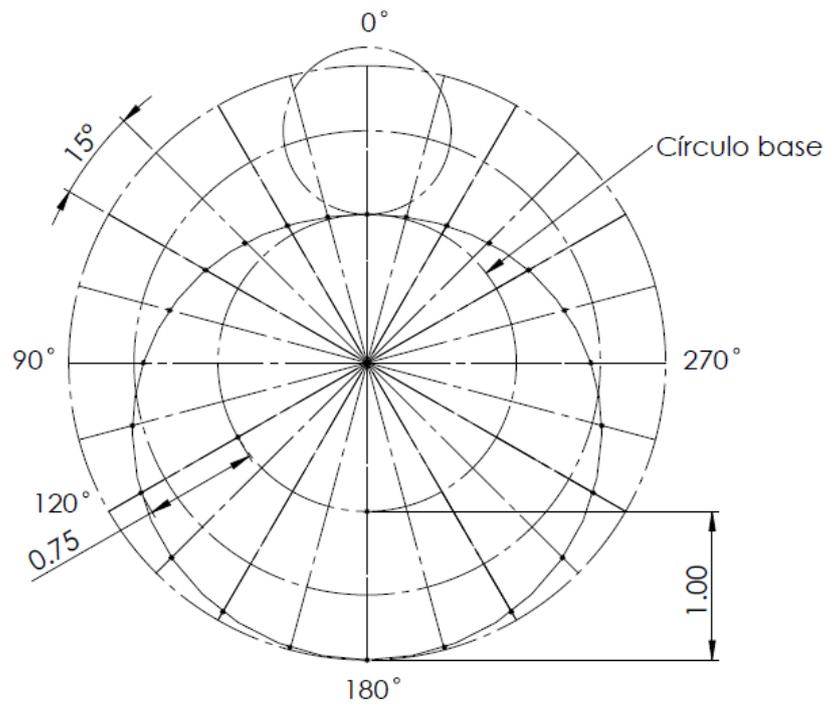


Figura 3.23 Construcción perfil leva armónica

Se utilizan las mismas dimensiones de montaje que las levas ya existentes provistas por el equipo.

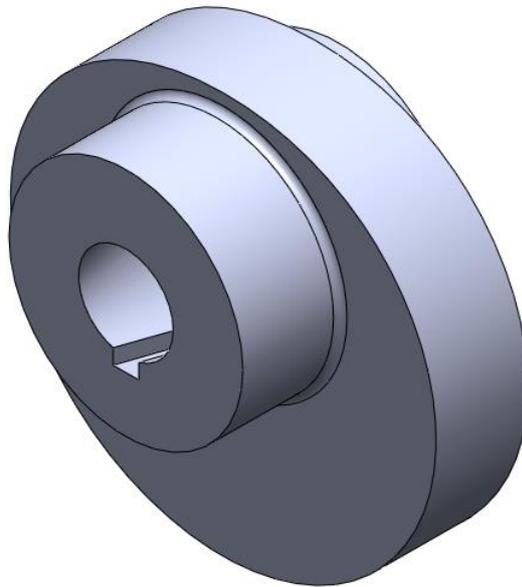


Figura 3.24 Leva armónica

3.5.1 Comprobación del perfil.

La comprobación del perfil es el paso final, pero estrictamente necesario para asegurar que el diseño geométrico es correcto y lograr un buen contacto entre leva y seguidor. Básicamente son dos condiciones las que se debe cumplir para asegurar un correcto funcionamiento, el ángulo de presión y el radio de curvatura.

Radio de curvatura.

Como se muestra en la ecuación 2.3, el radio de curvatura mínimo debe ser mayor al radio del seguidor en una proporción de 2 a 3 veces.

Con la ayuda de la ecuación 2.4 se evalúa la expresión a lo largo de todo el perfil de leva y se obtiene que el menor radio es de 2.28 pulgadas. Siendo mayor cuatro veces al radio del seguidor.

$$2.28 \gg 0.5625$$

Ángulo de presión.

Observando las características del equipo Tecquipment TM21 062 se aprecia que la excentricidad es nula, por lo que la gráfica del ángulo de presión a lo largo de todo el perfil es la siguiente:

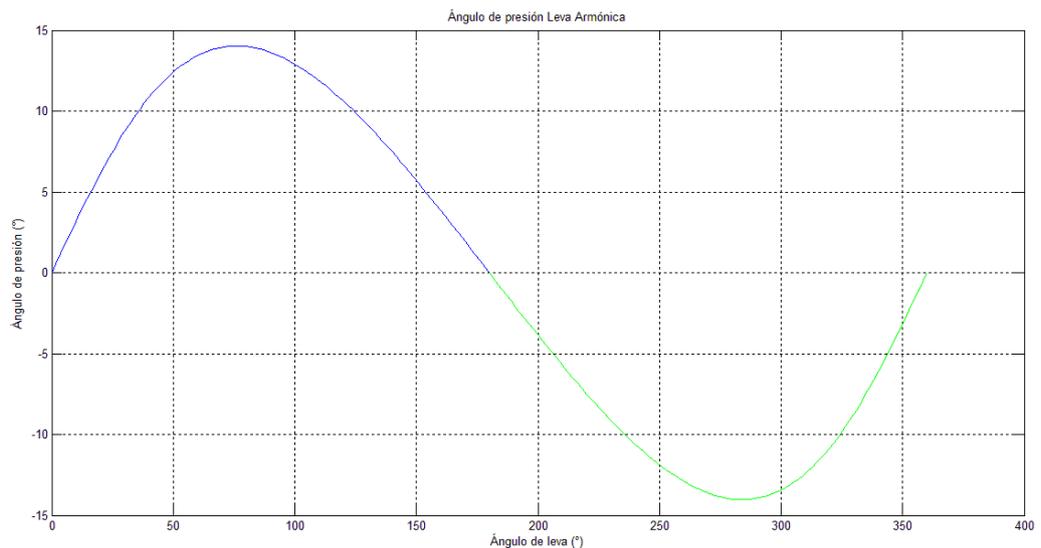


Figura 3.25 Ángulo de presión leva armónica

El ángulo de presión es muy inferior a los 30°, valor al cual se recomienda no acercarse. Por lo que se obtendrá un movimiento suave sin mayores vibraciones incluso a altas velocidades.

3.6 Diseño leva polinómica 3 4 5.

Para el dimensionamiento de la leva polinómica 3 4 5, tal como se expuso en el análisis previo del equipo, fue escogido un radio base de 1.1875 y una elevación de 0.85 pulgadas. Esto con el fin de obtener un diseño inicial que se adapte a las condiciones del equipo. Posteriormente se realizará un estudio para comprobar el diseño con estas dimensiones.

Con la intención de comprobar los beneficios y la versatilidad que se ha expuesto de las funciones polinómicas, ha sido planteado el diseño de una leva con la condición de doble detenimiento, de la siguiente manera:

Cuadro 3.5

Condiciones de diseño leva polinómica 3 4 5

Condición	Periodo (°)	Ángulo inicial (°)	Ángulo final (°)	Elevación (pulg.)
	β	θ_1	θ_2	h
Detenimiento	90	0	90	0
Ascenso	90	90	180	0 - 0.85
Detenimiento	90	180	270	0.85
Descenso	90	270	360	0.85 - 0

Con las ecuaciones ya demostradas en la parte teórica, se muestran a continuación los diagramas que se generan con los requerimientos de diseño planteados y una velocidad angular de 100 rpm.

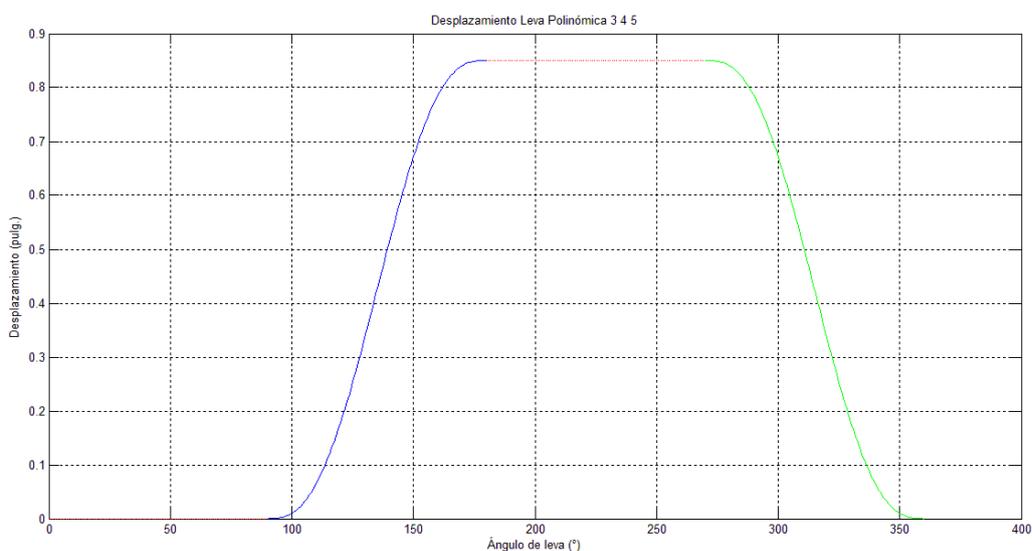


Figura 3.26 Desplazamiento leva polinómica 3 4 5

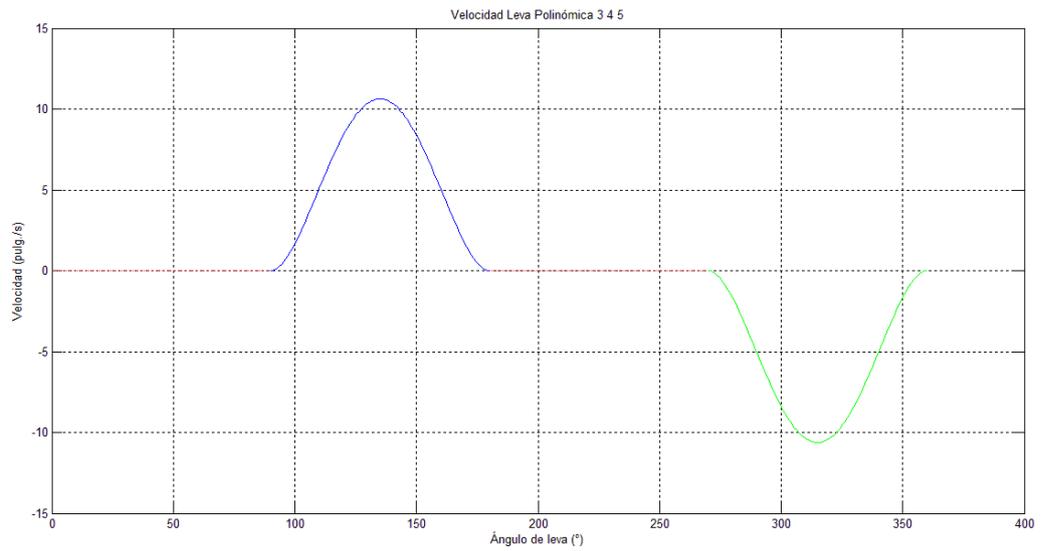


Figura 3.27 Velocidad leva polinómica 3 4 5

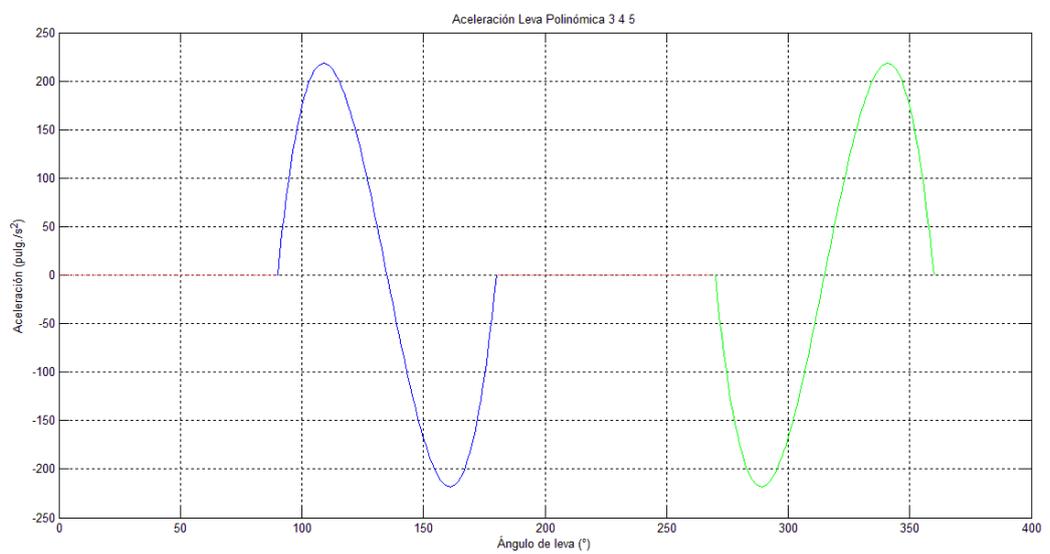


Figura 3.28 Aceleración leva polinómica 3 4 5

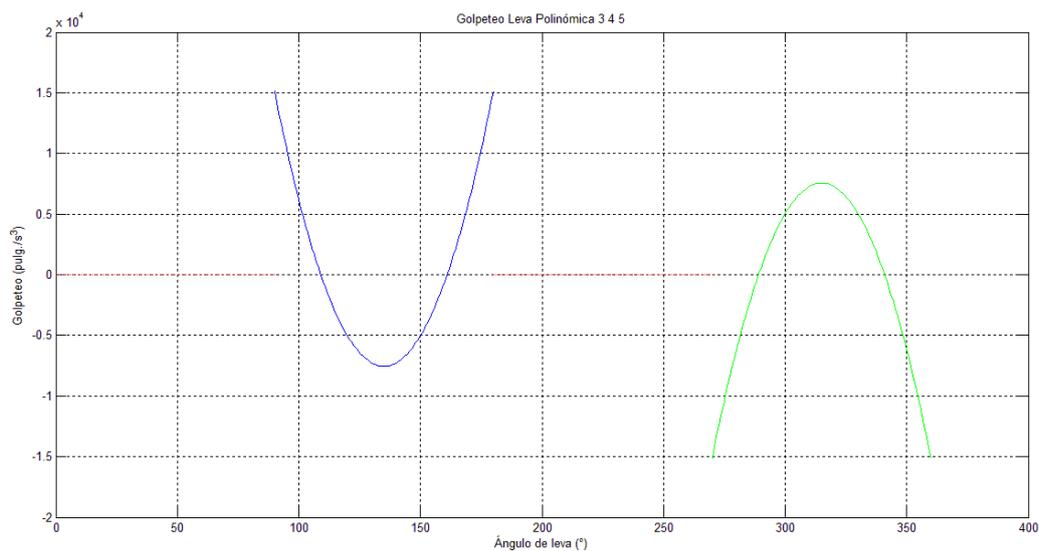


Figura 3.29 Golpeteo leva polinómica 3 4 5

Con los diagramas obtenidos, se procede a dibujar el perfil de leva. Se dibuja el radio base, y se lo divide en varias partes iguales. Para lograr una buena precisión se ha dividido en 24 partes, es decir, cada 15°.

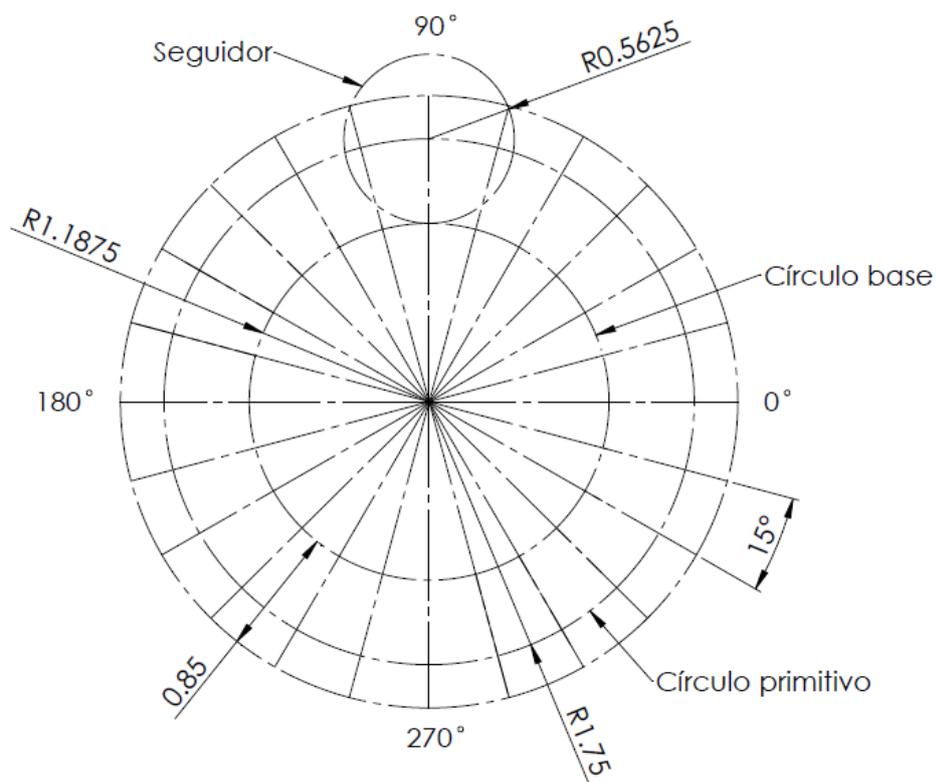


Figura 3.30 Construcción leva polinómica 3 4 5

Se evalúa la función desplazamiento con un intervalo de 15° , resultando:

Cuadro 3.6

Evaluación función desplazamiento leva polinómica 3 4 5

Ángulo de leva ($^\circ$)	Radio (pulg.)
θ	R
0 - 90	0
105	0.0302
120	0.1784
135	0.4250
150	0.6716
165	0.8198
180 - 270	0.8500
285	0.8198
300	0.6716
315	0.4250
330	0.1784
345	0.0302
360	0

Se transmiten las dimensiones y se unen mediante una spline:

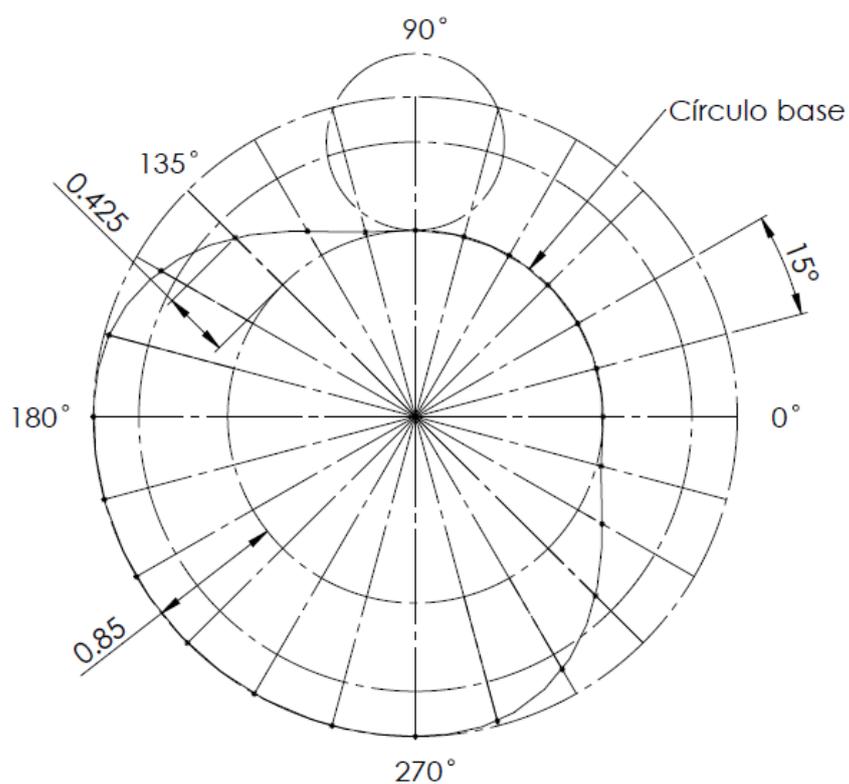


Figura 3.31 Construcción perfil leva polinómica 3 4 5

Se utilizan las mismas dimensiones de montaje que las levas ya existentes provistas por el equipo.

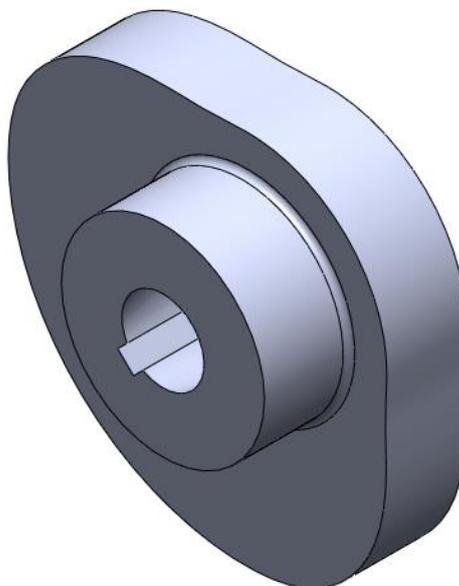


Figura 3.32 Leva polinómica 3 4 5

3.6.1 Comprobación del perfil.

Para asegurar un correcto funcionamiento, se deben satisfacer dos condiciones, tanto el ángulo de presión como el radio de curvatura.

Radio de curvatura.

$$|\rho_{\min}| \gg R_f \quad \text{Ec 2.3}$$

Como se indicó en teoría, si no se cumple con la expresión anterior, el seguidor de leva no tendrá un correcto contacto con todo el perfil. Si el seguidor tiene un diámetro más grande invadirá puntos adyacentes intentando acceder al punto deseado, provocando un deficiente funcionamiento del sistema.

$$\rho_{\text{paso}} = \frac{[(R_p + s)^2 + v^2]^{3/2}}{(R_p + s)^2 + 2v^2 - a(R_p + s)} \quad \text{Ec 2.4}$$

Se obtiene que el radio de curvatura mínimo es de 1.75 pulgadas, correspondiente al radio del círculo primario en el detenimiento inferior. De esta manera se comprueba que el radio de curvatura es mayor en más de tres veces al radio del seguidor.

$$1.75 \gg 0.5625$$

Ángulo de presión.

Como se estudió en la teoría, la expresión viene dada por:

$$\varphi = \arctan \frac{v - \varepsilon}{s + \sqrt{R_p^2 - \varepsilon^2}} \quad \text{Ec 2.2}$$

Evaluando a lo largo de todo el perfil se obtiene:

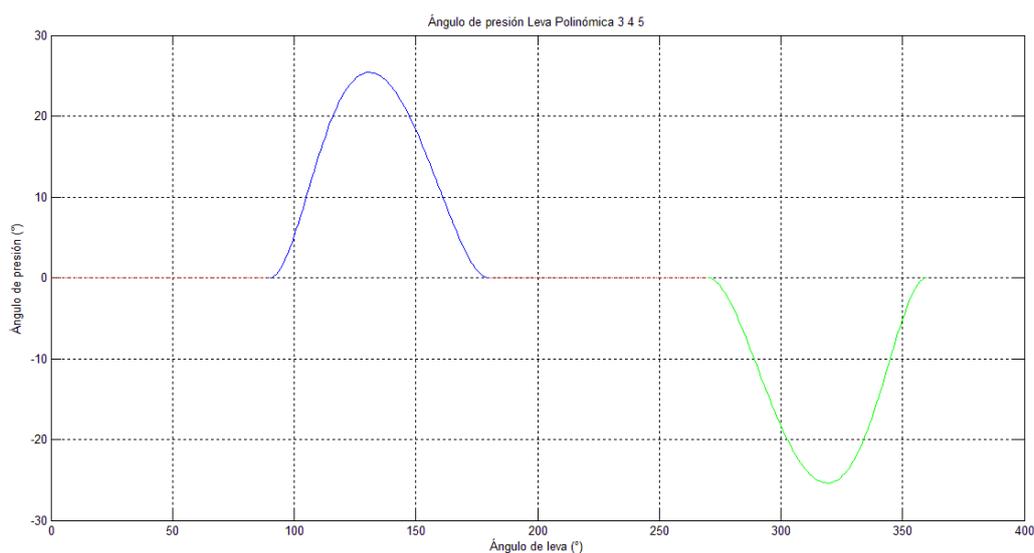


Figura 3.33 Ángulo de presión leva polinómica 3 4 5

Como se puede apreciar visiblemente el ángulo de presión de la leva polinómica 3 4 5 es menor a 30° , por lo que no habrán fuerzas que ocasionen mayores desgastes ni vibraciones debido a la fricción. Se puede concluir que la leva puede ser fabricada bajo estas condiciones.

