



Evaluación de la respuesta dinámica de una leva polinomial polidínica 4567 con respecto a la polinomial 4567 convencional en el equipo de levas TM1021 – cam analys machine main unit del laboratorio de mecanismos del DECEM.

Cruz Córdova, Andi Patricio y Gallo Jara, Francisco Xavier

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

MSc. José Fernando Olmedo Salazar.

20 de julio del 2023



Plagiarism report

Evaluación de la respuesta dinámica ...

Scan details

Scan time:
July 25th, 2023 at 22:42 UTC

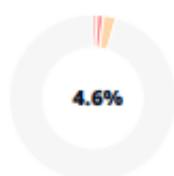
Total Pages:
122

Total Words:
30348



Reporte generado por:
JOSE FERNANDO
OLMEDO SALAZAR

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	0.8%	253
Minor Changes	1.3%	382
Paraphrased	2.5%	751
Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage

- AI text
- Human text

🔍 Plagiarism Results: (33)

📄 T-ESPE-040871.pdf

0.7%

<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/21278/1/t-e...>

Andres

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN...

📄 T-ESPE-040871.pdf

0.7%

<http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/21278/...>

Andres

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN...

📄 (Microsoft Word - 1. Car\341tula, dedicatoria, pr\36...

0.7%

<https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1278/i...>

Fernando

ANÁLISIS, DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA LEVA INDUSTRIAL MEDIANTE TÉCNICAS AVANZADAS DE MANUFACTURA Fernando Sánchez-Elías Burstein...



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular **“Evaluación de la respuesta dinámica de una leva polinomial polidínica 4567 con respecto a la polinomial 4567 convencional en el equipo de levas TM1021 – cam analyis machine main unit del laboratorio de mecanismos del DECEM”** fue realizado por los señores **Cruz Córdova, Andi Patricio** y **Gallo Jara, Francisco Xavier**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de julio del 2023

Firma:



firmado electrónicamente por:
JOSE FERNANDO
OLMEDO SALAZAR

MSc. José Fernando Olmedo Salazar

CC: 170818630 – 7



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecánica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Cruz Córdova, Andi Patricio**, con cédula de ciudadanía n°172727559-4 y **Gallo Jara, Francisco Xavier**, con cédula de ciudadanía n°172379794-8, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Evaluación de la respuesta dinámica de una leva polinomial polidínica 4567 con respecto a la polinomial 4567 convencional en el equipo de levas TM1021 – cam analysis machine main unit del laboratorio de mecanismos del DECEM** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 20 de julio del 2023

Firma:

Cruz Córdova Andi Patricio

CC: 172727559 – 4

Firma:

Gallo Jara Francisco Xavier

CC: 172379794 – 8



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecánica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Cruz Córdova, Andi Patricio**, con cédula de ciudadanía n°172727559-4 y **Gallo Jara, Francisco Xavier**, con cédula de ciudadanía n°172379794-8, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Evaluación de la respuesta dinámica de una leva polinomial polidínica 4567 con respecto a la polinomial 4567 convencional en el equipo de levas TM1021 – cam analys machine main unit del laboratorio de mecanismos del DECEM** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 20 de julio del 2023

Firma:

Cruz Córdova Andi Patricio

CC: 172727559-4

Firma:

Gallo Jara Francisco Xavier

CC: 172379794 – 8

Dedicatoria

Quiero dedicar el trabajo de titulación a mis padres Carlos y Ligia, las personas a las cuales les debo mucho, gracias por brindarme su constante apoyo para terminar lo que empecé, por siempre hacerme sentir seguro y confiado de mis habilidades, por nunca sentirse decepcionados ante algún problema que he tenido y brindarme su amor, por hacerme demostrar que puedo lograr lo que sueño, que todo lo que deseo con esfuerzo, dedicación y con las personas correctas las puedo lograr, por enseñarme a no ser una persona conformista ni mediocre, que todo lo puedo lograr si siempre confío en mí.

Quiero dedicarles a mis hermanas Sofía y Karla, que pese ante cualquier problema, ellas siempre han estado para aconsejarme, apoyarme y constantemente dedicarme de tiempo para escuchar algún problema que he tenido, por la confianza que me dan para seguir continuamente con mis sueños o anhelos que tengo planificados.

Quiero dedicarle a mi sobrino Matías, mi cuñado Fabián, las personas que se volvieron fundamentales para mi crecimiento personal, aprendiendo mucho de ellos y sirviéndome de inspiración para avanzar, luchar y culminar lo que empiezo, por el respeto y amor que me tienen.

Quiero dedicar el trabajo de titulación a mis abuelos Alfonso, Ligia, Carlos, Hipatia que pese a la distancia o a que no les tenga presente siempre supieron aconsejarme, brindarme sus conocimientos y sobre todo el despertar en mí la pasión que tengo a mi carrera de Ingeniería Mecánica, siempre sabían cómo brindar un mensaje de motivación, ayudarme y brindarme su ayuda con poco o nada de lo que tenían, pero para mí era más que suficiente.

Cruz Córdova Andi Patricio

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi familia que son la base y motivo de que haya sido posible culminar con este proceso.