3.7 Diseño leva Bezier 8

Para el dimensionamiento de la leva, se ha escogido un radio base de 1.1875 y una elevación de 0.85 pulgadas. Al igual que en el caso anterior, ha sido planteado el diseño con la condición de doble detenimiento, de la siguiente manera:

Cuadro 3.7
Condiciones de diseño leva Bezier 8

Condición	Periodo (°)	Ángulo inicial (°)	Ángulo final (°)	Elevación (pulg.)
	β	θ_1	θ_2	h
Detenimiento	90	0	90	0
Ascenso	90	90	180	0 - 0.85
Detenimiento	90	180	270	0.85
Descenso	90	270	360	0.85 - 0

Con las ecuaciones de la parte teórica, se muestran a continuación los diagramas que se generan con los requerimientos de diseño planteados y una velocidad angular de 100 rpm.

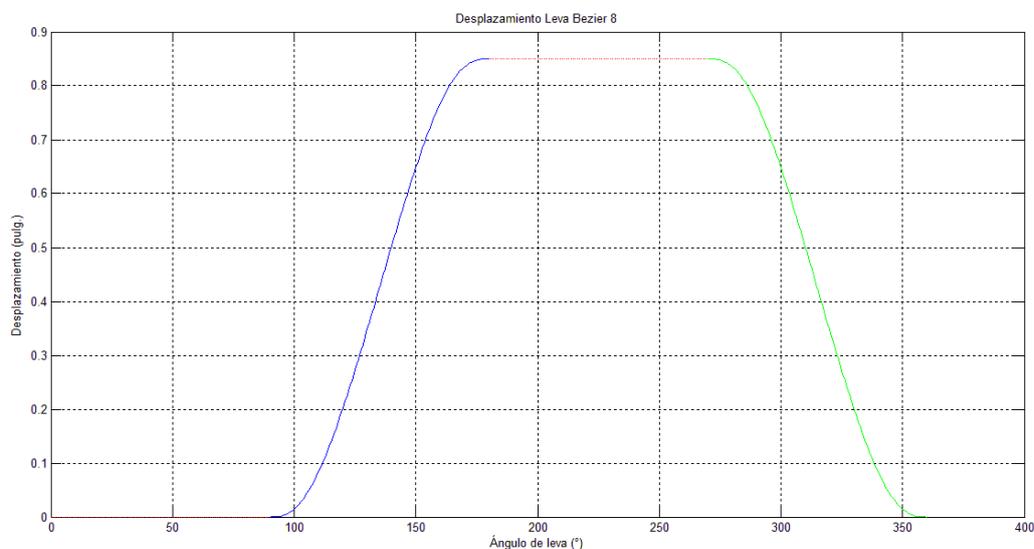


Figura 3.34 Desplazamiento leva Bezier 8

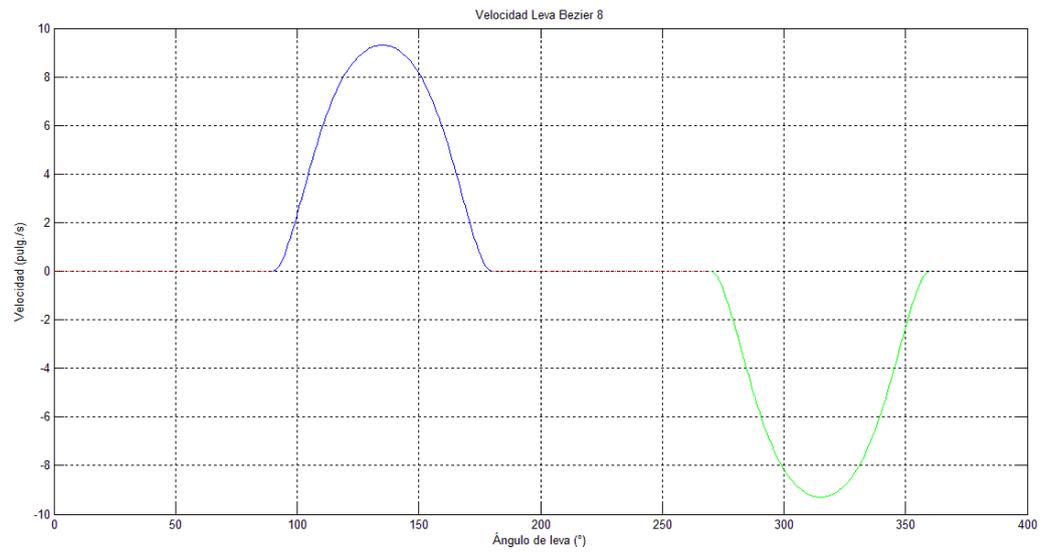


Figura 3.35 Velocidad leva Bezier 8

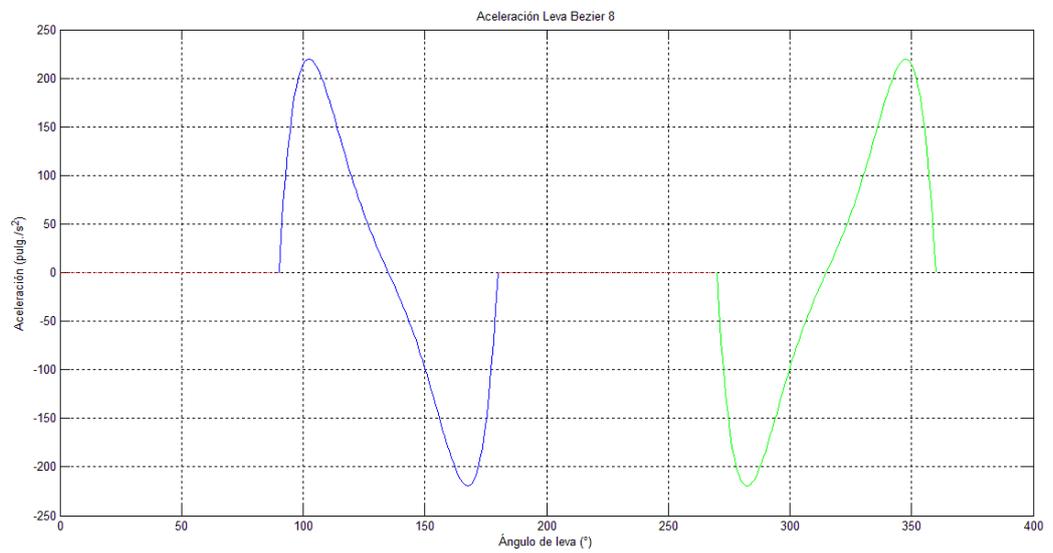


Figura 3.36 Aceleración leva Bezier 8

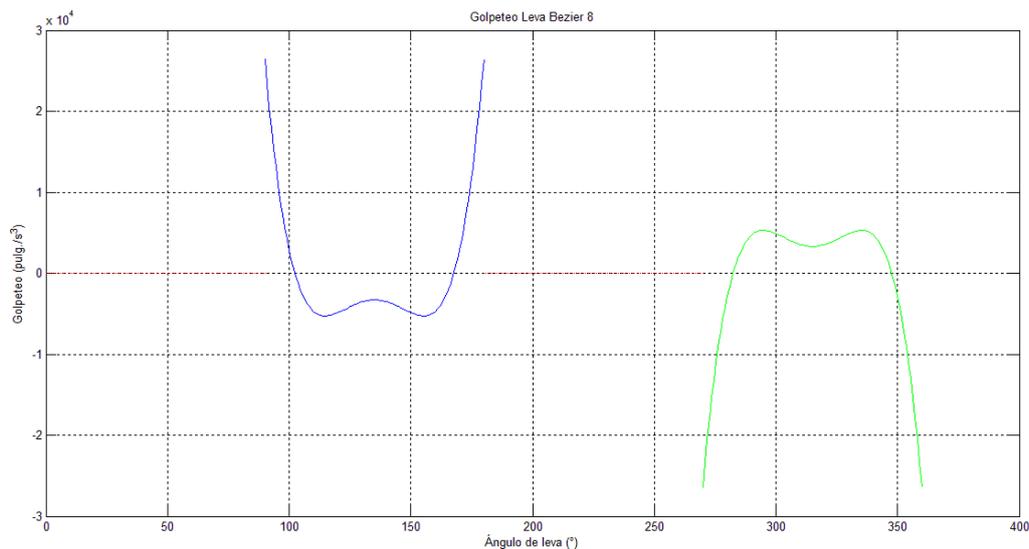


Figura 3.37 Golpeteo leva Bezier 8

Se procede a continuación a dibujar el perfil de leva. Al tener la misma dimensión de círculo base que la leva polinómica, se considera la Figura 3.30 para la construcción.

Al evaluar la función desplazamiento con un intervalo de 15° :

Cuadro 3.8

Evaluación función desplazamiento leva Bezier 8

Ángulo de leva ($^\circ$)	Radio (pulg.)
θ	R
0 - 90	0
105	0.0416
120	0.2017
135	0.4250
150	0.6483
165	0.8084
180 - 270	0.8500
285	0.8084
300	0.6483
315	0.4250
330	0.2017
345	0.0416
360	0

Se transmiten las dimensiones desde el círculo base en forma radial y se unen mediante una spline para obtener el perfil final.

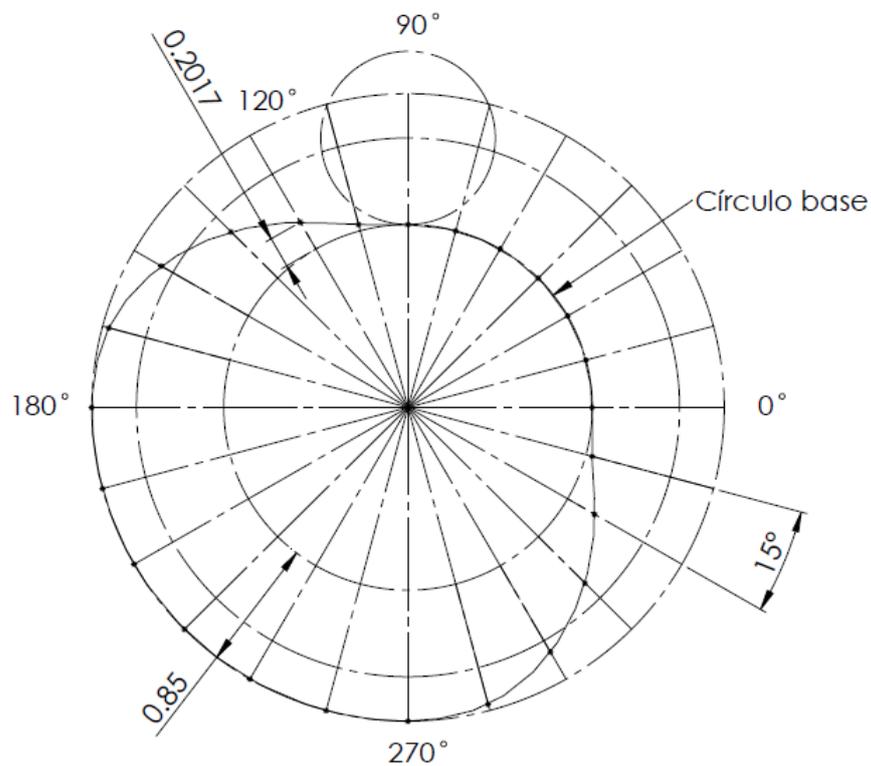


Figura 3.38 Construcción perfil leva Bezier 8

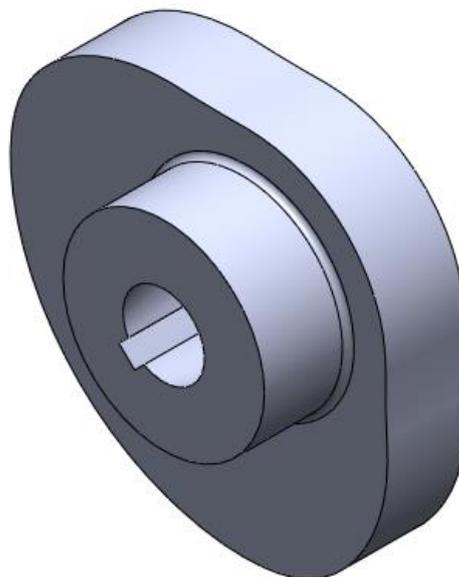


Figura 3.39 Leva Bezier 8

3.7.1 Comprobación del perfil.

Para asegurar un correcto funcionamiento, se deben satisfacer dos condiciones, tanto el ángulo de presión como el radio de curvatura.

Radio de curvatura.

Nuevamente, el radio de curvatura mínimo es de 1.75 pulgadas, correspondiente al detenimiento inferior en el perfil. Se cumple entonces la condición mencionada en la ecuación 2.3.

$$1.75 \gg 0.5625$$

Ángulo de presión.

Como se estudió en la teoría, se evalúa la expresión de la ecuación 2.2.

Observando las características del equipo Tecquipment TM21 062 se aprecia que la excentricidad es nula, por lo que la gráfica del ángulo de presión a lo largo de todo el perfil es la siguiente:

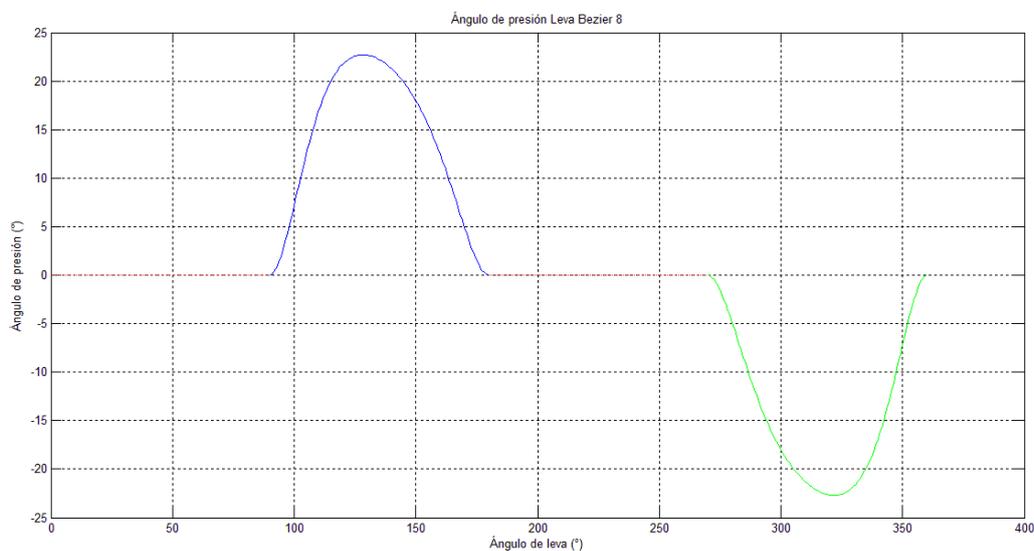


Figura 3.40 Ángulo de presión leva Bezier 8

Observando la figura, se aprecia que el ángulo de presión de la leva Bezier de grado 8 es menor incluso a 25°, lo que evitará desgaste y vibraciones excesivas.

3.8 Comprobación de los perfiles de forma analítica.

Para comprobar los perfiles que fueron obtenidos, serán realizados también de forma analítica.

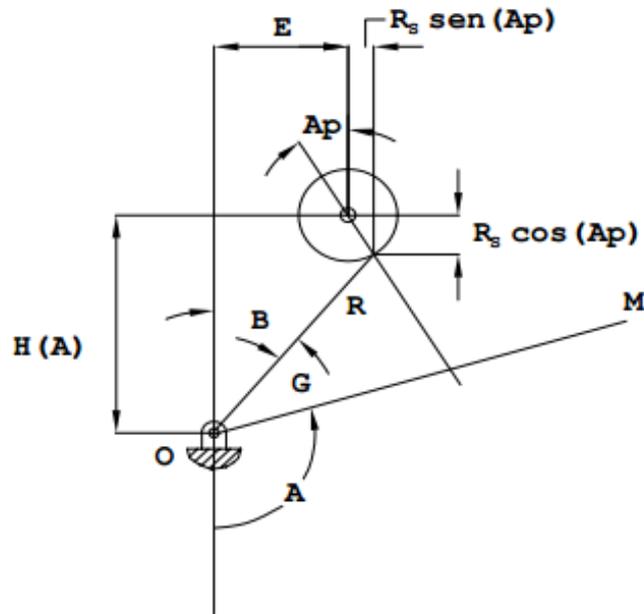


Figura 3.41 Determinación analítica del perfil

El perfil será determinado a partir de sus coordenadas polares (R y G) medidas a partir de la línea de referencia del cuerpo OM .

$$B = \arctan \frac{\varepsilon + R_f \cdot \text{sen}(\varphi)}{s + R_p - R_f \cdot \text{cos}(\varphi)} \quad \text{Ec 3.11}$$

Teniendo en cuenta la relación existente:

$$\theta + G + B = \pi \quad \text{Ec 3.12}$$

$$G = \pi - \theta - B \quad \text{Ec 3.13}$$

Sustituyendo:

$$G = \pi - \theta - \arctan \frac{\varepsilon + R_f \cdot \text{sen}(\varphi)}{s + R_p - R_f \cdot \text{cos}(\varphi)} \quad \text{Ec 3.14}$$

De la geometría se obtiene:

$$R^2 = [s + Rp - R_f \cdot \cos(\varphi)]^2 + [\varepsilon + R_f \cdot \text{sen}(\varphi)]^2 \quad \text{Ec 3.15}$$

A medida que el ángulo de leva varía de 0 a 360°, por medio de las expresiones se pueden ir calculando los puntos del perfil de leva.

Los perfiles generados mediante las ecuaciones 3.14 y 3.15 se muestran a continuación:

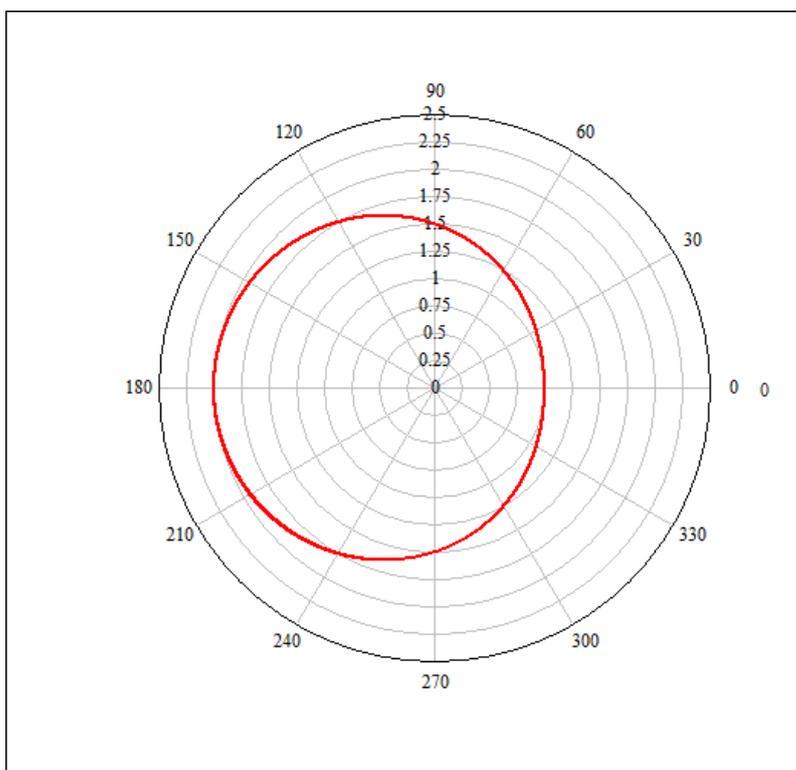


Figura 3.42 Perfil analítico leva armónica

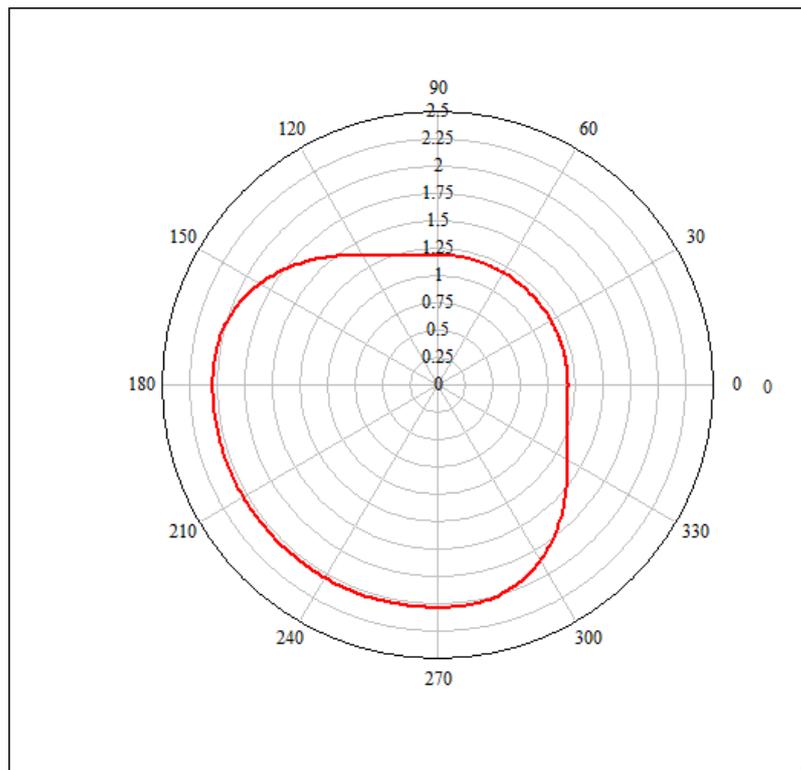


Figura 3.43 Perfil analítico leva polinómica 3 4 5

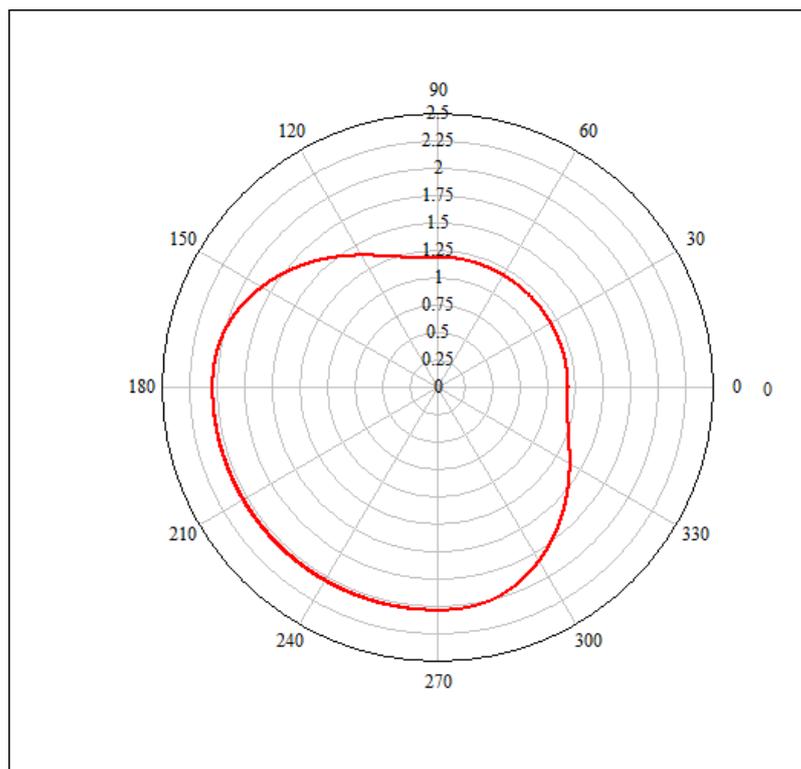


Figura 3.44 Perfil analítico leva Bezier 8

3.9 Manufactura de levas.

3.9.1 Levas provistas por el equipo Tecquipment TM21 062.

Fundición gris.