Somos el reflejo de lo que vivimos, de las situaciones y experiencias, de acciones y circunstancias, dedicado a todas las personas que dejaron alguna enseñanza, algún consejo alguna palabra de aliento, que en alguna etapa de mi vida estuvieron para ayudar sin esperar nada a cambio.

Gallo Jara Francisco Xavier

Agradecimientos

Quiero agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por haberme dado la apertura de iniciar y culminar mi carrera universitaria, por este tiempo lleno de aprendizaje, de experiencia y recuerdos buenos y malos que se va aprendiendo a lo largo de cada día, por los docentes que forman parte de la Universidad que se volvieron parte esencial para adquirir nuevos conocimientos.

Quiero agradecer al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica DECEM, al laboratorio de mecanismos, a mi tutor el MSc. José Olmedo y al laboratorista el Ingeniero Samuel por todo el apoyo, paciencia, colaboración y apertura que nos ha brindado a lo largo del periodo académico para desarrollar el tema de titulación, así como la facilidad y el permitir el uso de la máquina de levas con la que desarrollamos el tema de titulación.

Quiero agradecer a mi familia por el apoyo constante en mi carrera, por la confianza que depositaron en mí, por soportar los días malos y buenos que he tenido y aun así seguirme brindando su apoyo incondicional, por cada día que me impulsaban a culminar este hermoso camino que empezó como un sueño y ahora se convierte en realidad como lo es una carrera Universitaria y la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Quiero agradecer a mis amigos dentro y fuera de la Universidad que me ayudaron constantemente con consejos, apoyo de seguir adelante y sobre todo con su tiempo para poder ayudarme aclarar posibles soluciones ante algún inconveniente que se presentaba, son parte fundamental de mi vida de lo cual estaré muy agradecido por haberles conocido en el momento exacto.

Cruz Córdova Andi Patricio

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por darme salud y estar presente en los momentos cruciales de mi vida, por permitir que mi familia sea parte de este proceso, por los tiempos duros que nos enseñaron y por los tiempos buenos que disfrutamos.

Agradezco a mi familia por regalarme su apoyo en todo momento, son la razón principal de seguir soñando, y de trabajar hasta poder cumplirlos. Gracias por su innegable presencia y acertados consejos. A mi padre el gran ejemplo de trabajo, por inculcarme la pasión y amor a la mecánica, por su frase "Vas a ser un Ingeniero Mecánico" hace 20 años. A mi madre símbolo de paciencia y apoyo incondicional, por compartir conmigo su filosofía de vida, sus sabias palabras en momentos de agotamiento y frustración, por procurar que nada me falte día a día. A mi hermana que siempre ha sido y será mi punto de referencia, por ser mi faro guía en momentos de duda.

A mi tutor por su paciencia amistad y amplio conocimiento, por buscar herramientas y los mejores métodos de enseñanza, sin su guía hubiese sido imposible culminar con este trabajo, gracias por todos los consejos que serán de gran ayuda en el futuro profesional.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE", al departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, por permitir que me forme de manera profesional con los mejores estándares de estudio y aprendizaje.

Gallo Jara Francisco Xavier

Índice de Contenidos

Resumen	19
Abstract.....	20
Capítulo Generalidades.....	21
Introducción.....	21
Definición del problema.....	21
Objetivos.....	22
Objetivo General	22
Objetivo Específico.....	22
Justificación	22
Alcance	23
Capítulo Marco Teórico	24
Obtención de los parámetros inerciales	24
Probador de resortes	24
Vástago del seguidor.....	29
Análisis y diseño de la leva polinomial	32
Análisis y diseño de la leva polidínica	45
Análisis y diseño de la leva con series de Fourier.....	61
Análisis de la respuesta dinámica	73
Leva polinomial 45678	73
Leva polidínica	78
Leva de Fourier	83
Capítulo Diseño y Simulación	89
Diseño y modelamiento CAD	89

Diseño de la base para las levas	96
Diseño de la leva polinomial 45678	99
Diseño de la leva polidínica.....	101
Diseño de la leva de Fourier	103
Capítulo Construcción	106
Selección de proceso para fabricación	106
Fabricación por mecanizado CNC.....	106
Fabricación por electrohilo	107
Selección de material	107
Fabricación de las levas.....	108
Capítulo Pruebas y Ensayos	113
Ensayos y pruebas de funcionamiento de la leva polinomial	114
Ensayos y pruebas de funcionamiento de la leva polidínica	115
Ensayos y pruebas de funcionamiento de la leva de Fourier	116
Ensayos y pruebas de funcionamiento de la leva convexa tipo A	118
Ensayos y pruebas de funcionamiento de la leva convexa tipo B	119
Ensayos y pruebas de funcionamiento de la leva tangencial	121
Capítulo Análisis de Resultados	123
Gráficas de posición	123
Gráficas de velocidad	124
Gráficas de aceleración	125
Gráficas de fuerza de contacto	126
Gráficas de par torsión.....	127
Gráficas de los perfiles de las levas	128

Comparativa y selección de la mejor leva	129
Capítulo Conclusiones y Recomendaciones	130
Conclusiones	130
Recomendaciones	132
Bibliografía	133
Apéndice	134

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Partes del probador de resortes</i>	25
Tabla 2 <i>Especificaciones técnicas del probador de resortes</i>	25
Tabla 3 <i>Especificaciones técnicas del equipo ZEISS</i>	91