Las levas provistas por el equipo fueron fabricadas en fundición gris. Se denomina fundición gris porque el aspecto de su fractura es de color gris. Encontrando el carbono en alto grado o en su totalidad en estado libre en forma de grafito laminar.

Características.

La mayoría de las fundiciones grises son aleaciones hipoeutécticas que contienen entre 2.5 y 4% de carbono. El proceso de grafitización se realiza con mayor facilidad si el contenido de carbono es elevado.

Propiedades.

- El peso específico de la fundición gris es de 7 a 7.2 N/m³.
- La temperatura de fusión dependiendo de la composición varía en un promedio de 1200 °C.
- La fundición gris tiene una carga de rotura a la tracción, de cerca de 15 kg/mm², llega a los 30, 40 y 45 kg/mm². La resistencia a la compresión es mayor, y para las fundiciones grises normales resulta cerca de tres veces la de la tracción, razón primordial por la que se utiliza este material para la elaboración de levas.
- La fundición gris tiene una dureza de 140 a 250 Brinell, se puede mecanizar fácilmente, porque la viruta se desprende mejor por la presencia de grafito liberado que lubrica el paso de la viruta sobre el corte de la herramienta.



Figura 3.45 Levas provistas por el equipo Tecquipment TM21 062

Ventajas.

- Las piezas obtenidas de fundiciones grises son en general más baratas que las de acero (siendo el material que más se utiliza en los talleres y fábricas de maquinaria, motores, instalaciones, y otros).
- Su fabricación es también más sencilla por emplearse instalaciones menos costosas y realizarse la fusión a temperaturas relativamente poco elevadas y más bajas que aquellas correspondientes al acero.
- Para mecanizar las fundiciones grises son en lo general mucho más fáciles que los aceros.
- Con las fundiciones grises se pueden fabricar con relativa facilidad piezas de grandes dimensiones y también piezas pequeñas y complicadas que se pueden obtener con gran precisión de formas y medidas. Además en ellas es mucho menos frecuente la aparición de zonas porosas que en las piezas fabricadas con acero fundido.
- En la obtención de la fundición gris exige menos precauciones que la del acero y sin necesidad de conocimientos técnicos muy especiales, se llegan a obtener fundiciones con características muy aceptables para numerosas aplicaciones.
- La solidificación en las fundiciones grises presentan mucho menos contracción que los aceros y, además, su fabricación no exige como en los aceros, el empleo de refractarios relativamente especiales de precio elevado en el mercado.

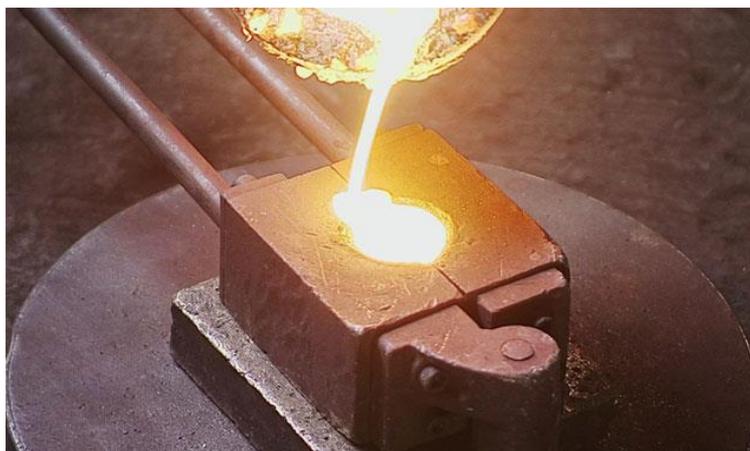


Figura 3.46 Fundición gris

Aplicaciones.

- Bases o pedestales para máquinas.
- Herramientas.
- Bastidores para maquinaria pesada
- Bloques de cilindros para motores de vehículos.
- Discos de frenos.
- Herramientas agrícolas entre otras.

3.9.2 Selección de material.

Se seleccionará aquel material que cumpla con los requerimientos principales, los cuales son fácil maquinado y una ideal resistencia a la compresión.

Tabla 3.1
Características y aplicaciones de diferentes aceros.

Color	Acero	Características y aplicaciones
	1018	Acero no aleado de cementación para uso en partes de maquinaria, aceros generalmente estirados en frío, piñones, levas, tornillos sin fin, pernos de dirección, etc.
	1045	Acero no aleado empleado en flechas y partes de maquinaria, adecuado para temple superficial, flechas, piñones, engranes, pernos, tornillos, etc.
	1060	Acero para uso en construcción de maquinaria, con adecuada respuesta al temple, resistente al desgaste, discos de embrague, ejes de transmisión, portaherramientas, implementos agrícolas, etc.
	12L14	Acero con adiciones de plomo con excelente maquinabilidad, empleado en tornos automáticos para alta producción, bujes, coples, conexiones.
	4140R	Piezas que requieren elevada resistencia de tracción y alta tenacidad, cigüeñales, engranes de transmisión, etc.
	4140T	Acero templado y revenido para aplicaciones directas, ya con dureza de trabajo.
	4340R	Recocido de alta templabilidad, adecuado para flechas y engranes de grandes secciones donde se requiere alta ductibilidad y resistencia al choque.
	4340T	Acero templado y revenido para aplicaciones directas, ya con dureza de trabajo.
	8620	Acero para piezas que requieren de dureza superficial y núcleo tenaz. Fabricación de engranes, piñones, satélites planetarios, etc.

(RENSON, 2015)

La tabla permite conocer que el mejor material para la elaboración de las levas es el acero AISI 1018, tanto por las propiedades mecánicas que se muestran a continuación como también por su facilidad de encontrarlo en el mercado.

Acero AISI 1018.

También conocido como acero de transmisión. Este acero de bajo y medio carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono.

Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria. Propiedad primordial para el uso en la fabricación de levas, que serán usadas a compresión por parte del seguidor.

Propiedades.

- Dureza: 126 HB
- Esfuerzo de fluencia: 370 MPa
- Esfuerzo máximo: 440 Mpa
- Elongación máxima: 15% (en 50 mm.)
- Reducción de área: 40%
- Módulo de elasticidad: 205 GPa
- Maquinabilidad: 76% (AISI 1212 = 100%)

3.9.3 Procesos de manufactura efectuados.

Una vez definido el material, Acero AISI 1018 o acero de transmisión, para la fabricación de las levas se toma en cuenta el diseño previo para el dimensionado y compra del material.

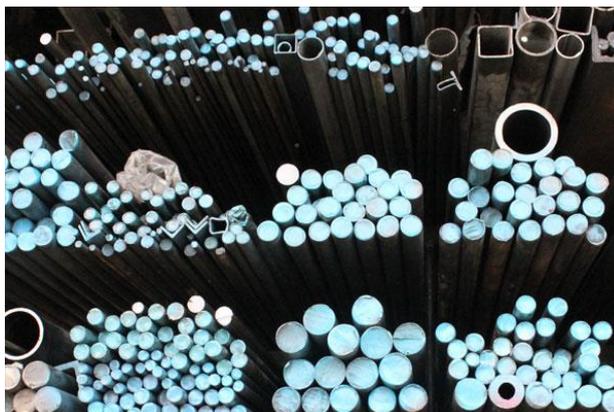


Figura 3.47 Acero de transmisión

Se compra un cilindro de acero de transmisión de diámetro 60 mm. y 120 mm. de largo.

Corte.

Se utiliza una sierra de vaivén para dividir en tres cilindros, de los cuales cada uno tendrá un largo de 40 mm.



Figura 3.48 Sierra de vaivén



Figura 3.49 Materia prima

Cada parte cortada será utilizada para fabricar los tres tipos de leva diseñados (polinómica 3 4 5, Bezier 8 y armónica).

Cilindrado y refrentado.

Cada bloque debe ser cilindrado hasta un diámetro de 57.8 mm. y refrentado en un largo de 39.8 mm. en un torno paralelo, obteniendo así la materia prima ideal para iniciar con la manufactura.



Figura 3.50 Torno paralelo

Se utiliza cuchillas de acero rápido y una velocidad de corte de 20 m/min.

El avance será manual con el fin de visualizar a cada momento la correcta medición de las unidades diametrales.

Cada pieza es reducida a la misma forma, ya que las medidas de montaje en el equipo deben ser iguales para un correcto acople de los elementos.

Se realiza un cilindrado en donde posteriormente deberá ser maquinado el perfil de leva, se desbasta según las medidas mostradas en la Figura 3.51.

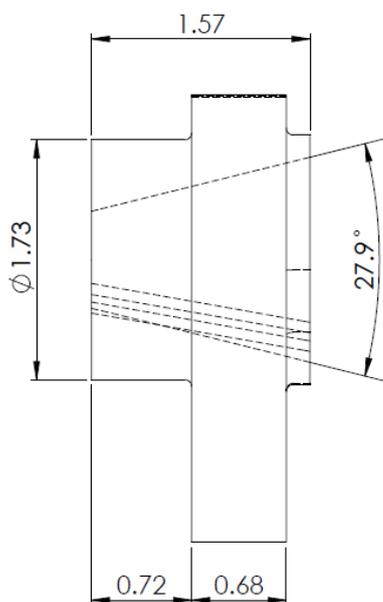


Figura 3.51 Vista lateral perfil de leva

Para el descentramiento que posee el perfil con respecto al eje base de montaje es utilizado un mandril de cuatro mordazas y se lo ubica con el desplazamiento de radios entre cada eje.



Figura 3.52 Mandril de cuatro mordazas

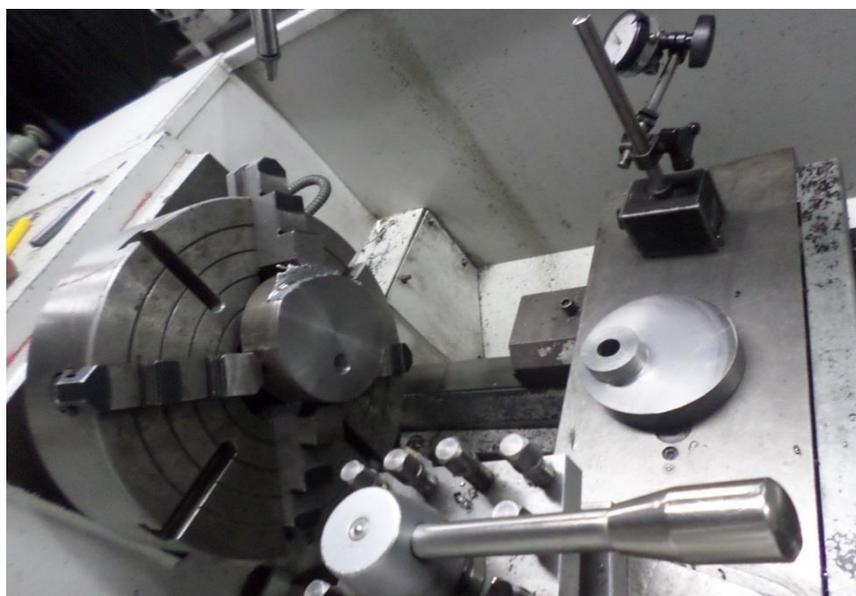


Figura 3.53 Sujeción de material. Materia prima maquinada

Cono interno de sujeción.

Las levas poseen un cono interno, el cual es utilizado para el montaje de la misma sobre el eje motor del equipo.

El cono es manufacturado con torno usando su plataforma giratoria graduada.



Figura 3.54 Plataforma giratoria graduada

Como se pudo observar en la Figura 3.51, el ángulo del cono necesario para el montaje es de 27.9° , el cual debe ser ingresado en la plataforma, como se muestra:



Figura 3.55 Graduación plataforma giratoria

Para comprobar que el cono ha sido realizado correctamente, es maquinado un eje cónico con el mismo ángulo.



Figura 3.56 Prueba de dimensiones cono interno

Fresado CNC.

Después de manufacturada la pieza base, como la mostrada en la Figura 3.56, se procede a maquinar el perfil de leva mediante una fresadora comandada por control numérico.

Se utiliza una fresadora CNC Milltronics con controlador Centurion 6. Las simulaciones y programas de ejecución serán realizados en Siemens NX9.



Figura 3.57 Fresadora CNC Milltronics

Programación.

Las fresas utilizadas son de diámetro 20 mm., 12 mm. para desbaste, y de 8mm. para acabado.

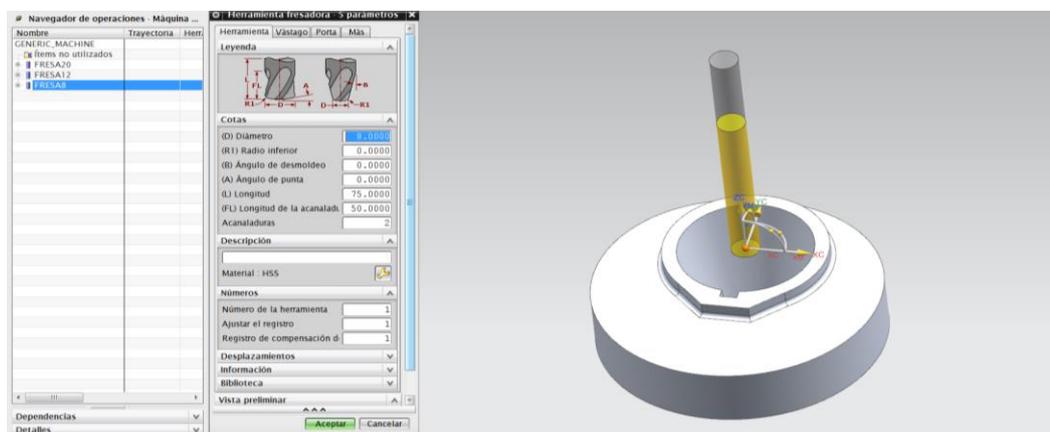


Figura 3.58 Inicialización de herramientas

Se parte ubicando la pieza base, y el perfil a generar. El programa reconocerá donde desbaste para retirar el material. De igual manera se ubica el punto de inicio de la herramienta, el 0 de herramienta y el 0 de pieza.

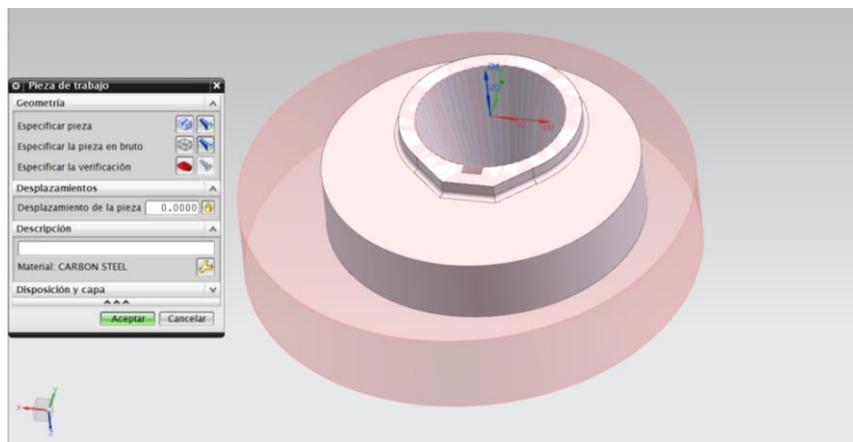


Figura 3.59 Pieza inicial y perfil final

Una vez realizado este procedimiento, el primer proceso que se inicializa es el desbaste del perfil, es decir, la fresa ingresará al cilindro generando una cavidad con la forma del perfil.

Los parámetros de corte son obtenidos del prontuario de máquinas de Larburu para un acero al carbono 0.15% de dureza 125 HB como lo es el acero AISI 1018 seleccionado previamente.

Material	Dureza Brinell HB	Resistencia a la tracción kg/mm ²	Avance s, en mm por vuelta				
			0,3-0,05	0,7-0,3-0,1	1,2-0,3-0,15	2-0,4-0,2	3-0,4
			Velocidad de corte v, m/min.				
Acero al carbono							
C 0,15%	125	45	280-440	170-240-330	100-200-260	60-150-200	35-125
C 0,35%	150	60	235-370	140-200-280	80-165-210	45-120-160	25-100
C 0,70%	250	85	185-300	110-155-220	60-130-170	35- 90-125	20-70

Figura 3.60 Parámetros de fresado

(Larburu, 1990)

El programa da la facilidad de ingresar la velocidad de corte para acero de transmisión, como muestra la Figura 3.62 y mediante la calculadora interna provee el resto de parámetros.

El proceso se denomina fresado de cavidad. La herramienta será de diámetro 20 mm. por la cantidad de material que debe desbaste en su recorrido.

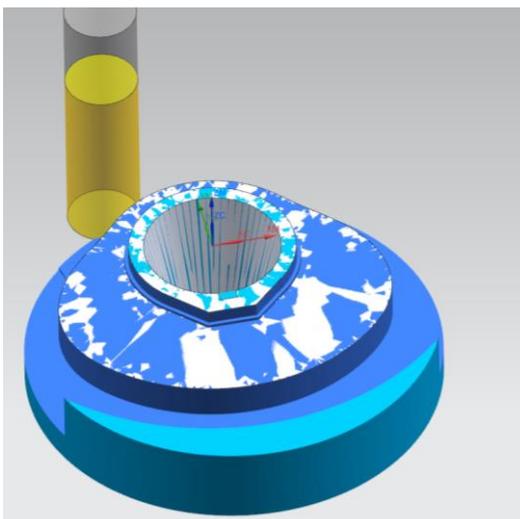


Figura 3.61 Fresado de cavidad

El siguiente proceso es dar un mejor acabado al perfil de leva. Se realiza lo mencionado con la operación Zlevel, que ira al contorno del perfil para eliminar excesos de material.

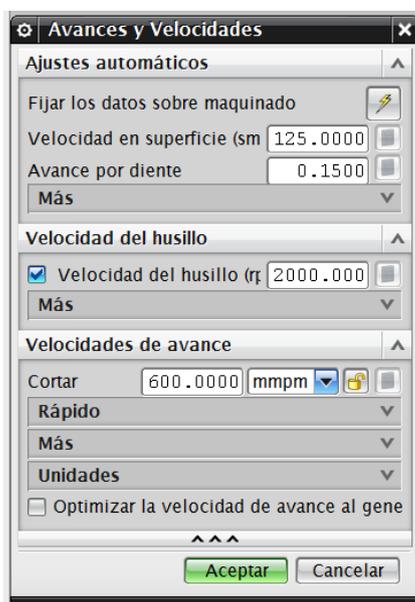


Figura 3.62 Ingreso de avances y velocidades

La fresa utilizada será de 12 mm. para el ingreso en el canal de la cavidad. De igual manera los parámetros de corte serán ajustados mediante la calculadora del programa.

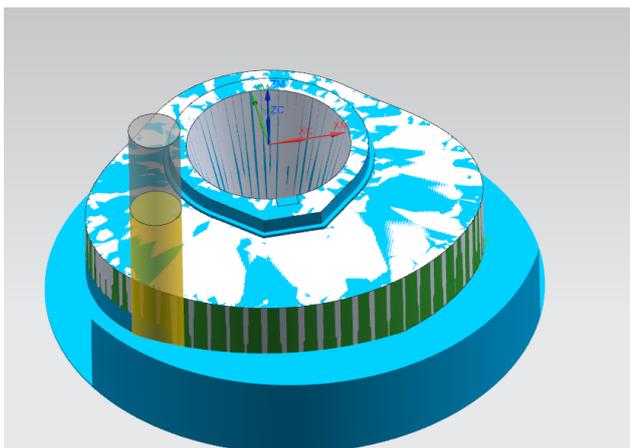


Figura 3.63 Operación Zlevel en el perfil de leva

Para el detalle final de acabado en la parte superior se utilizará la fresa de 8 mm., con la cual se dará un acabado final.

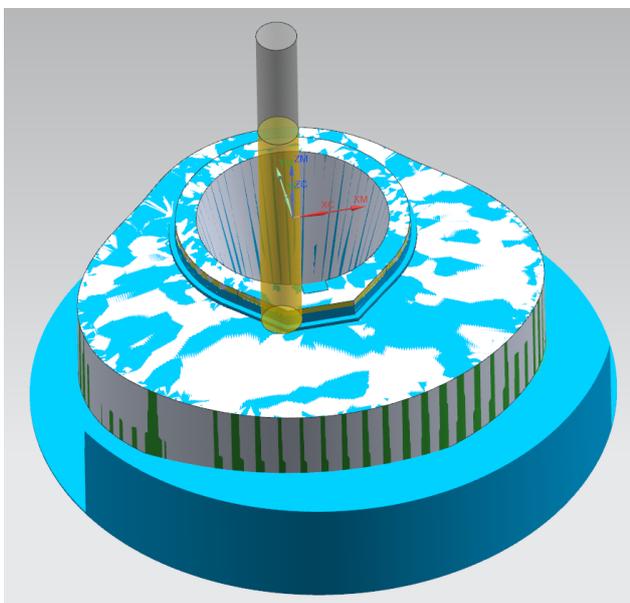


Figura 3.64 Operación Zlevel detalle de montaje superior

Una vez programado este último proceso, se post procesa para generar el código G que será ingresado a la fresadora CNC.

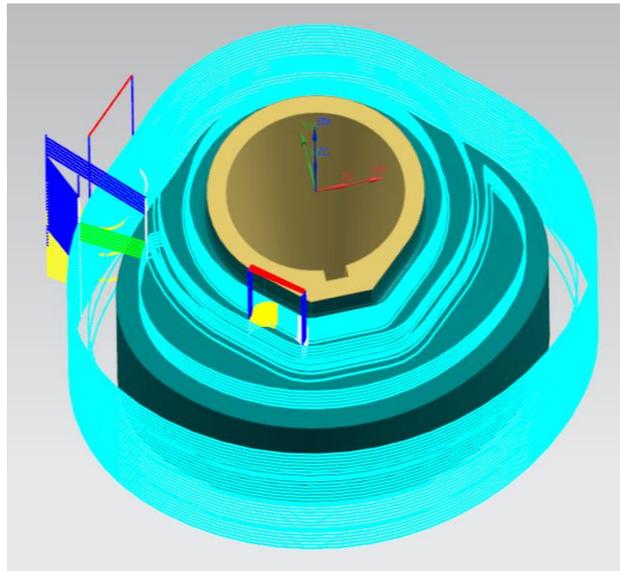


Figura 3.65 Post procesado

Maquinado.

Lo indispensable para la inicialización del maquinado es colocar el 0 de pieza y el 0 de máquina. Para lo cual se utiliza un palpador que permite el posicionamiento ideal del 0 de pieza. También puede usarse comparadores de reloj o simplemente un papel que roce entre la herramienta y la pieza.

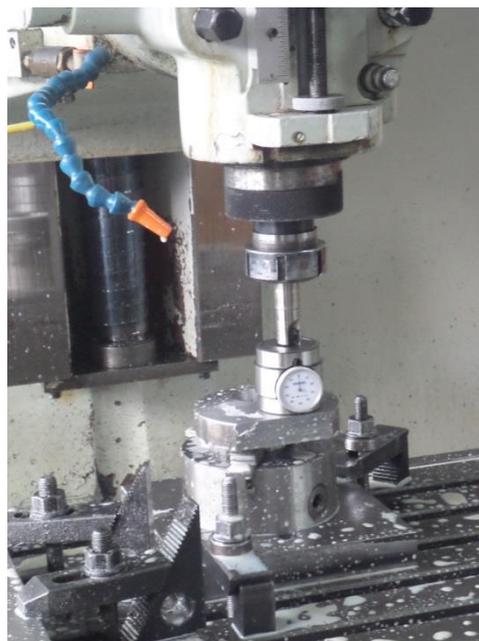


Figura 3.66 Comparador de reloj para herramienta

Con la herramienta se debe medir su distancia frente al 0 de pieza, para evitar la colisión y el maquinado correcto, se utiliza un comparador de reloj.

Mediante la interfaz de usuario se ubican todos los parámetros de la pieza y consiguente el programa a iniciar.



Figura 3.67 Panel ingreso de variables

Para evitar el desgaste de la herramienta se vierte refrigerante líquido, el cual permitirá que la herramienta no pierda su calidad de desbaste.