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Máquina probadora de resortes</i>	24
Figura 2 <i>Masas utilizadas para ensayo de resortes</i>	26
Figura 3 <i>Escala de la máquina probadora de resortes</i>	26
Figura 4 <i>Ensayo del resorte de color blanco</i>	27
Figura 5 <i>Constante del resorte blanco</i>	27
Figura 6 <i>Ensayo con el resorte de color azul</i>	28
Figura 7 <i>Constante del resorte azul</i>	29
Figura 8 <i>Desarmado de vástago del equipo</i>	30
Figura 9 <i>Toma de medidas del vástago</i>	31
Figura 10 <i>Armado del vástago</i>	31
Figura 11 <i>Constante del vástago</i>	32
Figura 12 <i>Condiciones de frontera</i>	33
Figura 13 <i>Posición de la leva convexa tipo B</i>	36
Figura 14 <i>Posición de la leva polinomial 45678 VS leva convexa tipo B</i>	37
Figura 15 <i>Velocidad de la leva polinomial 45678 VS leva convexa tipo B</i>	39
Figura 16 <i>Aceleración de la leva polinomial 45678 VS leva convexa tipo B</i>	41
Figura 17 <i>Sobre aceleración de la leva polinomial 45678</i>	42
Figura 18 <i>Ángulo de presión de la leva polinomial 45678 VS la leva convexa tipo B</i>	43
Figura 19 <i>Radio de curvatura de la leva polinomial 45678 VS leva convexa tipo B</i>	44
Figura 20 <i>Perfil de la leva polinomial 45678</i>	44
Figura 21 <i>Diferencia entre leva polinomial y polidínica</i>	47
Figura 22 <i>Posición de la leva convexa tipo B</i>	49
Figura 23 <i>Desplazamiento de la leva polidínica VS leva convexa tipo B</i>	50

Figura 24 <i>Velocidad de la leva polidínica VS leva convexa tipo B</i>	51
Figura 25 <i>Aceleración de la leva polidínica VS leva convexa tipo B</i>	54
Figura 26 <i>Sobre aceleración de la leva polidínica</i>	55
Figura 27 <i>Ángulo de presión de la leva polidínica</i>	56
Figura 28 <i>Radio de curvatura de la leva polidínica</i>	57
Figura 29 <i>PING de ajuste para la leva polidínica</i>	58
Figura 30 <i>Diagrama de cuerpo libre</i>	45
Figura 31 <i>Ajuste de la posición de la leva polidínica</i>	59
Figura 32 <i>Ajuste de la velocidad de la leva polidínica</i>	59
Figura 33 <i>Ajuste de la aceleración polidínica</i>	60
Figura 34 <i>Perfil de la leva polidínica</i>	61
Figura 35 <i>Ecuación del desplazamiento de la leva convexa tipo B</i>	63
Figura 36 <i>Desplazamiento de la leva convexa tipo B VS leva de serie de Fourier</i>	65
Figura 37 <i>Velocidad de la leva convexa tipo B VS la leva de la serie de Fourier</i>	67
Figura 38 <i>Aceleración de la leva de la serie de Fourier</i>	69
Figura 39 <i>Sobre aceleración de la leva de la serie de Fourier</i>	70
Figura 40 <i>Ángulo de presión de la leva de la serie de Fourier</i>	71
Figura 41 <i>Radio de curvatura de la serie de Fourier</i>	72
Figura 42 <i>Perfil de la leva de la serie de Fourier</i>	72
Figura 43 <i>Fuerza de contacto leva polinomial 45678</i>	74
Figura 44 <i>Par torsional leva polinomial 45678</i>	75
Figura 45 <i>Gráfica de posición del análisis dinámico leva polinomial 45678</i>	76
Figura 46 <i>Gráfica de velocidad del análisis dinámico leva polinomial 45678</i>	76
Figura 47 <i>Gráfica de aceleración del análisis dinámico leva polinomial 45678</i>	77

Figura 48 <i>Gráfica de sobre aceleración del análisis dinámico leva polinomial 45678</i>	77
Figura 49 <i>Fuerza de contacto leva polidínica</i>	79
Figura 50 <i>Par torsional leva polidínica</i>	80
Figura 51 <i>Gráfica de posición del análisis dinámico leva polidínica</i>	81
Figura 52 <i>Gráfica de velocidad del análisis dinámico leva polidínica</i>	81
Figura 53 <i>Gráfica de aceleración del análisis dinámico leva polidínica</i>	82
Figura 54 <i>Gráfica de sobre aceleración del análisis dinámico leva polidínica</i>	82
Figura 55 <i>Fuerza de contacto leva de Fourier</i>	84
Figura 56 <i>Par torsión leva de Fourier</i>	85
Figura 57 <i>Gráfica de posición del análisis dinámico de la leva de Fourier</i>	86
Figura 58 <i>Gráfica de velocidad del análisis dinámico de la leva de Fourier</i>	86
Figura 59 <i>Gráfica de aceleración del análisis dinámico de la leva de Fourier</i>	87
Figura 60 <i>Gráfica de sobre aceleración del análisis dinámico de la leva de Fourier</i>	87
Figura 61 <i>Esquema general de las partes de una leva</i>	89
Figura 62 <i>Toma de medidas referenciales de una leva</i>	90
Figura 63 <i>Equipo de validación metrológica</i>	91
Figura 64 <i>Limitaciones del equipo de validación metrológica ZEISS</i>	92
Figura 65 <i>Sujeción de la leva en la mesa del equipo ZEISS</i>	93
Figura 66 <i>Toma de puntos referenciales de la leva</i>	93
Figura 67 <i>Toma de puntos referenciales antes del barrido</i>	94
Figura 68 <i>Perfil de la leva en el programa calypso ZEISS</i>	94
Figura 69 <i>Reporte dimensional de la leva</i>	95
Figura 70 <i>Esquema de la base a utilizar en las levas</i>	96
Figura 71 <i>Croquis de la base</i>	97

Figura 72 Arandela de fijación	97
Figura 73 Agujeros pasantes en la base	98
Figura 74 Extrucción de los croquis de referencia	98
Figura 75 Dimensionamiento de la base para las levas	99
Figura 76 Esquema en 3D de la leva polinomial 45678.....	99
Figura 77 Obtención de las coordenadas de la leva polinomial	100
Figura 78 Extrucción de la leva polinomial.....	100
Figura 79 Diseño de la leva polinomial a construir.....	101
Figura 80 Esquema en 3D de la leva polidínica	101
Figura 81 Obtención de las coordenadas de la leva polidínica	102
Figura 82 Croquis de la leva polidínica.....	102
Figura 83 Diseño de la leva polidínica a construir	103
Figura 84 Esquema en 3D de la leva de la serie de Fourier	103
Figura 85 Obtención de las coordenadas de la leva de la serie de Fourier	104
Figura 86 Croquis de la leva de la serie de Fourier	104
Figura 87 Diseño de la leva de la serie de Fourier a construir	105
Figura 88 Inicio de la fabricación por electroerosión	106
Figura 89 Inicio de la fabricación por electroerosión	109
Figura 90 Importación del archivo DXF al programa para electroerosión.....	109
Figura 91 Inicio del corte por hilo - electroerosión	110
Figura 92 Finalización del corte por hilo de la base de las levas y sus bases	110
Figura 93 Soldadura entre la base y la leva	111
Figura 94 Pulido de las caras de las levas soldadas.....	111
Figura 95 Pintado y grabado de identificación para cada leva	112

Figura 96 VDAS para adquisición de datos.....	113
Figura 97 Fuerza de contacto teórica de la leva polinomial	114
Figura 98 Despegue de la leva polinomial 45678.....	114
Figura 99 Fuerza de contacto teórica de la leva polidínica.....	115
Figura 100 Despegue de la leva polidínica práctica	115
Figura 101 Medidor de decibeles de la leva polidínica	116
Figura 102 Fuerza de contacto teórica de la leva de Fourier	116
Figura 103 Despegue de la leva de la serie de Fourier grado 13 práctica	117
Figura 104 Medidor de decibeles de la leva de la serie de Fourier grado 13	117
Figura 105 Fuerza de contacto de la leva convexa tipo A práctica	118
Figura 106 Medidor de decibeles de la leva convexa tipo A	119
Figura 107 Fuerza de contacto teórica de la leva tipo B.....	119
Figura 108 Fuerza de contacto de la leva tipo B práctica	120
Figura 109 Medidor de decibeles de la leva tipo B	120
Figura 110 Fuerza de contacto de la leva tangencial práctica	121
Figura 111 Medidor de decibeles de la leva tangencial	121
Figura 112 Posición leva convexa tipo B, polinomial 45678, polidínica y serie de Fourier grado 13	123
Figura 113 Velocidad leva convexa tipo B, polinomial 45678, polidínica y serie de Fourier grado 13	124
Figura 114 Aceleración leva convexa tipo B, polinomial 45678, polidínica y serie de Fourier grado 13 ..	125
Figura 115 Fuerza de contacto convexa tipo B, polinomial, polidínica y serie de Fourier grado 13.....	126
Figura 116 Par torsión leva convexa tipo B, polinomial 45678, polidínica y serie de Fourier grado 13 ...	127
Figura 117 Perfiles de la leva convexa tipo B, polinomial 45678, polidínica y series de Fourier grado 13	128

Resumen

El equipo de levas TM1021 - cam analyis machine main unit de reciente adquisición es un aporte considerable al laboratorio de mecanismos ya que integra un moderno sistema de adquisición de datos denominado VDAS que permite determinar el desplazamiento, velocidad y aceleración y puede detectar el despegue del seguidor. Esta posibilidad determina que el equipo no solo pueda ser usado en la docencia sino también en investigación. Es por esta razón que se plantea este primero proyecto de investigación que consiste en fabricar dos levas y compararlas en el equipo TM1021. Determinando cual genera mayor retardo en el despegue. Para la síntesis de las levas que se van a diseñar y fabricar para la evaluación de respuestas dinámicas, se va a determinar en primer lugar los parámetros inerciales y elásticos del tren del seguidor. Una vez determinada la respuesta dinámica de la leva polinomial 4567 y la velocidad del despegue del seguidor, se abordará la síntesis de la leva polidínica para esta velocidad. Finalmente se construirán ambas levas y se probarán en el equipo de laboratorio. En las levas polidinas, el perfil de la leva está diseñado de tal manera que la curva de elevación del seguidor coincida con una ecuación polinomial seleccionada a la velocidad de diseño deseada, dadas las características dinámicas del sistema leva-seguidor. Los trenes de engranajes de válvulas de automóviles y los miembros de máquinas textiles son excelentes ejemplos de buenas aplicaciones polidinas. El método polidino fue presentado originalmente por Dudley (1948) y elaborado por Stoddart (1953). Este es el primer método que diseña la forma de la leva para dar la acción de seguidor deseada.