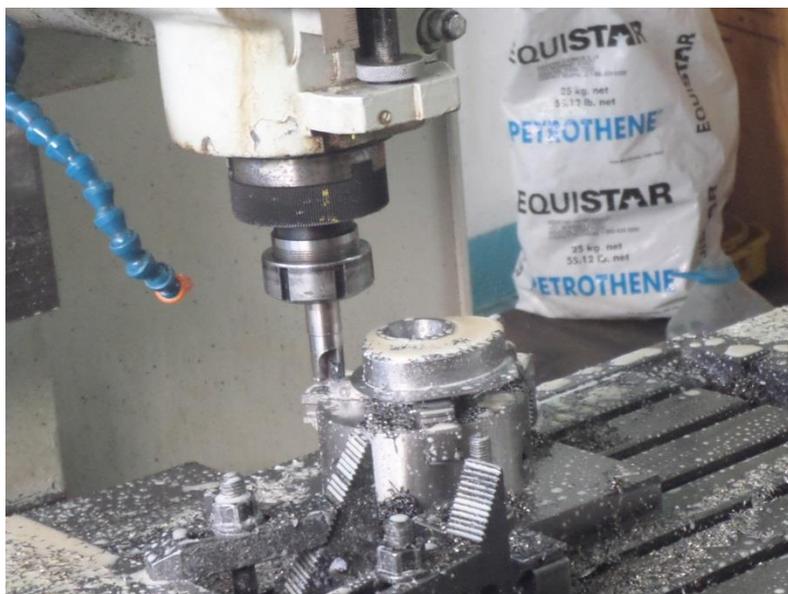


Figura 3.68 Refrigerante sobre pieza

Una vez terminado el proceso de maquinado, el perfil de leva queda listo para el último proceso.



Figura 3.69 Perfil final maquinado

Manufactura de chaveta de montaje.

Para la realización de la ranura de chaveta para la sujeción de la leva, se utilizará el corte por electro hilo el cual debe ingresar al cono de manera paralela para el corte efectivo

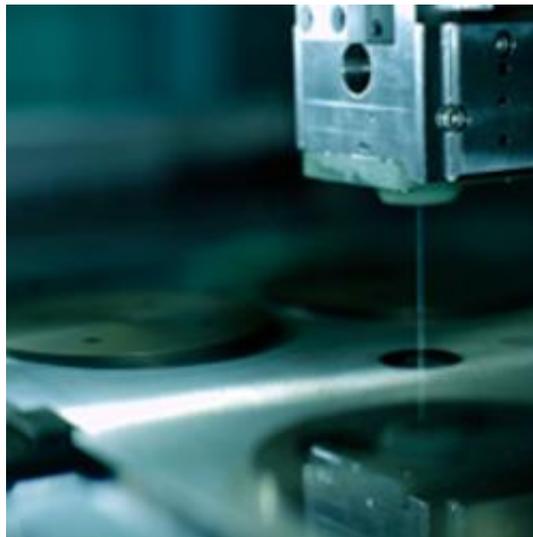


Figura 3.70 Corte por electro hilo

Finalmente es posible mostrar las levas manufacturadas con el diseño elaborado anteriormente.



Figura 3.71 Vista frontal levas manufacturadas



Figura 3.72 Vista posterior levas manufacturadas

3.10 Diseño electrónico.

Considerando inicialmente que en el manejo del equipo es necesario efectuar el cambio de giro y modificar la velocidad del motor, ha sido planteado el diseño e implementación de un puente en H y el empleo de modulación por ancho de pulso (PWM) por medio de una salida digital de Arduino.

PWM es un método que se utiliza para modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica con el objetivo de controlar el monto de energía que se transmite hacia una carga.

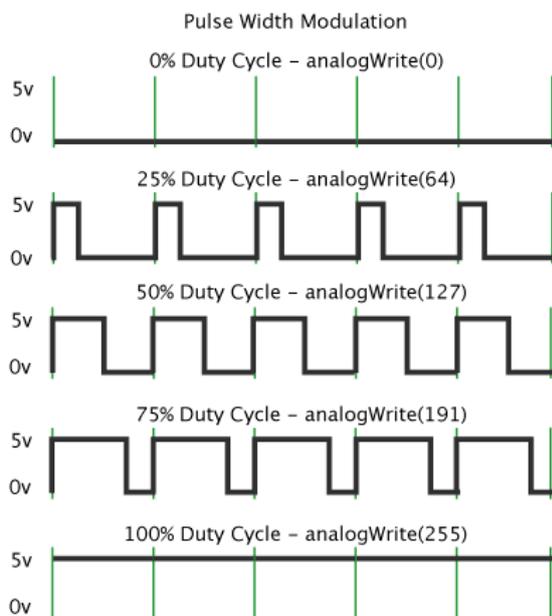


Figura 3.73 Arduino PWM

Será necesario también implementar un circuito que provea la alimentación de 110 V al motor, una etapa de filtrado para el acelerómetro analógico, una reducción de tensión para leer los pulsos generados por el sensor óptico además de un circuito de paro de emergencia.

Especificaciones del motor:

Marca:	NECO (Normand Electrical Co. Ltd.)
Serie:	A 134267 B
Potencia:	0.33 HP
Tensión:	110 VDC
Intensidad:	3.6 A
Velocidad:	2300/500 rpm
Tipo:	Shunt

3.10.1 Cambio de giro y modulación por ancho de pulso.

Para realizar el cambio de giro se planteó el uso de un puente en H con relé, como muestra la Figura 3.75, de manera que se efectúa el cambio de polaridad del motor y en consecuencia su cambio de giro.

Para asegurar un buen funcionamiento y evitar daños en la placa Arduino se opta por separar la parte de control con la de potencia mediante un optoacoplador con la intención de evitar posibles fallas por ruidos generados en potencia.



El optoacoplador elegido para el proyecto es el 4N25 de ST Microelectronics.

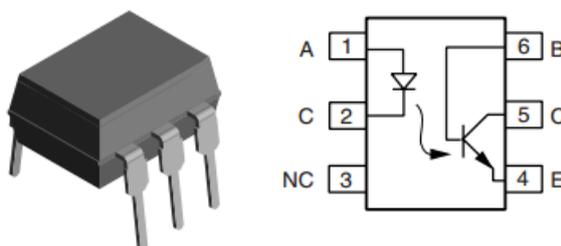


Figura 3.74 Optoacoplador 4N25

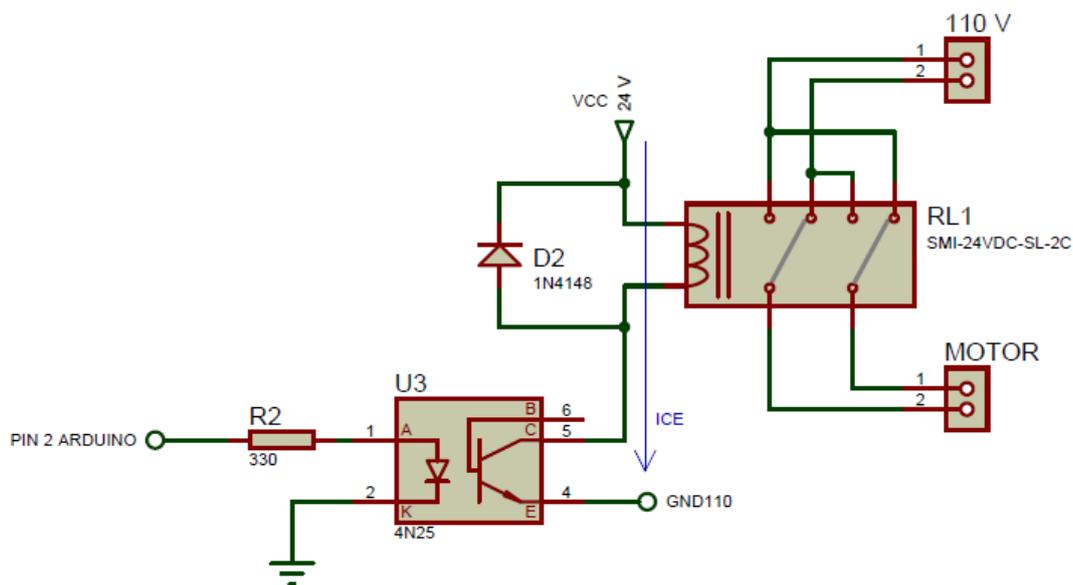


Figura 3.75 Circuito cambio de giro

Se seleccionó un relé de 24 V capaz de soportar la corriente circulante.

El bobinado tiene una resistencia de 2600Ω , por lo que la corriente que deberá circular por la bobina y el colector del optoacoplador para activar el relé será:

$$V_{CC} = I_{CE} \cdot R_{RL1} \quad \text{Ec 3.16}$$

$$24 = I_{CE} \cdot 2600$$

$$I_{CE} = 9.2 \text{ mA}$$

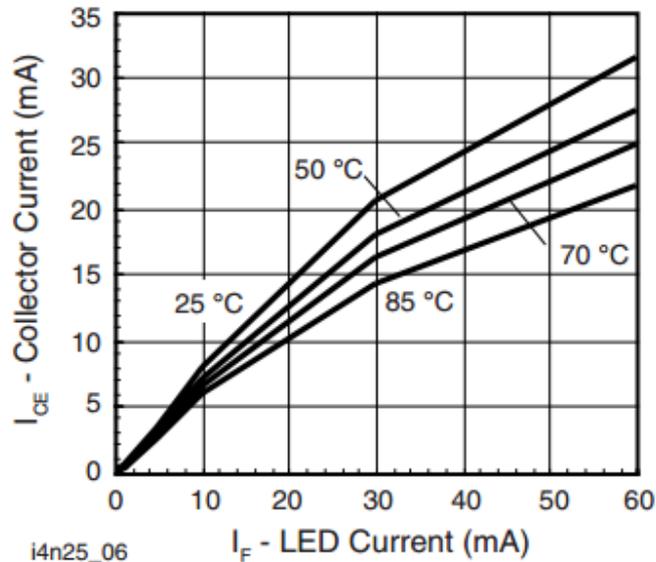


Figura 3.76 Corriente de led vs. Corriente de colector 4N25

Consultando la hoja de datos del optoacoplador, se puede observar en la Figura 3.76 que para una corriente de colector de 9.2 mA a una temperatura promedio de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, es necesario asegurar una corriente que circule en el led de aproximadamente 10 mA .

$$I_F = 10 \text{ mA}$$

Los pines digitales de Arduino son capaces de suministrar 4.6 V , mientras que la caída de tensión en el led es de 1.3 V , por lo que aplicando la Segunda Ley de Kirchhoff:

$$V_{ARDUINO} = R_2 \cdot I_F + V_{LED} \quad \text{Ec 3.17}$$

$$4.6 = R_2 \cdot 0.01 + 1.3$$

$$R_2 = 330 \Omega$$

Calculando la potencia que tendrá que disipar la resistencia R_2 :

$$P_{R2} = I_F^2 \cdot R_2 \quad \text{Ec 3.18}$$

$$P_{R2} = 0.01^2 \cdot 330$$

$$P_{R2} = 0.03 \text{ W}$$

La variación de velocidad se realizará por PWM mediante una salida digital de Arduino y un circuito que sea capaz de operar las tensiones e intensidades de marcha del motor.

Como se mencionó anteriormente, para aislar el común de control con potencia se utilizará un optoacoplador, el cual deberá tener una velocidad de conmutación elevada para efectuar la modulación por ancho de pulso.

El esquema para realizar la tarea descrita se muestra en la Figura 3.79.

Tomando en cuenta la carga, el transistor mosfet escogido es el STF18N60M2 canal N de ST Microelectronics, el cual es capaz de manejar la tensión e intensidad del motor sin inconvenientes.

$$I_D = 13 \text{ A}$$

$$V_{DS} = 650 \text{ V}$$

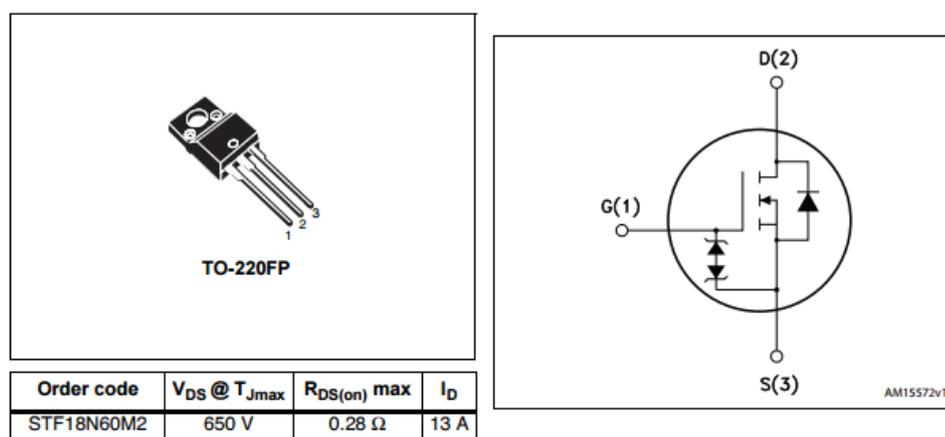


Figura 3.77 Transistor mosfet STF18N60M2

Según la hoja de datos del transistor mosfet, para activarlo es necesario un voltaje máximo en la puerta (gate) con respecto a la fuente (source) de 25 V. La tensión recomendada es de alrededor de 12 V, por lo que será utilizado un regulador de tensión a 12 V para operar sin problema el mosfet.

El regulador escogido es el L7812CV de ST Microelectronics. Se incluyen en el circuito los capacitores que funcionan como filtros recomendados en la hoja de datos.

$$C1 = 0.33 \mu F$$

$$C2 = 0.1 \mu F$$

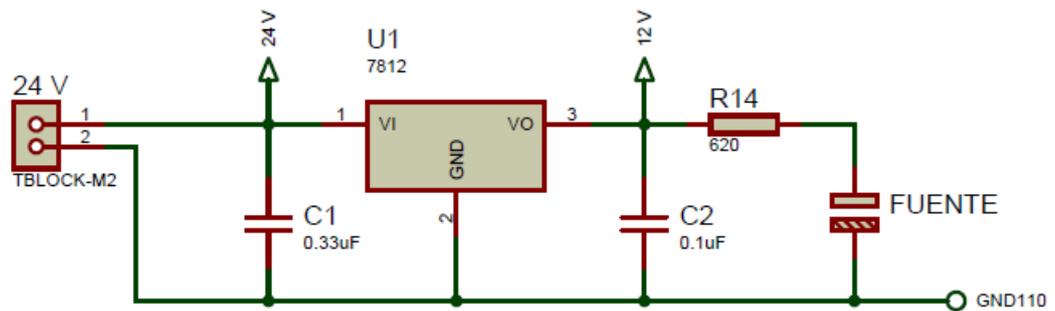


Figura 3.78 Circuito regulador de tensión

Al ser un transistor mosfet controlado por voltaje no son necesarios mayores cálculos para su óptima operación. Únicamente será necesario comprobar que la corriente que circula hacia la puerta (gate) se encuentre en el rango de operación del transistor y el voltaje que sea aplicado en la puerta sea de alrededor de 12 V.

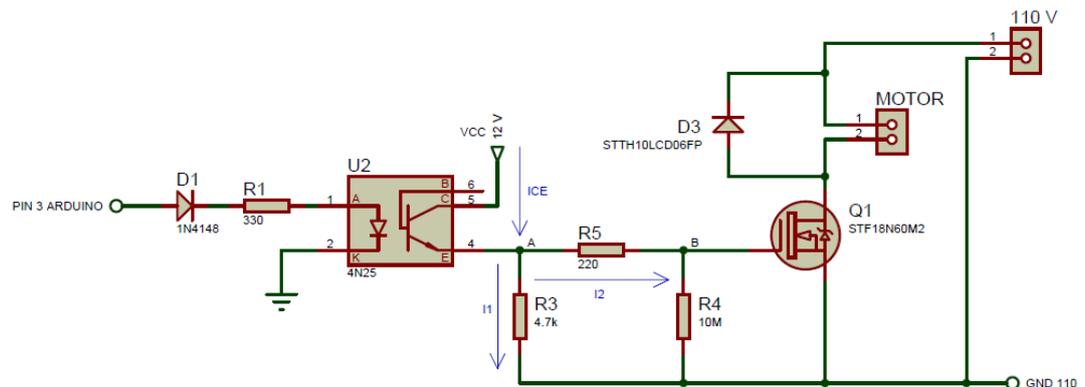


Figura 3.79 Circuito variación de velocidad

Colocando valores típicos de resistencias:

$$R1 = 330 \Omega$$

Y para limitar la corriente proveniente de la fuente y proteger el 4N25:

$$R3 = 4.7 \text{ k}\Omega$$

$$R5 = 220 \Omega$$

Aplicando la Primera Ley de Kirchhoff en el nodo A, se obtiene:

$$I_{CE} = I_1 + I_2 \quad \text{Ec 3.19}$$

$$I_{CE} = I_1 + I_2$$

$$I_{CE} = \frac{V_A}{R3} + I_2$$

La hoja de datos del 4N25 muestra que la tensión entre colector y emisor de saturación es de 0.5 V, por lo que el voltaje en el nodo A:

$$V_A = V_{CC} - V_{CE(sat)} \quad \text{Ec 3.20}$$

$$V_A = 12 - 0.5$$

$$V_A = 11.5 \text{ V}$$

La corriente de colector puede ser calculada:

$$V_{ARDUINO} = R1 \cdot I_F + V_{DIODO} \quad \text{Ec 3.21}$$

$$V_{ARDUINO} = R1 \cdot I_F + V_{DIODO}$$

$$4.6 = 330 \cdot I_F + 1.3$$

$$I_F = 10 \text{ mA}$$

Refiriéndonos nuevamente a la Figura 3.76, se puede obtener la corriente de colector que resulta:

$$I_{CE} = 8 \text{ mA}$$

Reemplazando los valores finalmente en la ecuación 3.14:

$$I_{CE} = \frac{V_A}{R3} + I_2$$

$$8 \text{ mA} = \frac{11.5}{4700} + I_2$$

$$I_2 = 5.6 \text{ mA}$$

Calculando la tensión con la que operará el transistor mosfet:

$$I_2 = \frac{V_A - V_B}{R5} \quad \text{Ec 3.22}$$

$$5.6 \text{ mA} = \frac{11.5 - V_B}{220}$$

$$V_B = 10.3 \text{ V}$$

Se coloca una resistencia alta de pull down a la puerta para evitar estados indeterminados, de esta manera:

$$R4 = 10 \text{ M}\Omega$$

De esta forma se comprueba que las condiciones de operación son óptimas para los elementos componentes del circuito.

Finalmente es posible juntar ambos circuitos:

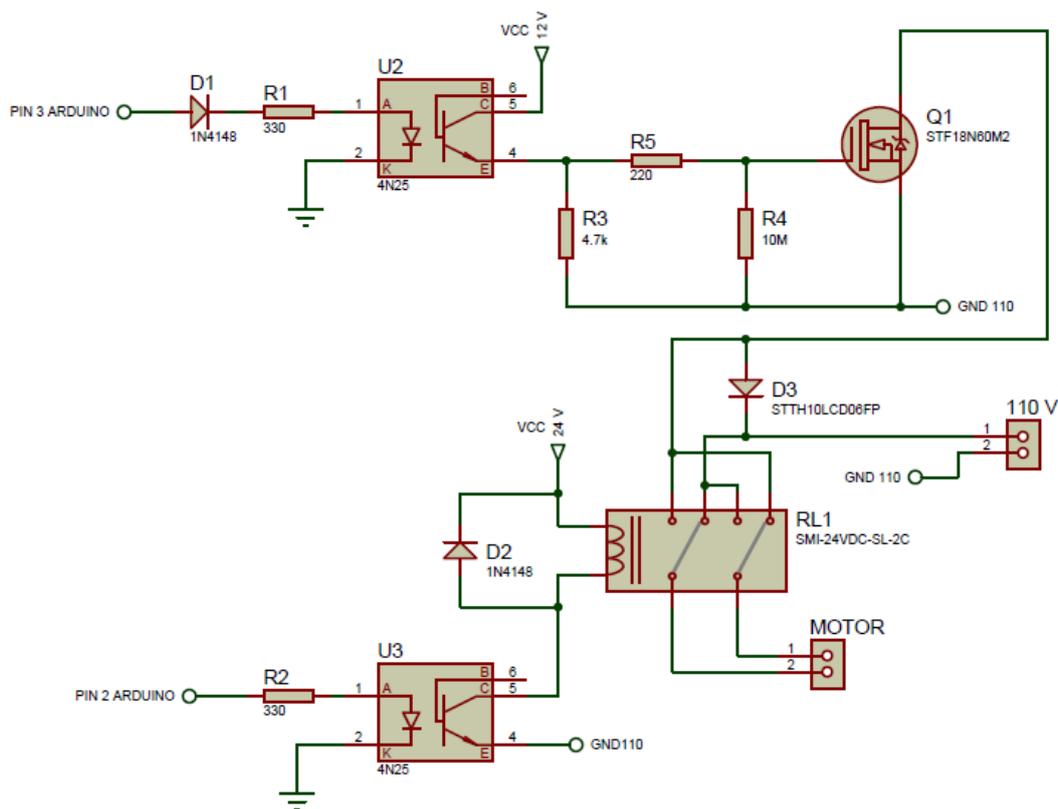


Figura 3.80 Circuito combinado control

De esta manera, el pin 3 de Arduino efectuará la modulación por ancho de pulso, mientras que el pin digital 2 activará el relé para el cambio de giro.

3.10.2 Alimentación al circuito.

Se utiliza una nueva salida a relé para proporcionar al circuito una tensión de 110 V, la cual alimentará al motor.

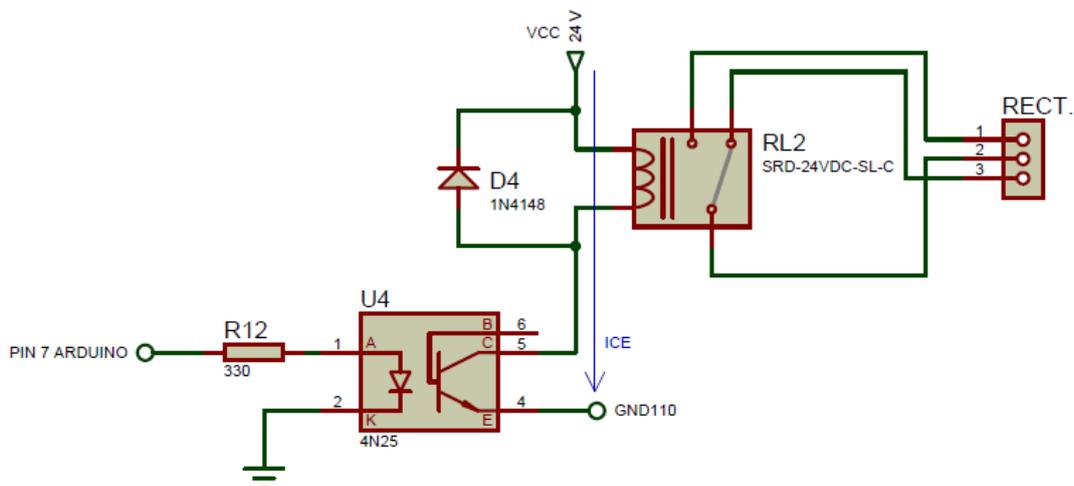


Figura 3.81 Activación de relé fuente de alimentación

Se realizan los cálculos análogos a lo mostrado anteriormente:

$$V_{CC} = I_{CE} \cdot R_{RL2} \quad \text{Ec 3.23}$$

$$24 = I_{CE} \cdot 2880$$

$$I_{CE} = 8.3 \text{ mA}$$

Nuevamente fijándose en la Figura 3.76 se aprecia que es necesaria una corriente de 10 mA en el diodo emisor.

$$I_F = 10 \text{ mA}$$

$$V_{ARDUINO} = R_{12} \cdot I_F + V_{LED} \quad \text{Ec 3.24}$$

$$4.6 = R_{12} \cdot 0.01 + 1.3$$

$$R_{12} = 330 \Omega$$

La potencia que deberá disipar la resistencia R12:

$$P_{R12} = I_F^2 \cdot R_2 \quad \text{Ec 3.25}$$

$$P_{R12} = 0.01^2 \cdot 330$$

$$P_{R12} = 0.03 \text{ W}$$

3.10.3 Etapa de filtrado acelerómetro.

El MMA7361 se trata de un acelerómetro robusto y acondicionado únicamente para ser leído por un pin analógico de Arduino. La hoja de datos recomienda realizar una etapa de filtrado a la frecuencia de la red eléctrica por posibles pequeños ruidos que puedan afectar su medición. Por lo tanto, se escoge un circuito simple de filtro pasivo pasobajo únicamente para el eje 'z' el cual va a ser el que realiza la medición de aceleración.