Palabras claves: adquisición, despegue, fabricación, comparación, síntesis.

Abstract

The recently acquired cam unit TM1021 - cam analysis machine main unit is a considerable contribution to the mechanics laboratory since it integrates a modern data acquisition system called VDAS that allows the determination of displacement, speed and acceleration and can detect follower takeoff. This possibility determines that the equipment can't only be used in teaching but also in research. It is for this reason that this first research project is proposed, which consists of manufacturing two cams and comparing them in the TM1021 equipment. Determining which generates the greatest takeoff delay. For the synthesis of the cams that are going to be designed and manufactured for the evaluation of dynamic responses, the inertial and elastic parameters of the follower train will be determined first. Once the dynamic response of the 4567 polynomial cam and the follower take-off speed have been determined, the synthesis of the polydyne cam for this speed will be addressed. Finally both cams will be built and tested on the laboratory equipment. In polydyne cams, the cam profile is designed such that the follower lift curve matches a selected polynomial equation at the desired design velocity, given the dynamic characteristics of the cam-follower system. Automotive valve gear trains and textile machine members are excellent examples of good polydyne applications. The polydyne method was originally presented by Dudley (1948) and elaborated by Stoddart (1953). This is the first method that designs the shape of the cam to give the desired follower action.

Keywords: acquisition, takeoff, manufacturing, comparison, synthesis.

Capítulo Generalidades

Introducción

Han pasado más de 40 años desde que el Cosworth DFV debutó ganando una carrera en un evento de fórmula 1 y sorprendentemente desde entonces ha habido una notable falta de buena información técnica relacionada con el diseño del sistema leva – seguidor, después de realizar varios estudios y ensayos, les permitió evaluar rápidamente diferentes arreglos, viendo salidas como cargas de pivote, velocidad de arrastre, ángulos de presión, perfiles de levas, geometría del seguidor de dedos, cargas de resorte, entre otros, actualmente la leva es un elemento mecánico sumamente versátil, gracias a la gran cantidad de geometrías y la gran variedad de combinaciones de leva seguidor que ha ido evolucionando con el pasar de los años. (JJ. Williams, 2013) La leva – seguidor al ser considerada como un mecanismo está compuesto de elementos que se conjugan entre sí para generar movimientos determinados, “es por eso que se utilizan en aplicaciones donde el ritmo y el movimiento lineal deben estar secuenciados con precisión” (Myszka, 2012a), el estudio de la misma es considerado como una ciencia aplicada que sirve para comprender las relaciones causa efecto entre los componentes mecánicos y los movimientos producidos en una máquina o mecanismos. (José F. Olmedo S. & Jaime F. Echeverría Y., 2018) Las ventajas básicas de la leva polidínica es que por medios directos puede eliminar el salto del seguidor fuera de la leva, por cálculo directo proporciona control de la posición exacta del extremo del seguidor y limita las vibraciones a amplitudes mínimas a la velocidad de diseño.

Definición del problema

Las levas se utilizan relativamente para el mismo propósito el cual es la generación de movimiento irregular, las mismas de las cuales están diseñadas para especificaciones de movimientos estrictos, considerando las levas convexas y tangencial de la máquina TM1021 – CAM ANALYSIS MACHINE MAIN UNIT se pudo determinar que tiene una limitación de 150 rpm para empezar a notarse lo que se conoce como salto al punto en el que la leva y el seguidor no se encuentran en contacto, donde no se

tendría datos adecuados considerando la que máxima capacidad de la máquina que es de 500 rpm, de aquí surge la necesidad de realizar levas que se ajusten a las limitaciones de las máquinas, llegando a su máxima capacidad de revoluciones sin existir los saltos antes mencionados.

Objetivos

Objetivo General

- Obtener la comparativa de la respuesta de una leva polidínica 4567 con respecto a una leva polinomial convencional 4567 en el equipo de levas del laboratorio de mecanismo TM1021 – CAM ANALYSIS MACHINE MAIN UNIT.

Objetivo Específico

- Obtener los parámetros inerciales de la máquina TM1021 – CAM ANALYSIS MACHINE MAIN UNIT.
- Diseñar, construir y comparar teórica y prácticamente la respuesta dinámica de dos levas, una de perfil polinomial normal y la otra de perfil polidínica.
- Diseñar y construir una leva de Fourier con su respectiva validación metrológica.
- Realizar, comparar y analizar las gráficas de posición, velocidad y aceleración de la leva polinomial y la leva polidínica.
- Realizar la validación metrológica de las levas polinomial y polidínica construidas.

Justificación

Dentro de los 14 laboratorios que forman parte del Departamento De Ciencias de la Energía y Mecánica del DECEM se busca fomentar el aprendizaje y constante mejora continua que se observa con los diferentes equipos que forman parte de dichos laboratorios, de donde se hablará específicamente del laboratorio de mecanismos del DECEM, para llegar a cumplir con la misión y visión que mantiene la institución y el departamento de la carrera de ingeniería mecánica como tal, es por tal razón que del equipo de levas TM1021 – cam analysis machine main unit las levas de perfil tangencial de la máquina serán reemplazadas por una leva polidínica y una leva polinomial 4567, haciendo mención que la leva

tangencial puede llegar hasta un límite de 150 rpm antes de empezar un despegue entre la leva y el seguidor, por lo contrario ocurriría con las levas polidínica y polinomial 4567 que se pretende llegar a las 500 rpm máxima del equipo para que no exista despegue, siendo construidas una vez realizado el análisis cinemático y dinámico respectivo, para obtener una comparativa teórica – práctica adecuada, de igual forma se realizará una leva de Fourier para un análisis analítico con el fin de tener un actualización en el equipo y mejorarlo, ya que las levas disponibles actualmente del equipo tienen diseños que ya no son utilizados. De esta manera los estudiantes del laboratorio de Mecanismo del DECEM podrán realizar nuevas prácticas orientadas a las ventajas que se obtienen con el nuevo diseño de levas.

Alcance

Los mecanismos de leva se utilizan en diversas formas de maquinaria, pero algunos de los mecanismos considerados pueden ser adecuados para otras máquinas como las que se usa para imprimir y empaquetar. Se diseñará y construirá una leva de perfil polinomial y otra de perfil polidínica para verificar el funcionamiento adecuado del sistema, de esta forma se reemplazará las levas originales del equipo que se encuentra en el laboratorio, con esta se pretende mejorar el desempeño del equipo, disminuir el ruido y concatenar la teoría que se imparte en clase con las pruebas de prácticas de laboratorio. Por medio del presente proyecto se pretende profundizar los conocimientos que se tiene sobre el comportamiento dinámico de un sistema mecánico leva – seguidor, en este análisis de estudio se considerará el análisis metrológico de las levas polinomial y polidínica, a su vez incluyendo parámetros como el modelo matemático y la respuesta dinámica que se tiene con las levas que se ha venido utilizando en el equipo TM1021 – cam analysis machine main unit con las nuevas levas de perfil polinomial y perfil polidínica que se realizará, obteniendo datos que nos ayudarán a realizar el análisis respectivo para posteriores pruebas para el equipo.

Capítulo Marco Teórico

Obtención de los parámetros inerciales del equipo TM1021 – CAM ANALYSIS MACHINE MAIN UNIT

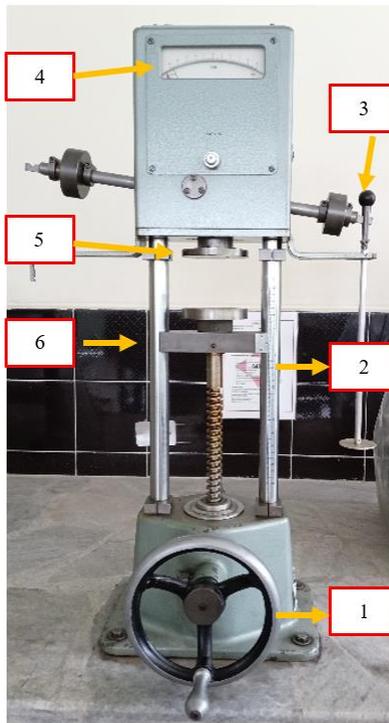
Para la obtención de los parámetros inerciales del equipo TM1021 – cam analysis machine main unit del laboratorio de mecanismos es muy importante realizar el análisis de los dos resortes propios de la máquina el uno de color azul y el otro de color blanco, así como también del vástago del equipo para corroborar que los valores que nos proporciona el manual del equipo sean correctos.

Probador de resortes

Para la determinación de las constantes de los resortes vamos a proceder a utilizar el equipo conocido como “Probador de resortes” propio del laboratorio de mecánica de materiales.

Figura 1

Máquina probadora de resortes



Nota. El gráfico presenta la máquina probadora de resortes del laboratorio de Ciencias de los Materiales donde se realizaron las prácticas respectivas para la obtención de las constantes de resorte que se implementaron para la realización del presente tema de titulación.

Tabla 1*Partes del probador de resortes*

PARTES DEL EQUIPO	
1	Volante para desplazar cabezal
2	Regla de medición en cm
3	Porta pesas
4	Punto de equilibrio de fuerza
5	Cabezal fijo
6	Cabezal móvil

Nota. Partes de la figura número 1 correspondiente al equipo probador de resortes.