La ecuación del filtro pasivo pasobajo:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{Ec 3.26}$$

Dónde:

F_c Frecuencia de corte.

R Valor de resistor.

C Valor de capacitor

Se selecciona un capacitor de 0.47 μF y es calculada la resistencia:

$$C4 = 0.47 \mu\text{F}$$

$$60 = \frac{1}{2\pi \cdot R13 \cdot 0.47\mu\text{F}}$$

$$R13 = 5644 \Omega$$

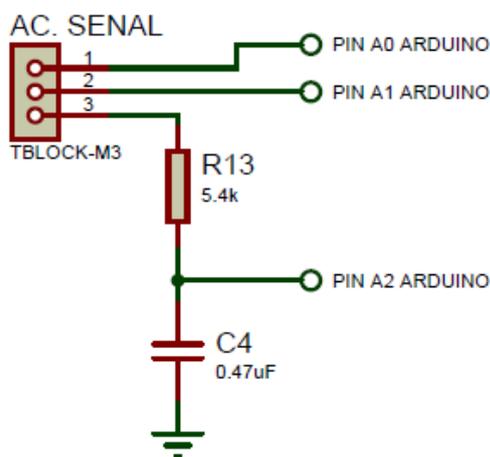


Figura 3.82 Filtro pasivo pasobajo acelerómetro

3.10.4 Reducción de tensión para lectura sensor óptico.

El sensor óptico BR100-DDT-P es el encargado de contar los pulsos para la elaboración de un tacómetro. El mismo proporciona una salida de 24 V, valor que no puede ser ingresado al pin digital de lectura de Arduino, por lo que es necesario reducir el voltaje para que esto sea posible, a uno alrededor de 5 V para que Arduino lo reconozca como pulso en alto.

Para esto basta con elaborar un divisor de tensión resistivo.

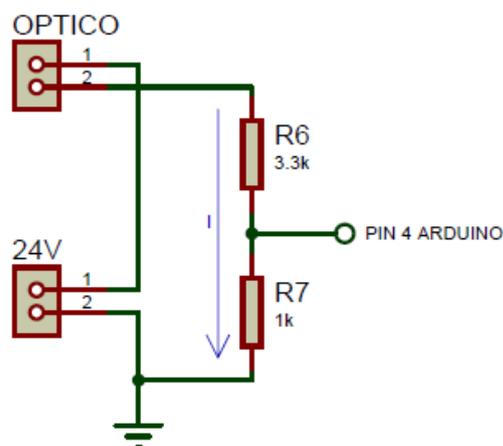


Figura 3.83 Divisor de tensión resistivo sensor óptico

$$V_{SALIDA} = \frac{R7 \cdot V_{\acute{O}PTICO}}{R6 + R7} \quad \text{Ec 3.27}$$

Se impone un valor de resistencia para R7 de 1000 Ω , y resolviendo la ecuaci3n 3.22:

$$5 = \frac{1000 \cdot 24}{R6 + 1000}$$

$$R6 = 3.8 \text{ k}\Omega$$

Se escoge un valor nominal de resistencia y se procede a calcular la salida correspondiente:

$$R6 = 3.3 \text{ k}\Omega$$

$$V_{SALIDA} = \frac{1000 \cdot 24}{3300 + 1000}$$

$$V_{SALIDA} = 5.5 \text{ V}$$

Se calcula la potencia necesaria de las resistencias. Aplicando la Segunda Ley de Kirchhoff:

$$V_{\acute{O}PTICO} = I \cdot (R6 + R7) \quad \text{Ec 3.28}$$

$$24 = I \cdot (3300 + 1000)$$

$$I = 5.6 \text{ mA}$$

Por lo tanto:

$$P_{R6} = I^2 \cdot R6 \quad \text{Ec 3.29}$$

$$P_{R6} = 0.056^2 \cdot 3300$$

$$P_{R6} = 0.1 \text{ W}$$

$$P_{R7} = I^2 \cdot R7 \quad \text{Ec 3.30}$$

$$P_{R7} = 0.056^2 \cdot 1000$$

$$P_{R7} = 0.03 \text{ W}$$

3.10.5 Circuito paro de emergencia.

El objetivo del circuito es encender una luz indicadora y detener todo el proceso de forma inmediata, adem3s de enviar una se3al a Arduino indicando que se ha realizado este proceso, todo esto al presionar el bot3n de emergencia.

El botón se encuentra normalmente cerrado por lo que el transistor estará conduciendo, lo que no ocasionará el encendido de la luz indicadora por la configuración mostrada. Al presionar el botón, este se enclava manteniéndose abierto y llevando al corte al transistor, permitiendo el flujo de corriente hacia el indicador. Mostrando además un nivel lógico '0' mediante un pin digital de Arduino que el botón ha sido activado. Para garantizar un correcto funcionamiento de esto último se implementó un circuito antirebote.

El botón de emergencia cuenta con dos contactos normalmente cerrados. Para efectuar el paro del proceso un contacto es conectado a la fase de alimentación.

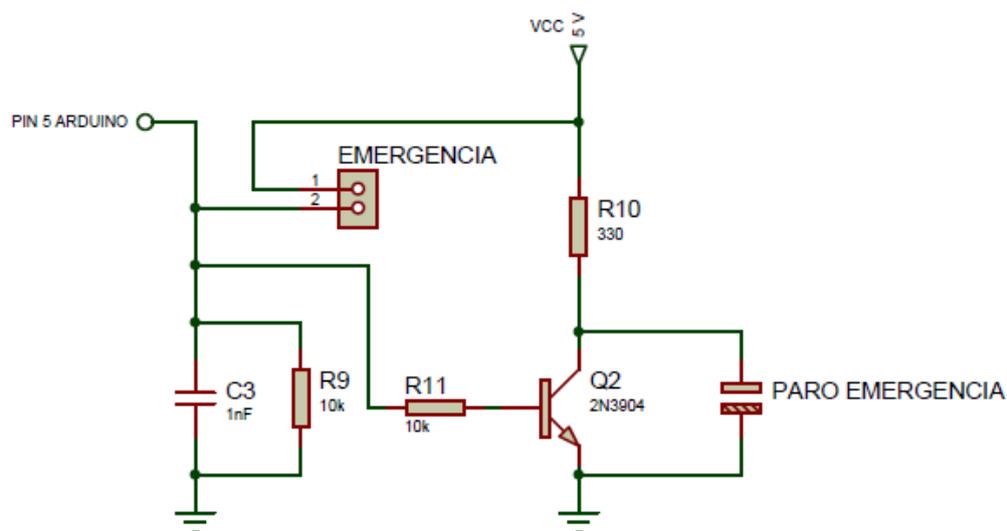


Figura 3.84 Circuito paro de emergencia

Finalmente se muestran el resto de conexiones, que no son más que la alimentación de los sensores, tanto acelerómetro como potenciómetro provenientes de Arduino.

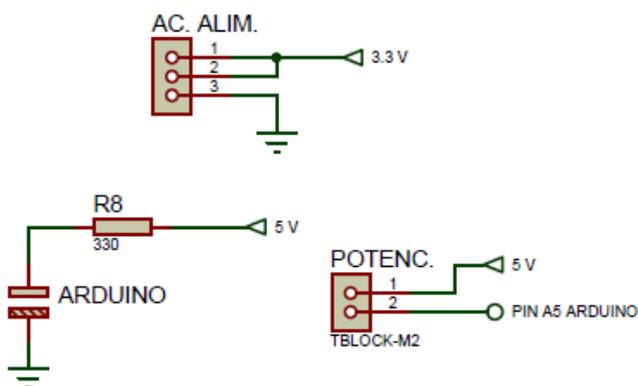


Figura 3.85 Conexiones alimentación acelerómetro, potenciómetro

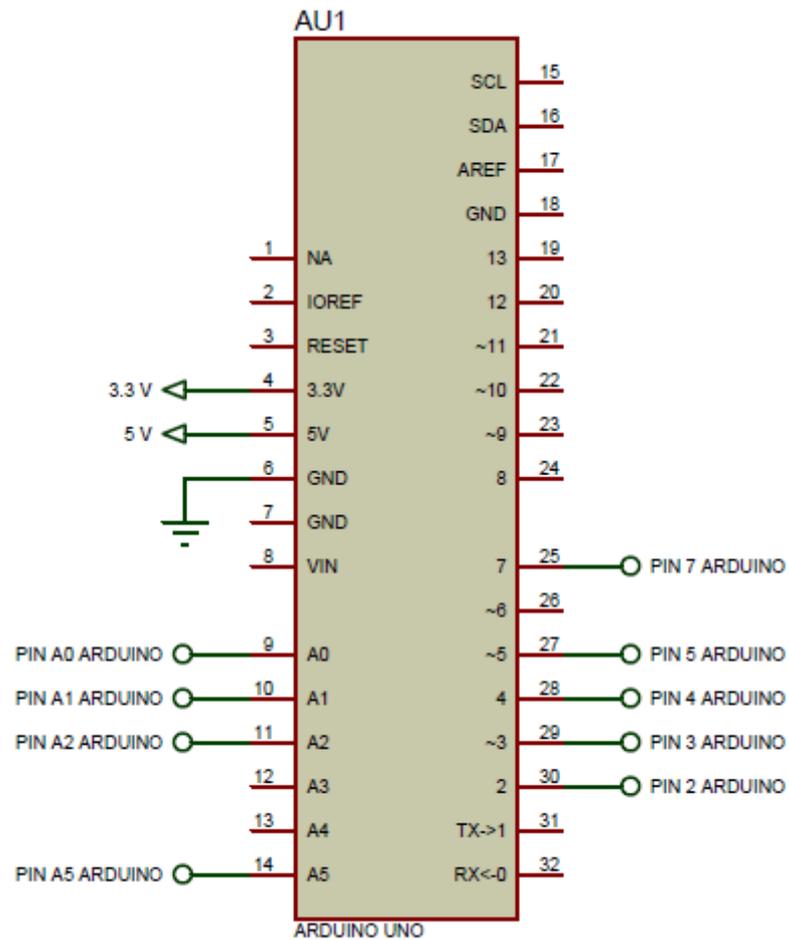


Figura 3.86 Conexiones Arduino

3.11 Diseño del circuito impreso (PCB - Printed Circuit Board).

Para el diseño del circuito impreso se ha recurrido a las normas IPC2221, las cuales brindan una guía importante para un correcto diseño tanto funcional como estético de un circuito impreso. Para el propósito, la norma refiere el diagrama de flujo de la Figura 3.87.

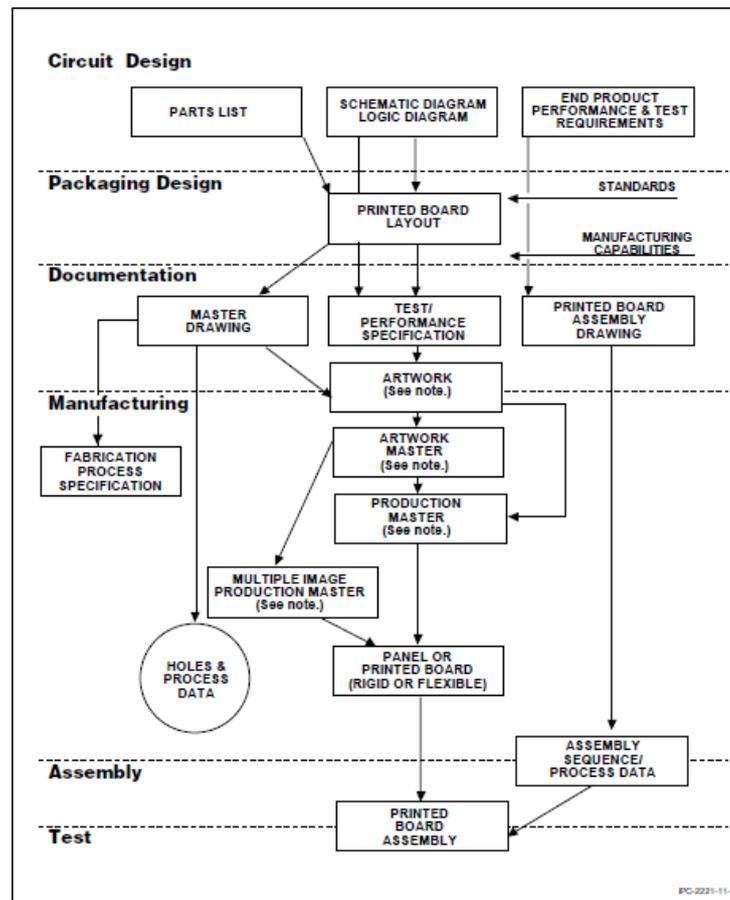


Figura 3.87 Diagrama de flujo diseño circuito impreso

Una vez diseñado el circuito y seleccionados los elementos necesarios, se procede a realizar un esquemático en el software de diseño Isis - Proteus (AnexoA).

Una vez realizado, se ejecuta el diseño del circuito impreso en Ares - Proteus, que es la herramienta de enrutado, ubicación y edición de componentes electrónicos.

Mediante la opción DRM (Design Rules Manager) de Ares, se especifican ciertos parámetros importantes sugeridos por la norma, como dimensiones de pads de soldadura, espaciamiento mínimo y anchos de pistas según la intensidad de corriente que circulará por las mismas.

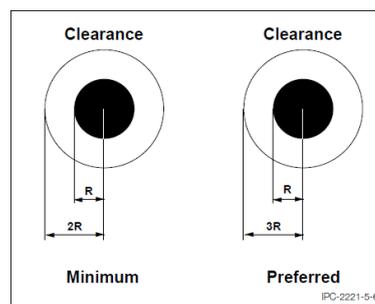


Figura 3.88 Especificación para pads de soldadura

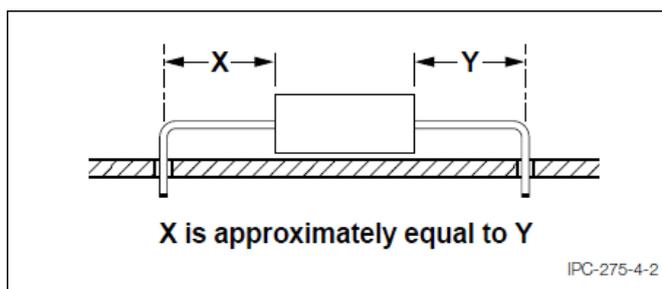


Figura 3.89 Especificación de centrado de componentes

3.11.1 Cálculo de anchos de pista.

El ancho de pista de cobre es un parámetro muy importante, porque si este se encuentra mal diseñado y su ancho es muy pequeño, la intensidad de corriente que circula generará un calentamiento excesivo y el consecuente daño de la pista, arruinando el circuito impreso e impidiendo el correcto funcionamiento del mismo. Para lo cual la norma presenta varios diagramas en función de la corriente y el espesor de cobre.

La corriente nominal del motor es de 3.6 A (por seguridad se considerará 4 A), y será permitido un incremento máximo en la temperatura de la pista de 10 °C.

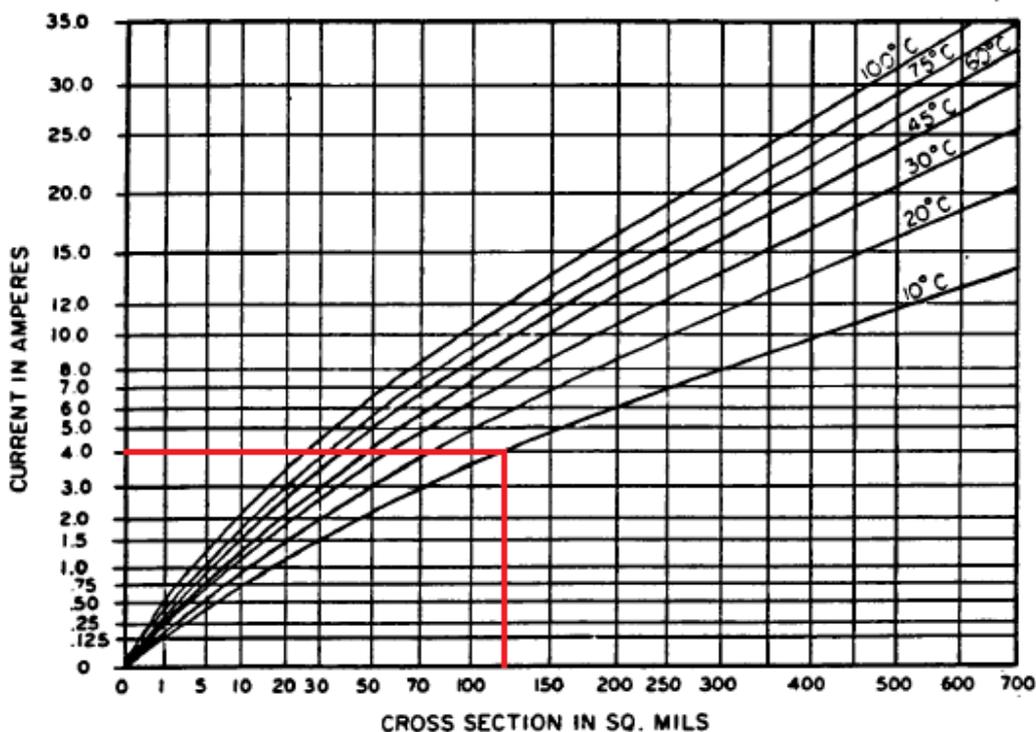


Figura 3.90 Sección transversal vs. Intensidad de corriente

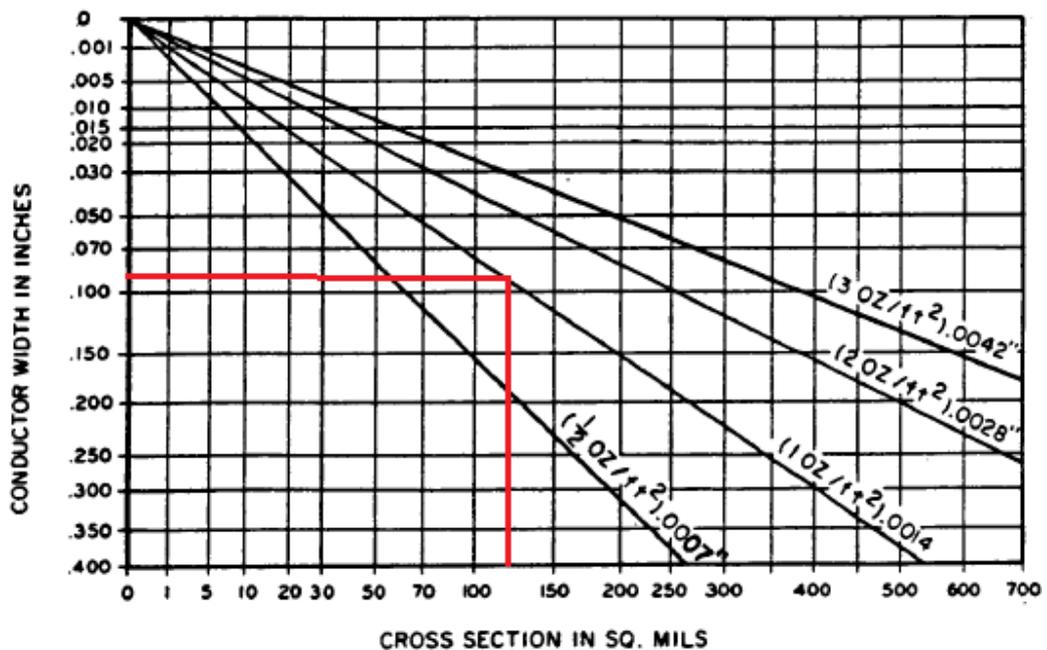


Figura 3.91 Sección transversal vs. Ancho del conductor

En la Figura 3.90 se aprecia que es necesario aproximadamente 125 mils cuadrados, dato que se procede a ingresar en la Figura 3.91.

Dado que el material a utilizar es un sustrato de fibra de vidrio FR-4 con un espesor de cobre de $1\text{oz}/\text{ft}^2$, se aprecia que el ancho de pista recomendado para el manejo del motor es de aproximadamente 0.1 pulgadas (100 th).

Las pistas en la etapa de control en donde circulan corrientes muy pequeñas serán realizadas por recomendación de fabricación con anchos de 50 th.

Finalmente, se siguen las recomendaciones de la norma en cuanto a espaciamiento, orientación y montaje de componentes.

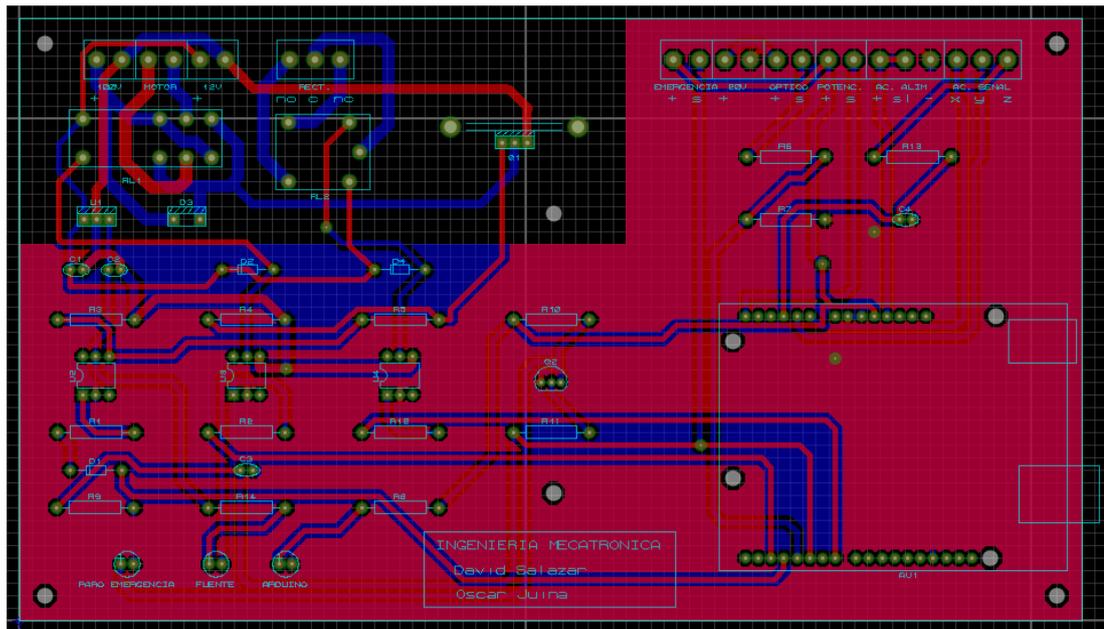


Figura 3.92 Diseño de circuito impreso

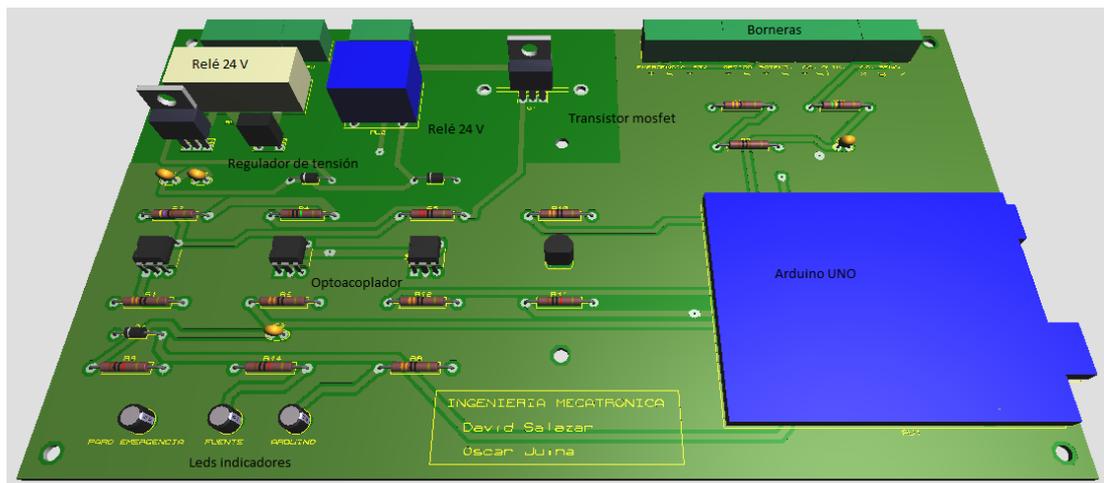


Figura 3.93 Vista 3D diseño de circuito

3.12 Diseño de interfaz.

La interfaz fue diseñada en su totalidad en lenguaje G (lenguaje gráfico), mediante una plataforma utilizada para diseñar sistemas mediante un lenguaje de programación visual.