Tabla 2*Especificaciones técnicas del probador de resortes*

PROBADOR DE RESORTES	
Código	MM – 04
Marca	AMSLER
Modelo	PF 445
Peso	50 kg
Capacidad máxima	100 kgf

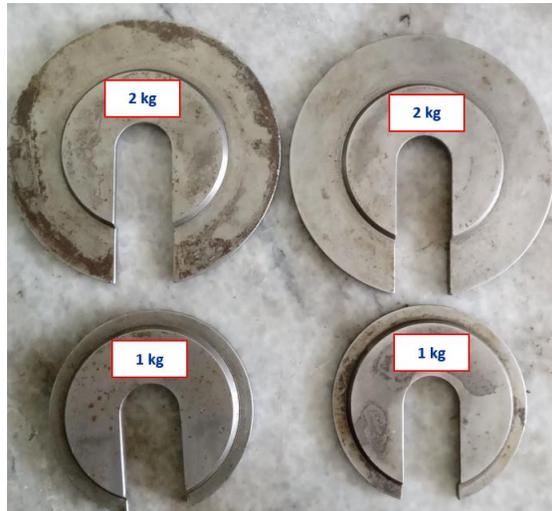
Nota. Especificaciones del equipo probador de resortes.

El probador de resortes tiene el principio de funcionamiento similar al de una prensa hidráulica, en donde se aplica los resortes uno por uno en la placa base y en contacto con la parte superior del equipo, de esta forma se irá aplicando cierta cantidad de peso paulatinamente en la balanza, haciendo que el resorte se comprima y a través del desplazamiento que se tiene al aplicar estas masas se irá tomando datos de la cantidad de masas que se han aplicado y el desplazamiento que se ha ido teniendo entre cada resorte, para posteriormente obtener una pendiente entre los datos obtenidos y así determinar las constantes de los resortes.

Las masas aplicadas para el ensayo de la obtención de las constantes de los resortes son las siguientes:

Figura 2

Masas utilizadas para ensayo de resortes

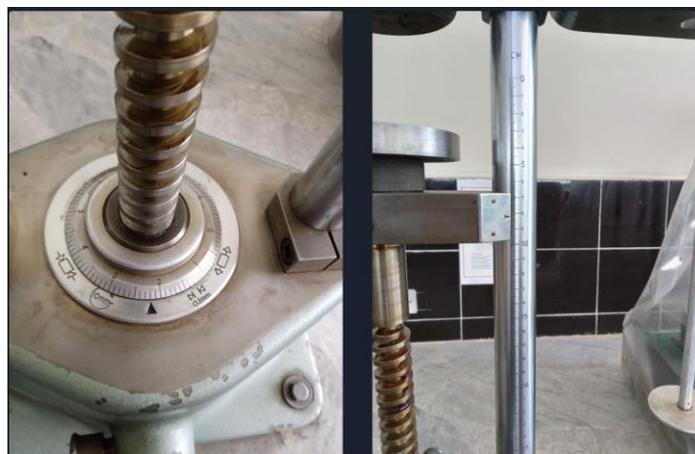


Nota. En la figura se indica las masas de 1 kilogramo hasta 2 kilogramos que fueron utilizadas en la máquina probadora de resortes para los ensayos respectivos.

Para la obtención de los datos de compresión que se obtiene en los resortes es necesario saber las unides y presión con las que se está trabajando y son propias del equipo, de esto se pudo observar que la graduación para la toma de datos de los resortes está en centímetro con precisión de ± 0.1 mm

Figura 3

Escala de la máquina probadora de resortes



Nota. En la figura se evidencia la escala y precisión que tiene el equipo probador de resortes que se utilizó para determinar el valor de las constantes de los resortes utilizados.

Resorte de color blanco

De esta forma aplicamos las cargas de 1kg, 2kg hasta llegar a conseguir 4kg, considerando que este resorte es más rígido en comparación del de color azul, obteniendo los siguientes resultados de este ensayo:

Figura 4

Ensayo del resorte de color blanco



Nota. En la figura se evidencia como se realizó el ensayo con el resorte de color blanco para poder determinar la constante del resorte y de esta forma tener un valor más exacto para los cálculos respectivos.

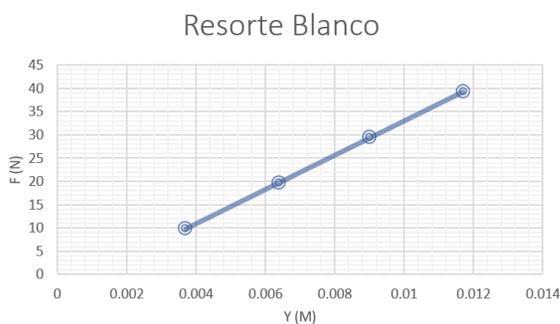
Teniendo como resultados la siguiente tabulación de datos:

Figura 5

Constante del resorte blanco

$$y = 3770x - 3.88$$

Resorte Blanco			
Referencia	y1 (mm)	y (m)	F (N)
77.5	73.8	0.0037	9.81
77.5	71.1	0.0064	19.62
77.5	68.5	0.009	29.43
77.5	65.8	0.0117	39.24



Nota: en la figura se puede evidenciar los datos tomados en los ensayos realizados en el probador de resortes y de ahí se procedió a calcular la constante del resorte, teniendo un valor de 3770 [N/m].

De acuerdo a los datos obtenidos y al ajuste de los puntos encontrados de acuerdo a la toma de datos, se procedió a determinar la ecuación que se ajusta más a los puntos de la curva, teniendo como resultado que la constante del resorte blanco es de 3770 [N/m] corroborando la información que se tiene en el manual de usuario del equipo TM1021 – cam analysis machine main unit.