La interfaz gráfica cuenta con algunas pantallas diseñadas para mejorar la navegación y el aprovechamiento de los datos adquiridos.

Ventana de inicio.

Es aquella que surge al momento de la ejecución del programa.

Esta ventana contiene el acceso a dos subprogramas correspondientes al manejo del equipo mediante el ordenador, y la visualización de las variables y diagramas en tiempo real pero con control manual. En la misma se observarán indicaciones para no equivocarse en el manejo del equipo.

En la ventana de inicio debe ser seleccionado el puerto serial a utilizar por Arduino.



Figura 3.94 Ventana de inicio

Ventana control PC.

En esta pantalla es preciso indicar primero las condiciones iniciales para la puesta en marcha del equipo.

- Selección de leva a utilizar.
- Ingreso sentido de giro de leva.
- Ingreso de velocidad.

La pantalla mostrará en todo momento indicaciones a seguir por el usuario.

La velocidad angular podrá ser modificada en cualquier momento según lo requerido por la práctica.



Figura 3.95 Ventana control PC

Al seleccionar dichas condiciones y presionar el botón de encendido, será posible visualizar los siguientes parámetros en tiempo real.

- Leva en ejecución.
- Ecuaciones teóricas de leva.
- Curvas teóricas de leva.
 - Diagramas de desplazamiento.
 - Diagramas de velocidad.
 - Diagramas de aceleración.
- Curvas en tiempo real.
 - Diagramas de desplazamiento.
 - Diagramas de velocidad.
 - Diagramas de aceleración.
 - Diagramas de aceleración provistos por acelerómetro.
- Valores máximos de variables.
- Señal de vibración en el equipo.

Mismas que fueron distribuidas en pestañas para una mejor apreciación y visualización.

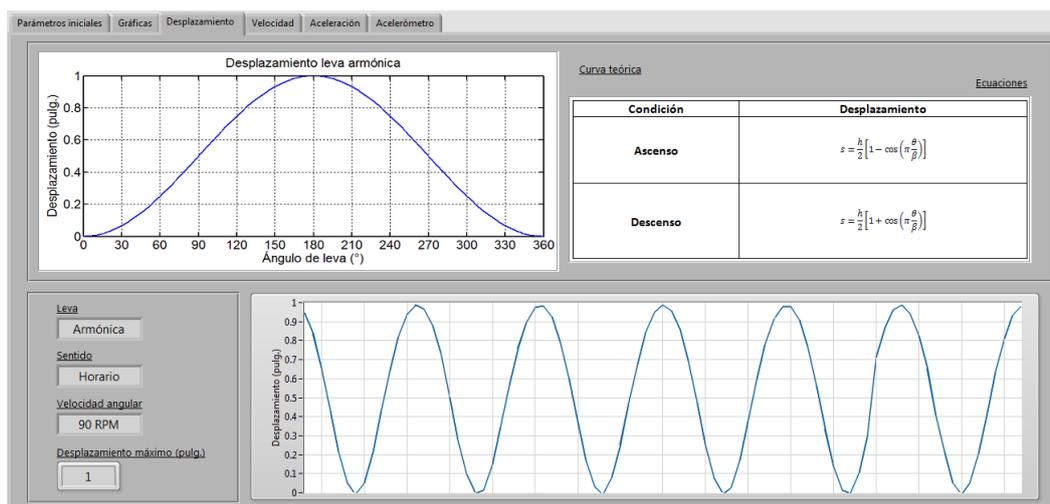


Figura 3.96 Pestaña desplazamiento de leva

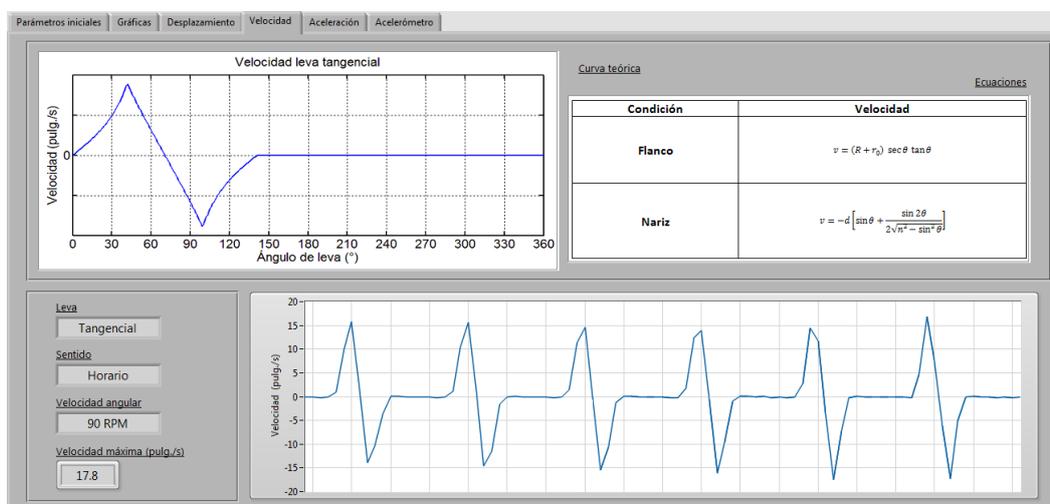


Figura 3.97 Pestaña velocidad de leva

De esta manera, las curvas en tiempo real pueden ser comparadas fácilmente con las teóricas.

Ventana control manual.

Al seleccionar en la ventana de inicio un control manual, será posible visualizar los tres diagramas correspondientes a la leva ingresada y la velocidad angular a la cual está girando.

Recordemos que el manejo de velocidad del motor en este caso es modificado manualmente mediante el cursor de reóstato.



Figura 3.98 Ventana control manual

Cuando el botón de emergencia sea presionado, el programa en ejecución será inmediatamente detenido. Teniendo que ser inicializado nuevamente después de solventar los problemas que se haya tenido.

CAPÍTULO 4 IMPLEMENTACIÓN

4.1 Implementación mecánica.

4.1.1 Mantenimiento.

El equipo Tecquipment TM21 062 ha sufrido un desgaste natural tras la realización continua de prácticas de laboratorio, motivo por el cual necesitó la lubricación, cambio, y realineación de sus partes mecánicas.

Se realizó un mantenimiento inicial, desmontando toda la parte mecánica con el fin de encontrar elementos en mal estado y lubricar sus partes móviles.

Desmontaje.

En esta etapa inicial se procedió a desarmar el equipo, partiendo de sus piezas más accesibles, como fueron los perfiles de apoyo, el resorte del seguidor, seguidor.

En tesis anteriores se utilizó un sensor magnético, el cual tenía un soporte metálico para su posicionamiento con respecto al seguidor. Todos estos elementos fueron desarmados y puestos a revisión.

En la siguiente figura se detalla el equipo en condiciones iniciales:



Figura 4.1 Condiciones iniciales del equipo Tecquipment TM21 062

El resultado de esta primera fase de desmontaje, se obtiene el sistema solo con el volante y el eje motriz sujetos al bastidor.



Figura 4.2 Desmontaje de elementos fase 1

En la siguiente fase, se desmontan los rodamientos de tal manera que el eje principal pueda ser separado del bastidor y quedar listo para mantenimiento.



Figura 4.3 Desmontaje de elementos fase 2

Al final de este proceso se puede ver al eje separado de los cojinetes. Listo para proceder a la segunda etapa en la cual se lubricarán cada una de las piezas, a fin de que tengan un correcto funcionamiento.

Además fue desmontada la base sujetadora del sensor óptico puesto que se realizarán ciertos cambios con la lectura del mismo.

Como se observa en las fotografías, se tiene el equipo totalmente desarmado y con cada pieza a disposición para ser limpiada, pulida o engrasada.



Figura 4.4 Desmontaje final

Limpieza y lubricación.

Una parte importante a dar mantenimiento, y porque no decirlo la más significativa, es el motor, en este caso el motor Shunt que es el que da movimiento a todo el sistema. Será retirado para comprobar su reducción de velocidad y correcta lubricación.

Dentro de los lubricantes que se investigaron, se propuso utilizar los lubricantes comúnmente utilizados en máquinas herramientas.

El aceite de torno o fresadora utilizado en los talleres mecánicos con mayor frecuencia es el aceite SAE 90, del que se resumen las siguientes características:

- Aceite de engranajes para maquinas automotoras e industria.
- Excelentes características de lubricación y untuosidad, que garantizan la permanencia de una película lubricante sobre los dientes de los engranajes, impidiendo su contacto directo.
- Elevada estabilidad térmica.
- Excelentes propiedades a extrema presión.
- Resistencia a la corrosión y formación de herrumbre.
- Buenas calidades emulsionantes.
- Baja formación de espuma.

Además dentro de la hoja de datos se identificó sus principales aplicaciones:

- Cajas de cambio, transmisiones, mecanismos de dirección y diferenciales.
- Todo tipo de engranajes y reductores industriales de cárter cerrado.

- En general en aquellos casos en que se requiera un aceite lubricante con extrema presión media.

Suficientes razones para escoger el lubricante SAE 90 para la lubricación de la caja reductora del motor.

El lubricante fue renovado enteramente, puesto que por información del laboratorista, nunca se había realizado un desmontaje, y peor aún un cambio de aceite.



Figura 4.5 Cambio de lubricante

Pulido y pintado.

Las piezas desarmadas son puestas a revisión, para mejorar apariencia son pulidas y pintadas.

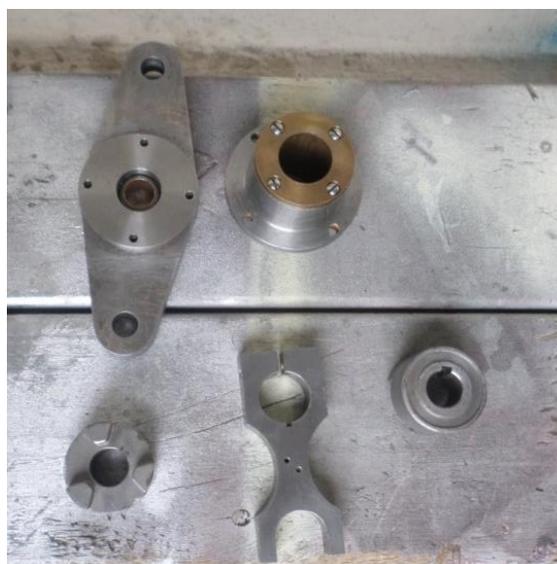


Figura 4.6 Despintado y pulido de piezas

Montaje.

Se procede al armado del mecanismo. Cada elemento que contiene movilidad será provisto de una cantidad moderada de grasa para su ingreso.

4.1.2 Diseño de estructuras.

En esta etapa se tomó a consideración los soportes para la sujeción de los sensores para medir las variables de posición, velocidad y aceleración.

El soporte fue manufacturado, para sustituir el anterior que mantenía en su sitio a un sensor magnético. El mismo fue diseñado con columnas para soportar al potenciómetro y sujetarlo en todo momento del avance del seguidor.

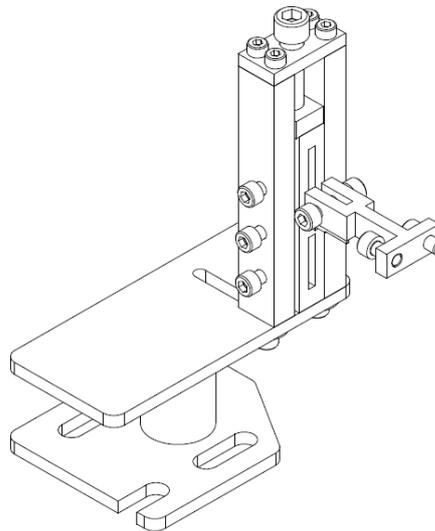


Figura 4.7 Diseño de soporte para sensores

Dicho soporte enlaza el cursor del potenciómetro al seguidor del mecanismo, logrando de esta manera que exista una variación de resistencia en función de la variación de posición del seguidor, con lo cual será posible realizar una gráfica de desplazamiento en función del tiempo.

También fueron colocadas borneras para la conexión de los cables provenientes de ambos sensores (potenciómetro y acelerómetro), y lograr una mejor organización y acabado estético.

Se colocan también las protecciones necesarias para la conservación de los sensores.

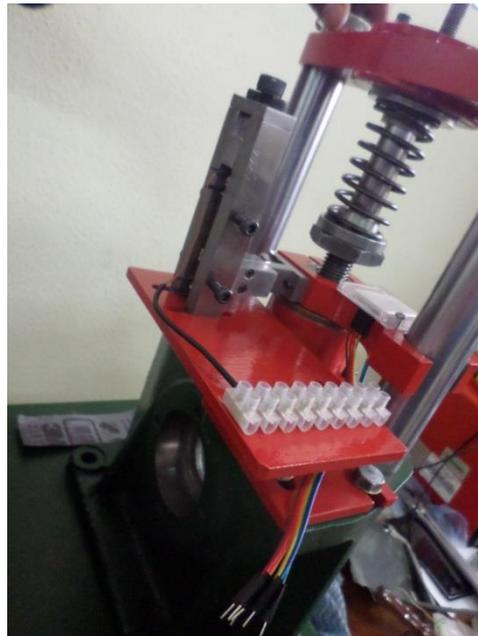


Figura 4.8 Implementación de soporte



Figura 4.9 Protecciones sensores

4.1.3 Reemplazo de componentes.

Analizando las condiciones del equipo en el mantenimiento previo, fue necesario el reemplazo y modificación de algunos de los componentes, con el fin de mejorar las características funcionales del equipo.

Seguidor de rodillo.

El rodillo provisto por el equipo era una pieza mecanizada que giraba en torno a un eje, provocando en todo momento fricción y acumulando impurezas que generaban ciertas trabas del rodillo provocando importantes daños en el perfil de leva. Motivo por el cual se opta por reemplazar dicha pieza por un rodamiento de las mismas dimensiones.

Se cambian también los anillos de sujeción.



Figura 4.10 Reemplazo de rodillo

Volante.

Previamente en el volante estaban pintadas tres marcas, dichas marcas servían para calcular la velocidad angular del motor con la ayuda de un sensor óptico.

Al poner en marcha el equipo fue posible darse cuenta que la respuesta del sensor no era lo suficientemente rápida para contar los pulsos generados a altas velocidades. Lo que provocaba una incorrecta medición.

Tomando en cuenta la hoja de datos se pudo determinar que la mejor opción era reducir las marcas a dos.

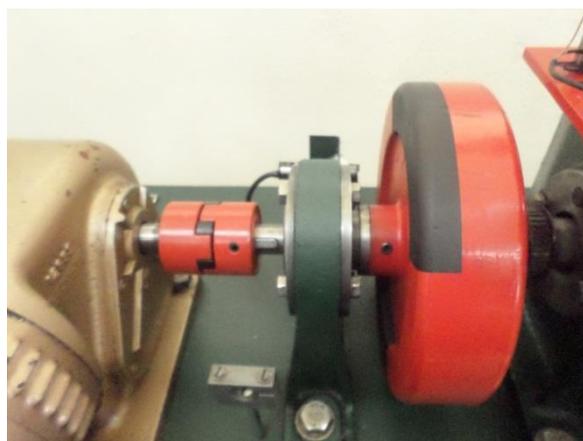


Figura 4.11 Cambio de marcas en volante

4.2 Implementación eléctrica y electrónica.

4.2.1 Componentes eléctricos.

Para la correcta canalización de las líneas de señal y control, se realizó diversas adecuaciones como fue la puesta de borneras en la salida de potenciómetro y acelerómetro. Además se realizaron agujeros para que todos los cables estén por debajo del equipo, de esta manera evitando el contacto del cableado con el movimiento de eje o del volante.

Caja de control.

Para ordenar todas las señales, se diseñó una caja en la cual se conjuntarían las señales de sensores como también las de potencia, mejorando el manejo del equipo y la parte estética del mismo.



Figura 4.12 Caja de control

Se colocaron dos botones de tres posiciones y dos conectores de doce pines para la conexión entre el equipo, fuente de alimentación y tarjeta electrónica.

Cuadro 4. 1
Operación de botones caja de control

Botón	Posición	
	1	2
Botón 1	El manejo de velocidad se realiza a través de la interfaz gráfica en un computador.	El manejo de velocidad se realiza manualmente a través del cursor del reóstato.
Botón 2	En caso de que el control sea elegido manual, el sentido de giro será horario.	En caso de que el control sea elegido manual, el sentido de giro será antihorario.

Los pines de los conectores fueron organizados de la siguiente manera:

Conector 1 (C1):

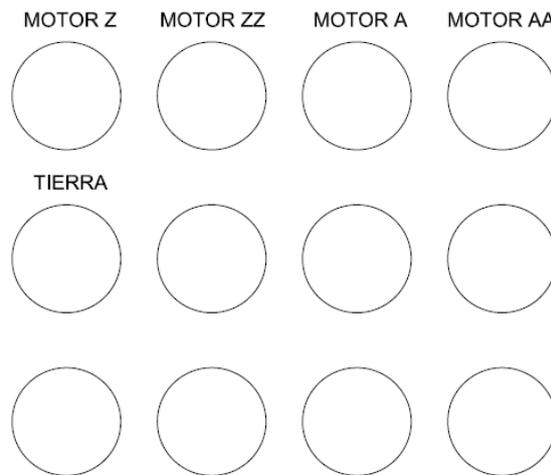


Figura 4.13 Pines conector 1

El conector 1 es aquel que provee al campo del motor la alimentación fija de 110 V y la alimentación variable si se coloca el botón 1 en la posición de manejo manual.

Conector 2 (C2):

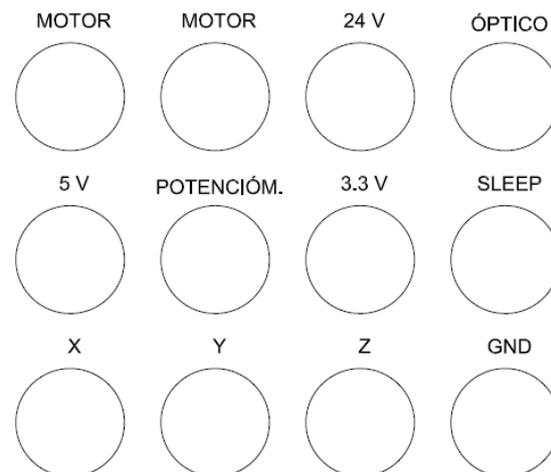


Figura 4.14 Pines conector 2

El conector 2 es el encargado de enviar todas las señales provenientes de los sensores hacia la placa electrónica y proveer de alimentación a los mismos.

Además si el botón 1 se encuentra en la posición de manejo por interfaz, provee la alimentación desde la placa electrónica al motor.

Los conectores son correctamente identificados, tanto en la caja de control como en la fuente de alimentación para no equivocarse su conexión.



Figura 4.15 Identificación de conectores.

4.2.2 Componentes electrónicos.

La parte electrónica del sistema es la placa de circuito impreso diseñada previamente, la cual posee su alimentación y conexiones internas y externas para poner en marcha al equipo.

Soldadura de componentes.

Se realiza la soldadura de cada elemento siguiendo las normas, evitando la suelda fría, y sueldas imperfectas.

Por seguridad, la placa Arduino fue soldada a la placa electrónica para evitar su sustracción o manipulación.

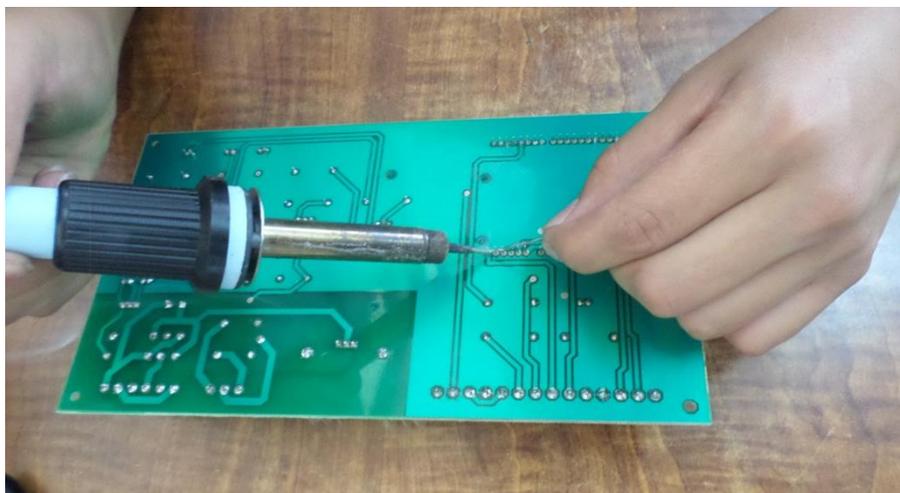


Figura 4.16 Soldadura de componentes

Montaje del circuito impreso.

El circuito impreso será empotrado en una carcasa de acrílico para que los usuarios puedan familiarizarse con sus elementos.

Han sido numerados los cables y sus respectivas borneras por seguridad de conexión.

Mediante esta protección lo único accesible dentro de la placa será la entrada del puerto para comunicación serial con el computador.



Figura 4.17 Montaje y protección de circuito impreso

La caja del reóstato es utilizada para la organización de cables, así como para almacenar las fuentes de voltaje necesarias para la alimentación del circuito.



Figura 4.18 Vista interior de conexiones

Finalmente por seguridad se coloca un botón de paro de emergencia en un lugar en el cual se pueda acceder rápidamente en caso de ser requerido. El mismo al ser accionado detendrá inmediatamente la marcha del motor y la ejecución del programa.



Figura 4.19 Sistema implementado

La Figura 4.19 muestra el sistema finalmente implementado.

CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 Pruebas de instrumentación.

Las primeras pruebas fueron realizadas con la intención de comprobar y acondicionar las señales provenientes de los sensores hacia Arduino.

Sensor óptico.

Se revisó la correcta alineación del sensor frente a las marcas del volante que hace de encoder, comprobando la lectura de cada pulso en las ranuras negras, y su desactivación con las ranuras rojas, el sensor mostró una ideal alimentación a los 24 V que se le asignó. Comprobando su correcto funcionamiento.

Acelerómetro.

El acelerómetro, dentro de su estructura de protección debe presentar una alineación y sujeción respecto al seguidor de leva para presentar una correcta lectura. En la parte electrónica su conexión a 3.3 V y sleep, funciona perfectamente y su conexión mediante borneras ha sido exitosa.

Se comprobó también que su correcta lectura después de pasar por una etapa física de filtrado.

Potenciómetro.

El acople mecánico realizado para el potenciómetro, refleja una buena sujeción, además de su continuo trabajo a altas velocidades. En la parte electrónica se puede observar una buena calibración de leva, al coincidir con las gráficas teóricas y simuladas.

5.2 Simulación del sistema.

El mecanismo leva-seguidor del equipo Tecquipmet TM21 062 será simulado mediante Working Model, herramienta CAE que permite crear y analizar simulaciones de sistemas mecánicos reales; permitiendo reducir el tiempo de desarrollo del mismo y optimizando cálculos.

El software será utilizado con el fin de generar los datos de posición, velocidad y aceleración con los parámetros deseados.

Para iniciar la representación del sistema, el seguidor será simbolizado en 2 dimensiones, largo y ancho, al igual que el rodillo, el cual solo tendrá área, mas no volumen para la presente simulación.

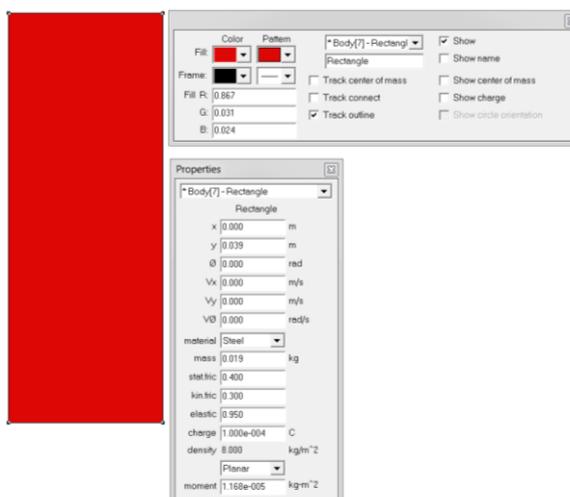


Figura 5.1 Seguidor de leva

Como se observa el material que se designó es acero. Se crean las partes con iguales dimensiones a las del equipo.

Del mismo modo se procede con el rodillo del seguidor.

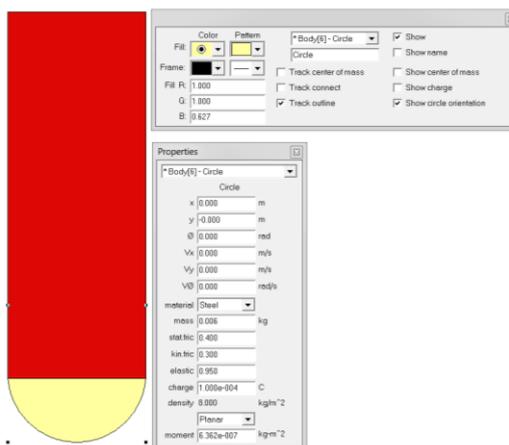


Figura 5.2 Ensamblaje seguidor de rodillo

Para dar la movilidad en el eje de las ordenadas se utiliza un punto de junta para enlazar rodillo y seguidor, conservando su rotación. Se utiliza guías de juntas que anclarán en el eje vertical al sistema. El resorte tendrá la constante obtenida previamente. Las levas son ingresadas al programa en formato .dxf o mediante coordenadas polares.

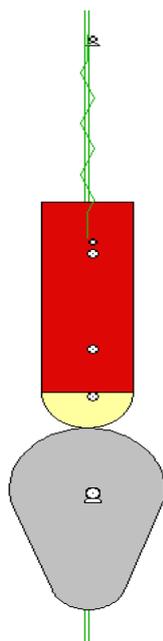


Figura 5.3 Mecanismo leva-seguidor Tecquipment TM21 062

El elemento a ser estudiado será el rodillo de seguidor, el cual será referencia para la obtención de los diagramas de posición, velocidad y aceleración.

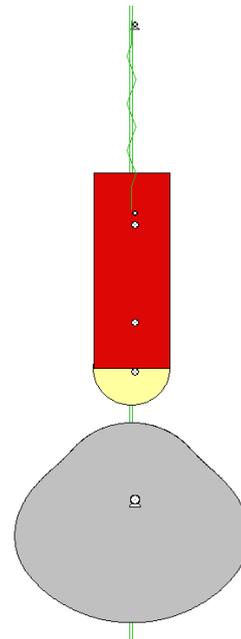
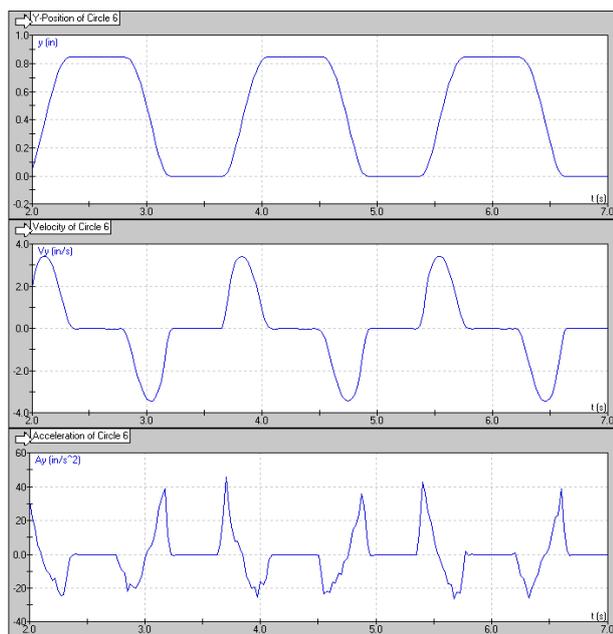


Figura 5.4 Inicio de simulación de sistemas

5.3 Comparación diagramas.

La simulación del sistema es muy propensa a ruido dentro del programa debido a que el resorte disponible no trabaja como un elemento a compresión y la rigidez del seguidor no puede ser definida, por lo que se tomará una velocidad baja para visualizar correctamente los diagramas (35 rpm).

Leva polinómica 3 4 5.

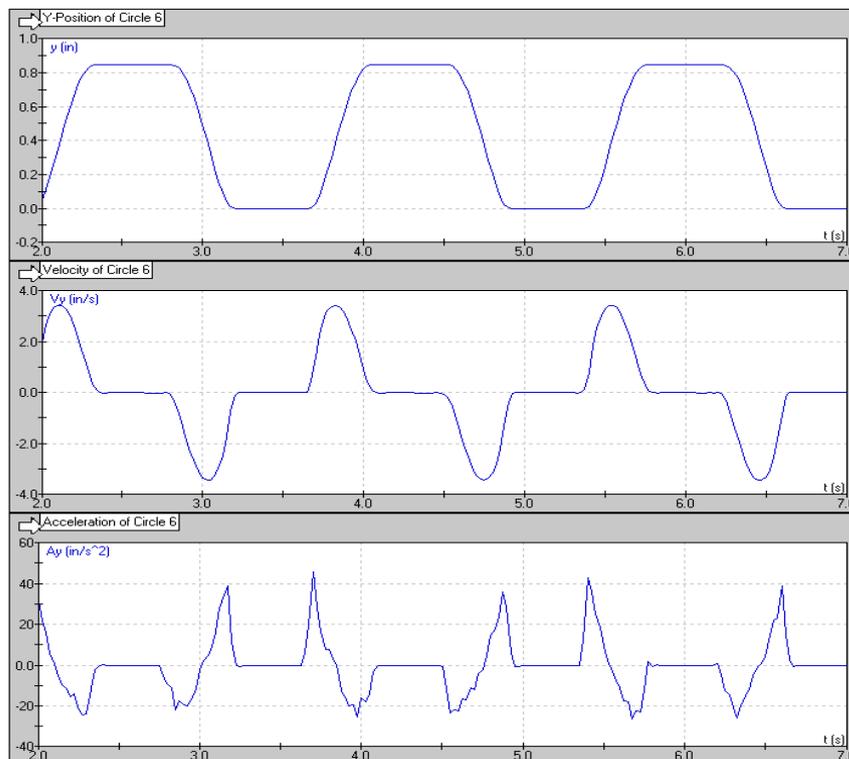


Figura 5.5 Simulación leva polinómica 3 4 5

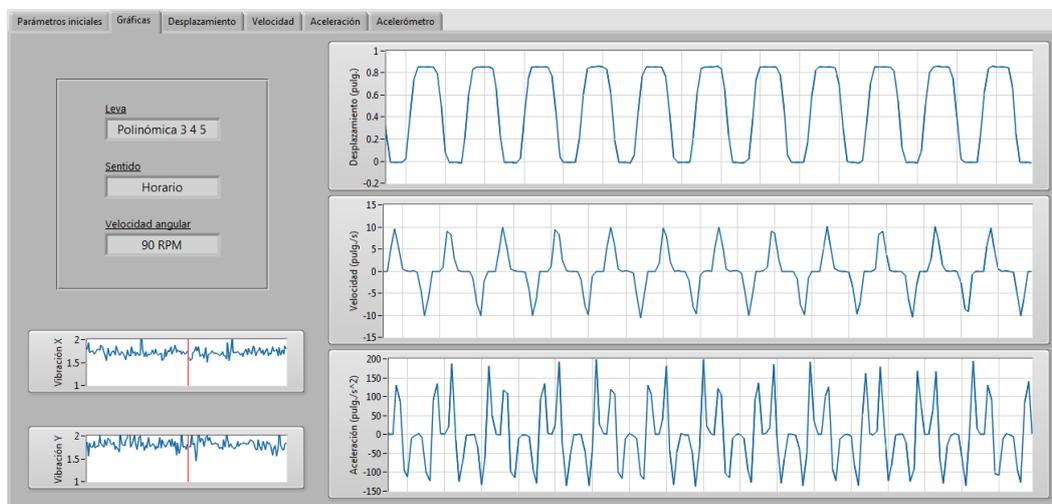


Figura 5.6 Tiempo real leva polinómica 3 4 5

Leva Bezier 8.

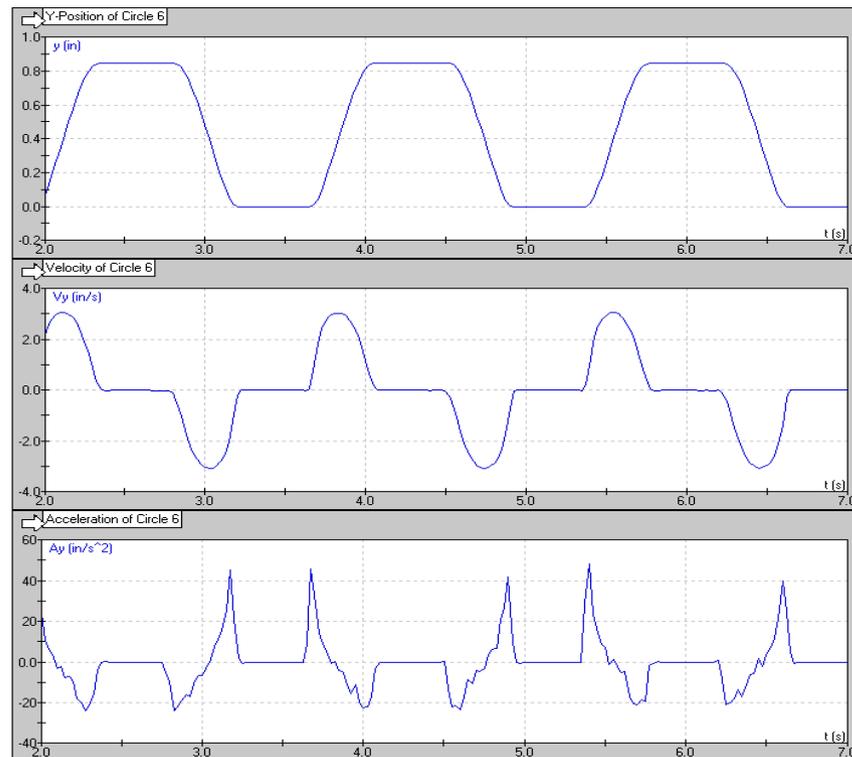


Figura 5.7 Simulación leva Bezier 8

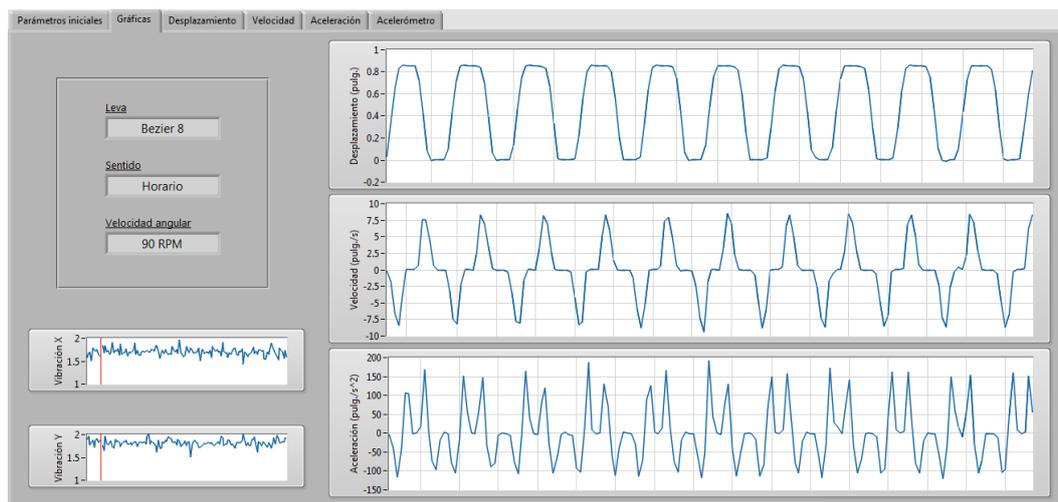


Figura 5.8 Tiempo real leva Bezier 8

Las gráficas muestran real similitud entre lo teórico, simulación y las obtenidas en tiempo real.

Las curvas al ser diseñadas tomando en cuenta la Ley Fundamental del Diseño de Levas presentan una buena respuesta incluso a altas velocidades, reduciendo también las vibraciones en el equipo.

Leva armónica.

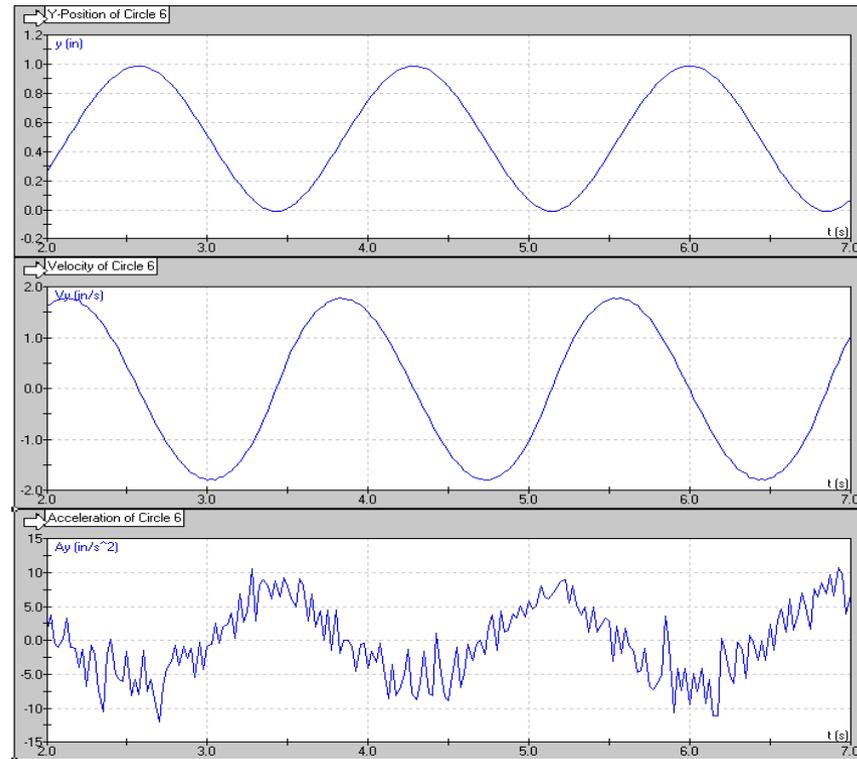


Figura 5.9 Simulación leva armónica

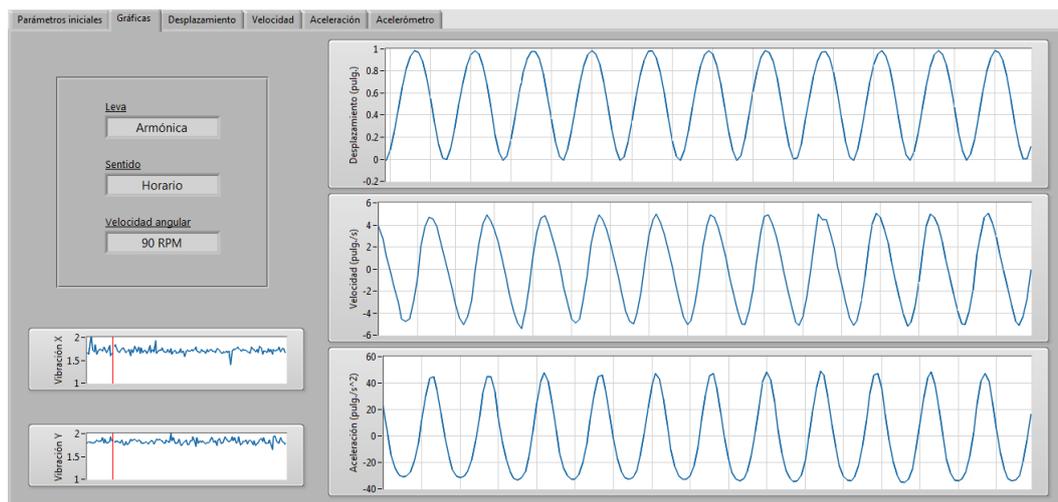


Figura 5.10 Tiempo real leva armónica

Al comparar la leva armónica con su respectiva simulación, la aceleración en tiempo real no denota vibración debido al uso de filtros.

Las curvas armónicas presentan excelente desempeño a altas velocidades, reduciendo vibraciones y desgaste en los elementos del mecanismo.

Leva tangencial.

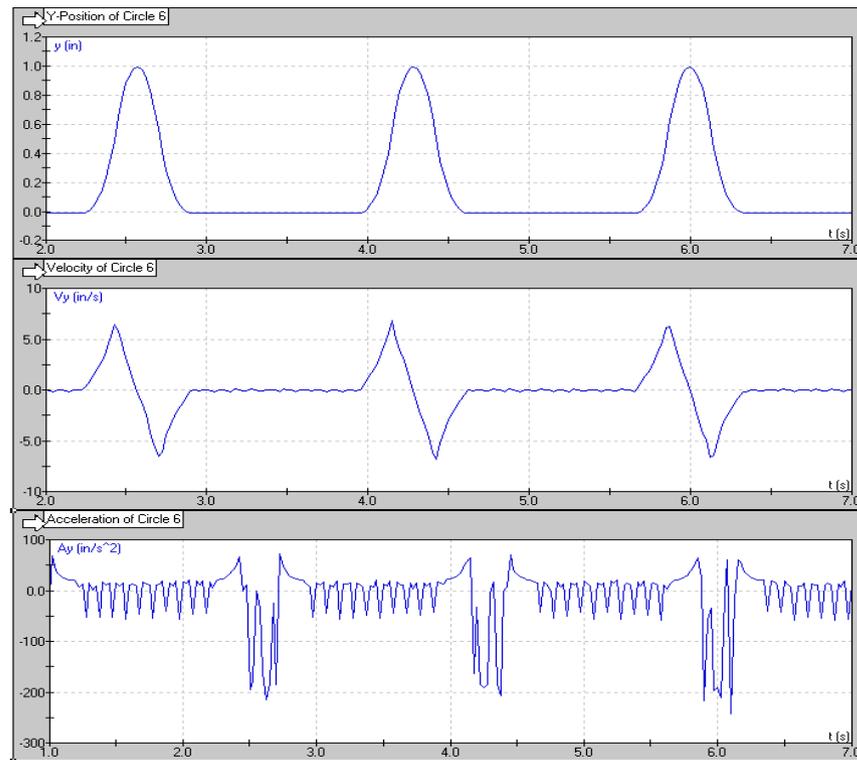


Figura 5.11 Simulación leva tangencial

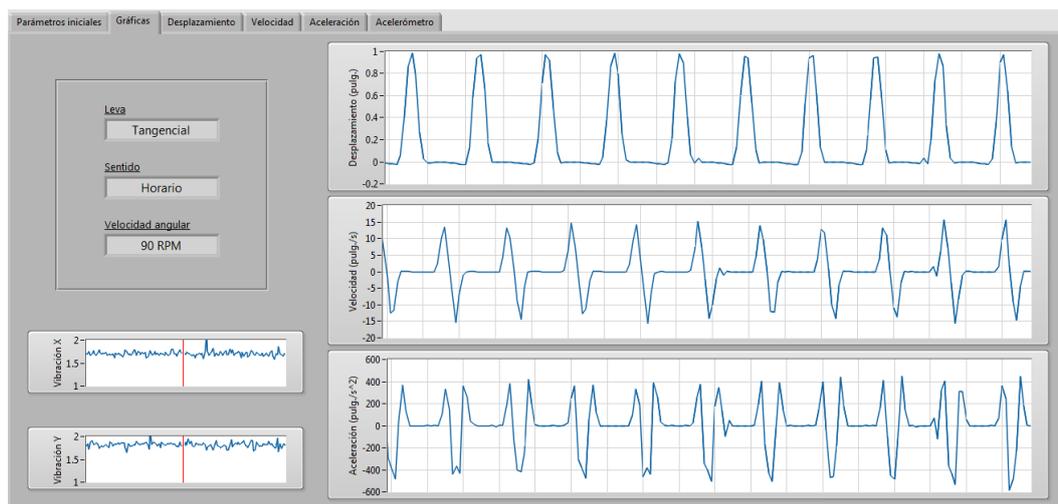


Figura 5.12 Tiempo real leva tangencial

Las curvas generadas en simulación muestran ruido en la aceleración, esto a causa de la constante de rigidez del seguidor, en cambio los diagramas generados en tiempo real son más similares a los obtenidos por las ecuaciones características de la leva tangencial.

Leva cóncava

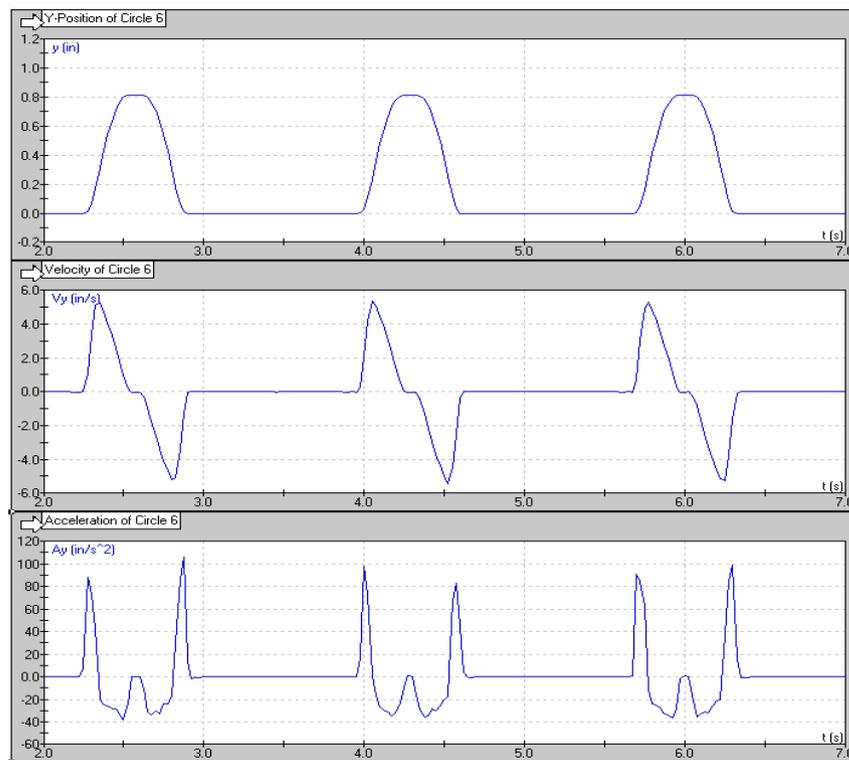


Figura 5.13 Simulación leva cóncava

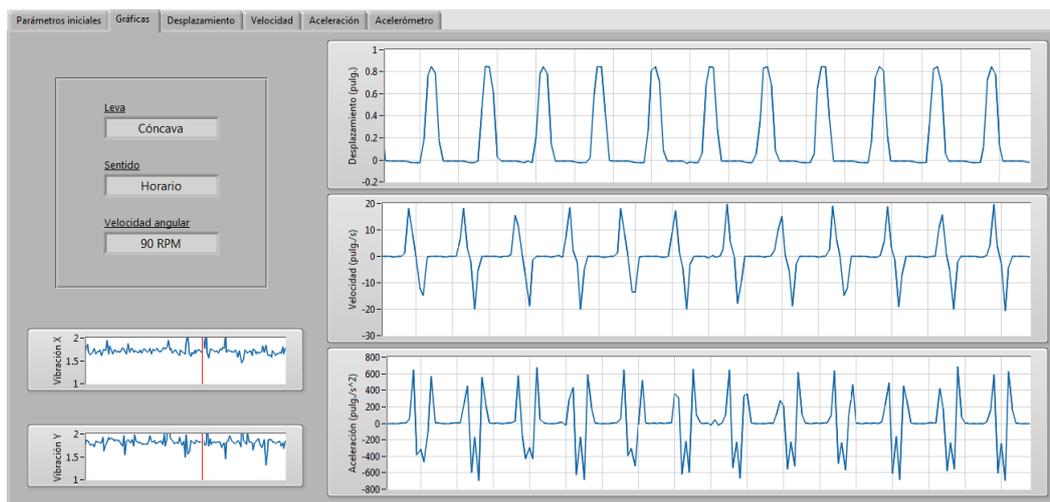


Figura 5.14 Tiempo real leva cóncava

La leva cóncava proporciona diagramas con detenimiento en su punto más alto, a causa de la escala se puede observar que la variación de lo obtenido con respecto a lo simulado es mínima.

Leva convexa 1

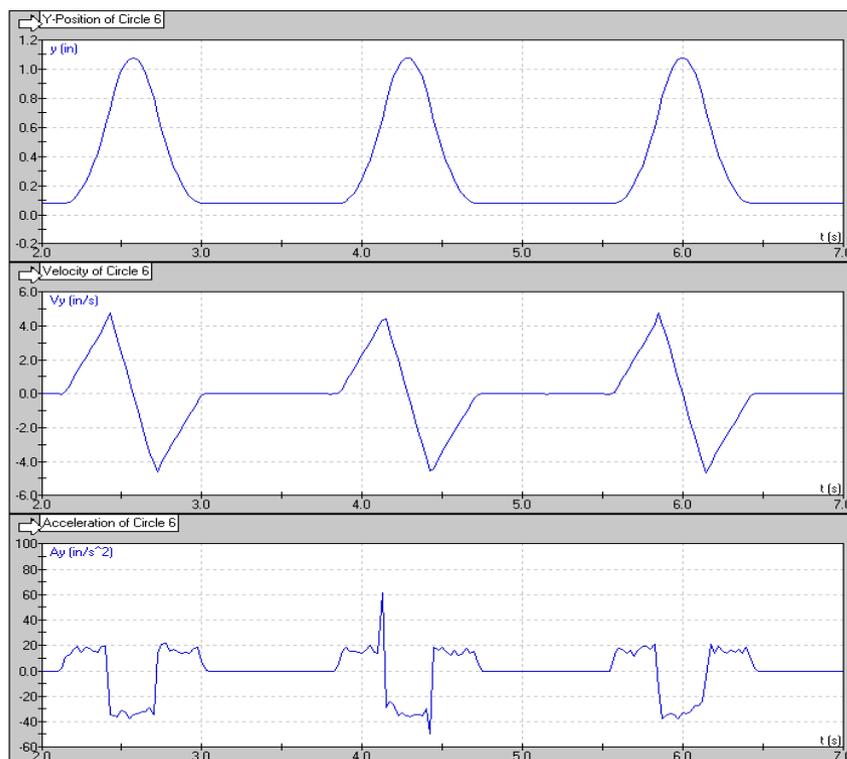


Figura 5.15 Simulación leva convexa 1

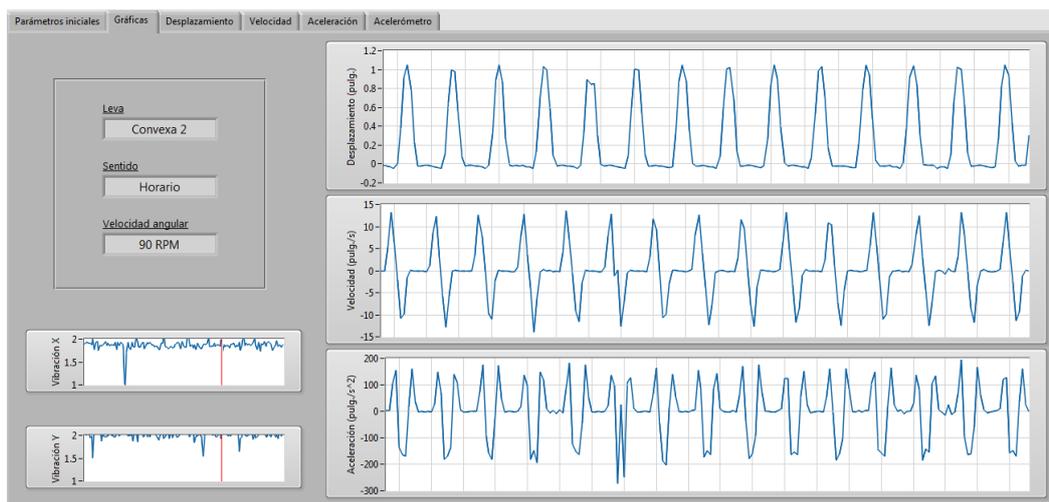


Figura 5.16 Tiempo real leva convexa 1

La leva convexa 1 presenta una gran variación en su aceleración, esto debido a que la misma no cumple con la Ley Fundamental del Diseño de Levas. Cuestión que puede ser comprobada prácticamente al mostrar variaciones demasiado bruscas.

Leva convexa 2

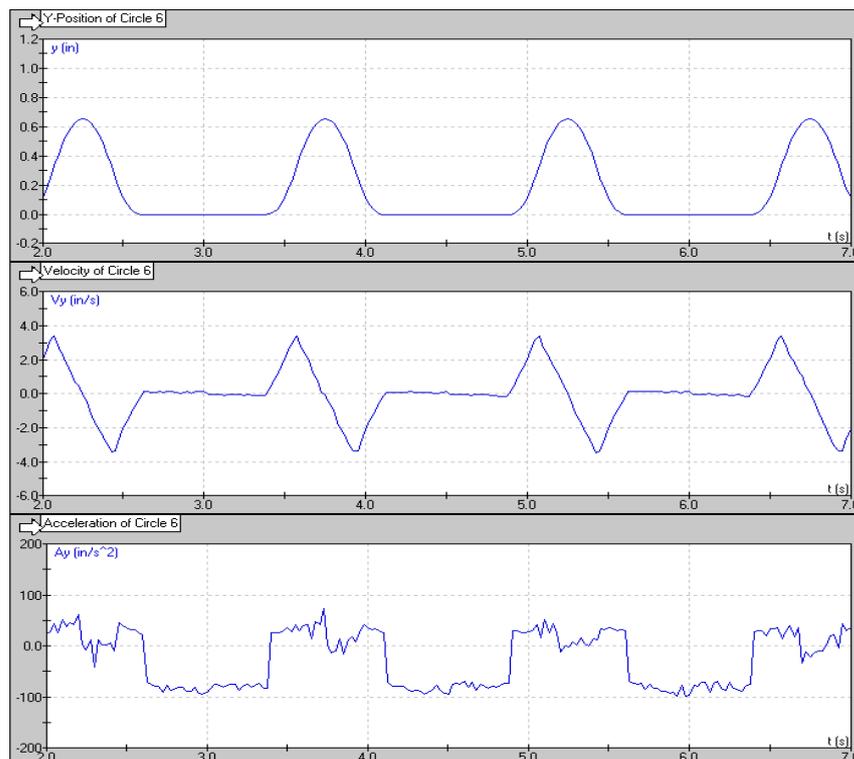


Figura 5.17 Simulación leva convexa 2

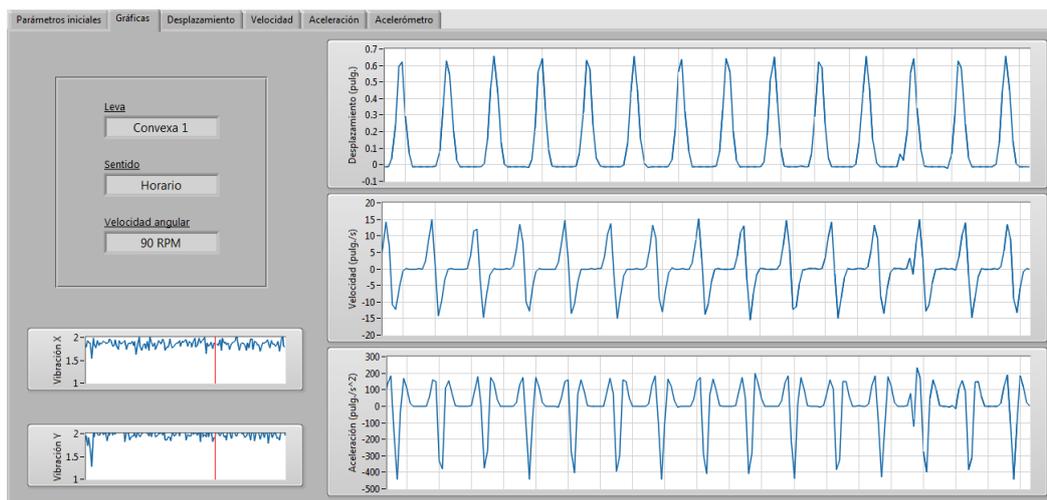


Figura 5.18 Tiempo real leva convexa 2

La leva convexa 2 al igual que la previa, no cumple con la Ley Fundamental del Diseño de Levas presentando elevadas aceleraciones y pésimo funcionamiento a elevadas velocidades.

5.4 Prueba de incertidumbre proveniente de la manufactura.

Teóricamente se afirma que la precisión de mecanizado podría afectar hasta una velocidad de 300 rpm. Pruebas que se realizaron en la práctica obteniendo los siguientes resultados.

Realizando pruebas a bajas velocidades, se puede observar que no existe variación alguna debido al mecanizado.

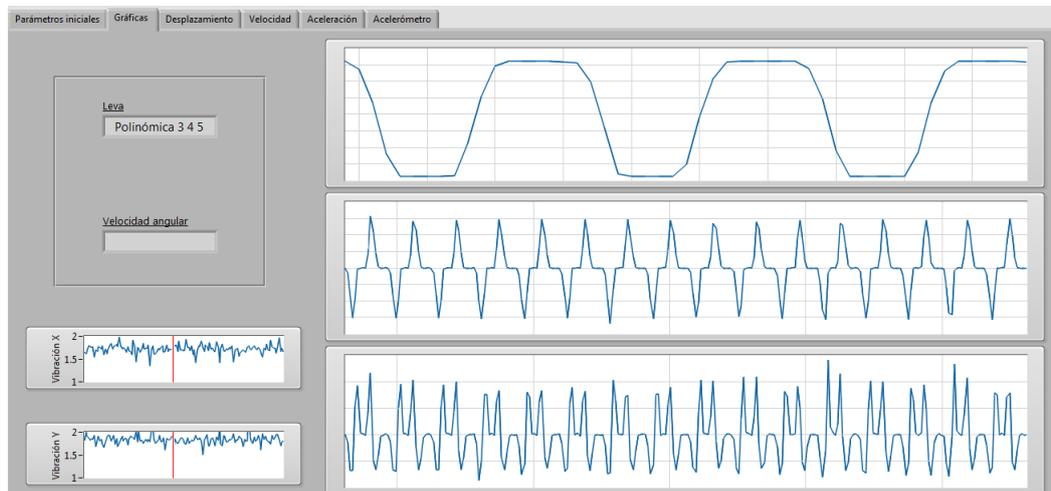


Figura 5.19 Respuesta velocidad baja

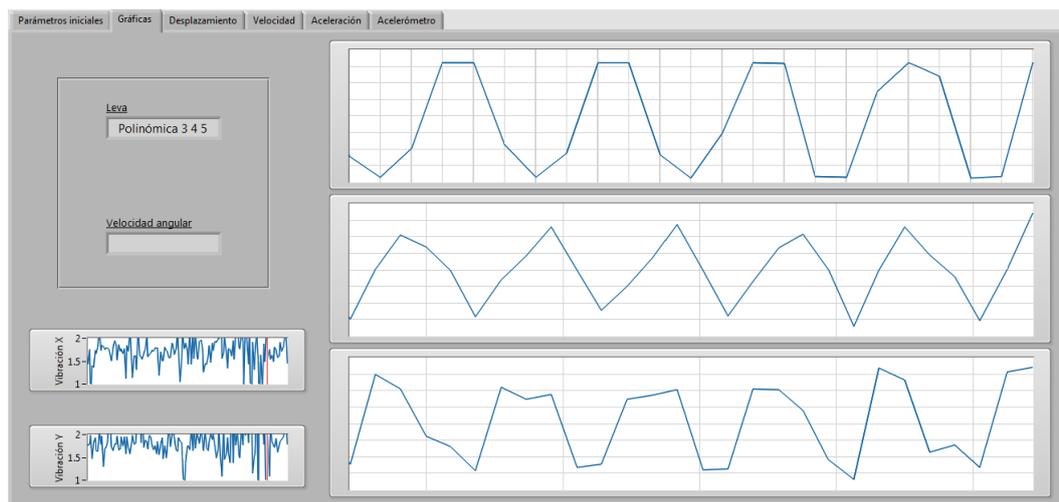


Figura 5.20 Respuesta a altas velocidades

Al realizar pruebas a altas velocidades, debido a excesivas vibraciones y la respuesta de adquisición de datos, no es posible constatar si existe variación debido al mecanizado, cuestión que no se hace tan necesaria pues como se puede observar previamente, dicha precisión no cobra relevancia ni a bajas velocidades.

A elevadas velocidades se puede constatar físicamente que son de mucha importancia los parámetros de diseño del sistema.

5.5 Pruebas de funcionamiento continuo.

El equipo fue sometido a un funcionamiento continuo, con la finalidad de visualizar algún tipo de falla o error que pueda producirse durante la práctica de laboratorio con el mismo.

Tomando en cuenta que las prácticas de laboratorio son de un tiempo muy limitado, aproximadamente de diez minutos; el equipo de levas fue puesto en marcha en el lapso de treinta minutos con el objeto de observar algún fallo ya sea de algún componente electrónico o mecánico.

Durante el lapso, el equipo no presentó ningún inconveniente físico. Los componentes mecánicos del sistema resultaron en óptimas condiciones, mientras que los elementos electrónicos no presentaron calentamientos excesivos.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS ECONÓMICO

6.1 Detalle de inversión eléctrico y electrónico.

Se detalla los valores invertidos en el equipo de levas Tecquipment TM21 062.

Cuadro 6.1
Elementos electrónicos

Elemento	Fabricante	Modelo	Valor	Cant.	Total
PCB	SME	-	79.76	1	79.76
Arduino UNO	Arduino	UNO	22	1	22
Conectores	RS	-	15	2	30
Fuente 24 V	-	-	8	2	16
Potenciómetro	Alpha	-	8	1	8
Acelerómetro	Freescale	MMA7361	7	1	7
Emergencia	-	-	5.8	1	5.8
Transistor mosfet	ST Microelectronics	STF18N60M2	4.5	1	4.5
Transistor BJT	ON Semiconductor	2N3904	0.4	1	0.4
Optoacoplador	ST Microelectronics	4N25	0.65	3	1.95
Relé 24 V 2C	Songle	SMI-24VDC-SL-2C	3.5	1	3.5
Relé 24 V 1C	Songle	SRD-24VDC-SL-C	2	1	2
Disipador	-	-	3	1	3
Diodo potencia	ST Microelectronics	STTH10LCD 06FP	2.25	1	2.25
Diodo rápido	NXP Semiconductors	1N4148	0.1	3	0.3
Diodo led	-	-	0.25	3	0.75
Regulador de tensión	ST Microelectronics	L7812CV	0.65	1	0.65
Capacitores	-	-	0.06	3	0.18
Resistencias	-	-	0.03	14	0.42
Cable flexible 8 hilos	-	-	1.25	3	3.75
Cable flexible #20	-	-	0.2	12	2.4
Cable rígido 13 hilos	-	-	2	3	6
Switch 3 posiciones	-	-	1	2	2
Total (\$)					202.61

6.2 Detalle de inversión mecánica.

Cuadro 6.2
Manufactura estructura

Máquina empleada	Empresa	Costo por hora	Horas empleadas	Total
Fresadora	Cobiplast	12	1	12
Taladrado y roscado	Cobiplast	5	1.5	7.5
Pulido	Cobiplast	6	1.5	9
Suelda	Cobiplast	3	1	3
Material	Aceros MG	-	-	9
Total (\$)				40.5

Cuadro 6.3
Manufactura leva

Máquina empleada	Empresa	Costo por hora	Horas empleadas	Total
Torno	Cobiplast	12	1.5	18
Fresadora CNC	Cobiplast	25	1.5	37.5
Electrohilo	Cobiplast	15	1	15
Material	Aceros MG	-	-	15
Total (\$)				85.5

Cuadro 6.4
Elementos mecánicos

Elemento	Valor	Cantidad	Total
Manufactura leva	85.5	3	256.5
Manufactura estructura	40.5	1	40.5
Bornera 2 vías	0.2	10	2
Bornera 3 vías	0.35	1	0.35
Bornera 9 vías	1.25	1	1.25
Rodamiento	5	1	5
Pernos	0.35	15	5.25
Brocas	3	4	12
Kit tornillos	0.1	5	0.5
Postes metálicos	0.5	5	2.5
Total (\$)			325.85

6.3 Detalle de inversión en varios.

Cuadro 6.5
Elementos varios

Elemento	Valor	Cantidad	Total
Caja de control	25	1	25
Caja acrílico protección	40	1	40
Aceite de motor	20	1	20
Removedor de pintura	10	1	10
Pintura	7	1	7
Espaguetti térmico	4	3	12
Masilla epóxica	4	1	4
Total (\$)			118

Cuadro 6.6
Total elementos

Elemento	Total
Elementos eléctricos y electrónicos	202.61
Elementos mecánicos	325.85
Elementos varios	118
Total elementos (\$)	646.46

Se observa claramente que los componentes mecánicos son aquellos de mayor costo debido a la manufactura tanto de levas como de soportes necesarios. La figura siguiente brinda una mejor idea de lo expuesto.

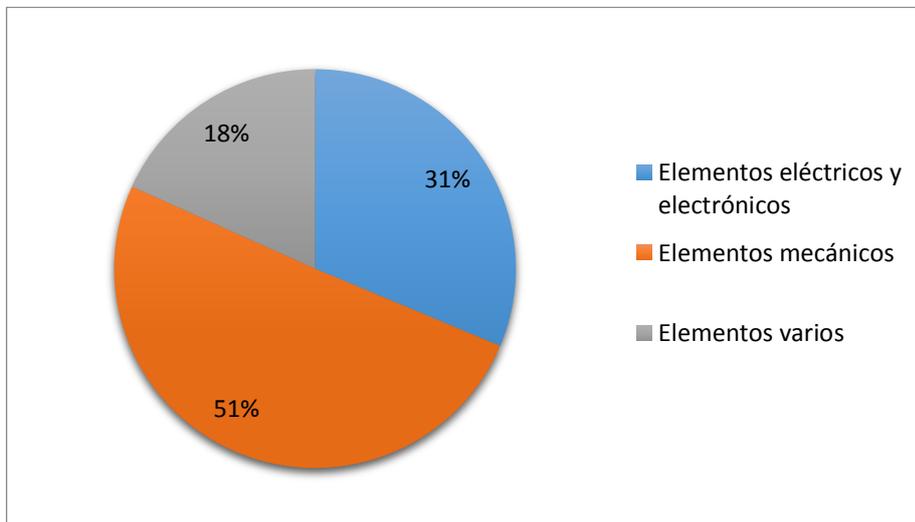


Figura 6.1 Inversión en elementos

Además de la inversión correspondiente a los elementos pertenecientes al equipo, deben ser tomados en cuenta costos de diseño e implementación, mismos que ascienden al 30% y 10% respectivamente.

El siguiente cuadro muestra una referencia del costo necesario para la automatización del equipo.

Cuadro 6.7
Inversión en automatización

Total elementos	646.46
Diseño	193.94
Implementación	64.65
Total automatización (\$)	905

Mediante el análisis previo, se puede concluir que para ser automatizado el equipo de levas Tecquipment TM21 062 necesaria una inversión mínima de 905 dólares.

CONCLUSIONES

- El estudio teórico de incertidumbre proveniente de la manufactura se vio desarrollado mediante los fundamentos proporcionados por los investigadores, mismos que descubrían a la manufactura como un factor menor en el desplazamiento del seguidor. La precisión en la manufactura poco o nada afectará al movimiento del seguidor, para lo cual fue necesaria la manufactura de levas con una fresadora CNC para su real comprobación.
- Teóricamente se ha demostrado que hasta 300 rpm, el mecanizado podría tener cierta incidencia en el movimiento del seguidor, mientras que a mayores velocidades, los parámetros dinámicos del sistema cobran mucha relevancia, separando incluso al seguidor del perfil de leva. Cuestión que prácticamente no es posible demostrar por las vibraciones excesivas del equipo y la velocidad máxima de operación del motor, que es de 500 rpm.
- Se evidenció que las levas maquinadas, las cuales cumplen la Ley Fundamental, poseen un mejor rendimiento que las existentes. Comprobando con esto que al evitar discontinuidades, el mecanismo tendrá un mejor desempeño, evitando los efectos de vibración en el seguidor e impidiendo su rápido desgaste.
- Se ha podido dimensionar correctamente tanto las piezas mecánicas como los equipos electrónicos, con el fin de rehabilitar y automatizar el sistema de monitoreo y control. El mismo que permite visualizar las variables importantes del mecanismo leva-seguidor (posición, velocidad y aceleración). El equipo en la actualidad puede graficar las tres variables de cualquier leva que sea ingresada en el equipo, tomando en cuenta sus restricciones de geometría y acoplamiento.
- El material idóneo para la fabricación de levas, debido a sus características mecánicas como a su costo, es el acero de transmisión o acero AISI 1018.

- Las levas armónica, polinómica 3 4 5 y Bezier, propuestas para el estudio, fueron elaboradas exitosamente. Para lo cual es necesario tomar en cuenta la teoría de mecanismos, procesos de manufactura y geometrías provenientes del equipo de levas.

RECOMENDACIONES

- Antes de poner en marcha el equipo, debe ser muy tomado en cuenta la correcta conexión de sus dos conectores terminales, en el caso de una mala conexión por inherencia o desconocimiento, puede ocasionarse el daño de todo el sistema de control. Ante esto, se recomienda revisar muy bien las señalizaciones de conexión, tanto en la caja de mando como en la caja de reóstato.
- Tomar muy en cuenta las indicaciones provistas por la interfaz gráfica, las cuales guiarán al usuario en el correcto manejo del equipo.
- En caso de existir un error, ya sea por mala conexión, error en comunicación, o falta de inercia en el movimiento de leva, se recomienda presionar el botón de emergencia y reiniciar todos los parámetros, tanto de conexión como de comunicación.
- Familiarizarse con el equipo previo a la realización de la práctica, con la lectura de su manual de usuario, a fin de evitar problemas y posibles daños al mismo.
- Se recomienda un mantenimiento periódico del equipo, tanto en lubricación de sus componentes móviles como en la verificación de sus conexiones eléctricas, de tal manera que no presente fallas al no ser usado por un periodo de tiempo largo. Tomando en cuenta que semestralmente únicamente es usado para una práctica específica.

BIBLIOGRAFÍA

- Boylestad, R., & Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. México: Prentice Hall.
- Cardona, S., & Clos, D. (2001). *Teoría de máquinas*. Cataluña: UPC.
- Chapman, S. (2002). *Máquinas eléctricas*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Erdman, A. G., & Sandor, G. N. (1998). *Diseño de mecanismos, análisis y síntesis*. México: Prentice Hall.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson.
- Larburu, N. (1990). *Máquinas prontuario*. Madrid: Paraninfo.
- Norton, R. L. (2009). *Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. México: McGraw-Hill.
- Olmedo, F., Echeverría, J., & Piovan, M. T. (2015). *Dinámica de levas planas: Análisis de incertidumbre de tipo paramétrico para precisión en altas velocidades*. Quito.
- Rao, J., & Dukkupati, R. (1992). *Mechanism and machine theory*. Nueva Delhi: New Age International Publishers.
- Rashid, M. (2004). *Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones*. México: Prentice Hall.
- RENSON. (10 de Marzo de 2015). *Metal Afición*. Obtenido de foro.metalaficion.com
- Rothbart, H. A. (2004). *Cam design handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Shigley, J., & Uicker, J. (1988). *Teoría de máquinas y mecanismos*. México: McGraw-Hill.
- Sudret, B. (2008). *Uncertainty propagation and sensitivity analysis in mechanical models. Contributions to structural reliability and stochastic spectral methods*. París.