Resorte de color azul

De esta forma aplicamos las cargas de 1kg, 2 kg hasta llegar a conseguir 3kg, considerando que este resorte no es tan rígido en comparación del resorte de color blanco, obteniendo los siguientes resultados de este ensayo:

Figura 6

Ensayo con el resorte de color azul

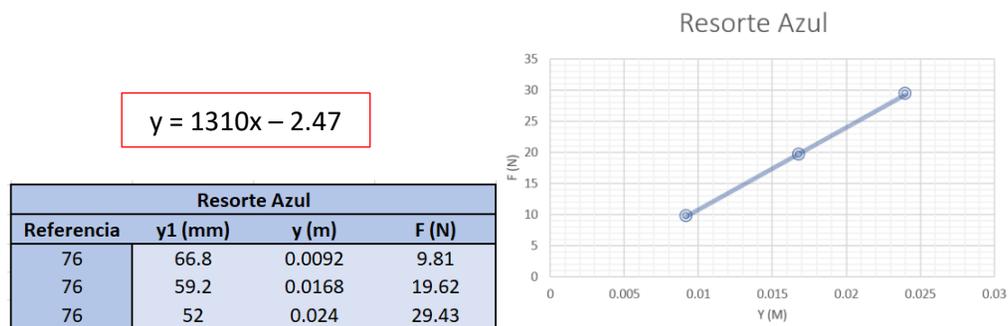


Nota: Se realizó los ensayos respectivos para calcular la constante del resorte color azul, propia del equipo.

Teniendo como resultados la siguiente tabulación de datos se tiene lo siguiente:

Figura 7

Constante del resorte azul



Nota: en la figura se puede evidenciar los datos tomados en los ensayos realizados en el probador de resortes y de ahí se procedió a calcular la constante del resorte, teniendo un valor de 1310 [N/m].

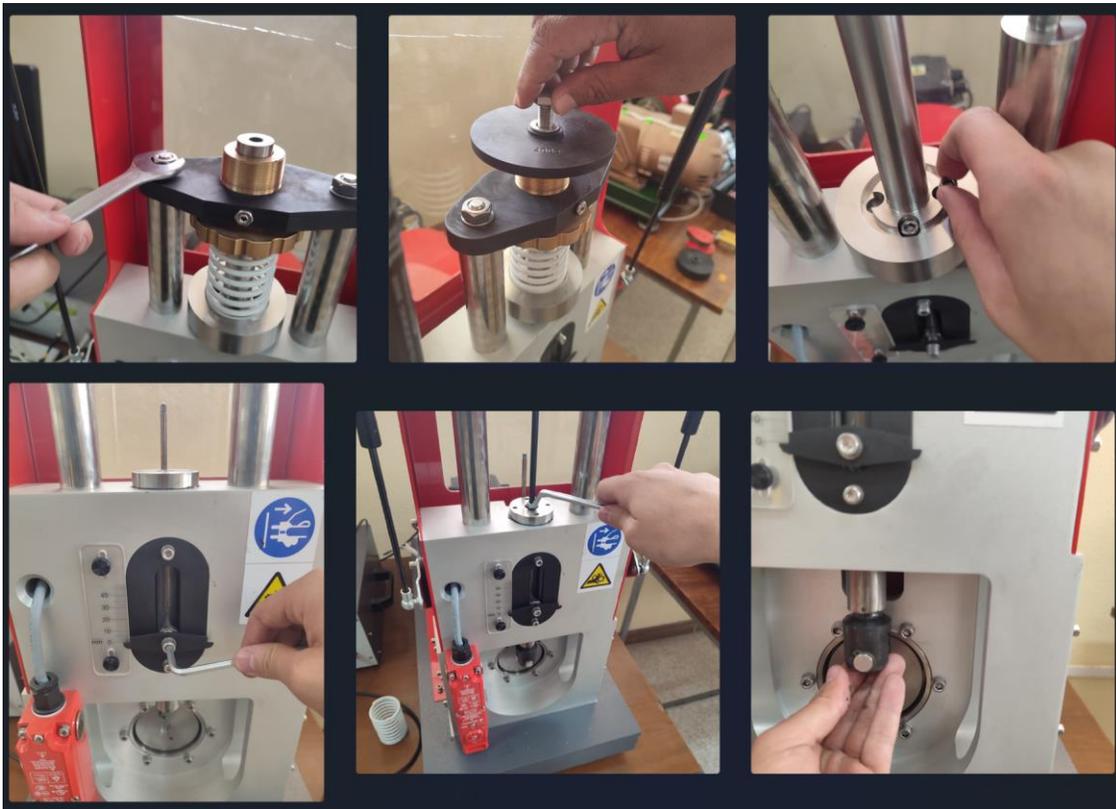
De acuerdo a los datos obtenidos y al ajuste de los puntos encontrados de acuerdo a la toma de datos, se procedió a determinar la ecuación que se ajusta más a los puntos de la curva, teniendo como resultado que la constante del resorte azul es de 1310 [N/m] corroborando la información que se tiene en el manual de usuario del equipo TM1021 – CAM ANALYSIS MACHINE MAIN UNIT.

Vástago del seguidor

Para sacar como parámetro inercial el vástago del seguidor se procedió a sacar el vástago del equipo, teniendo precaución al sacar y desarmar los elementos que sujetan al vástago, tal como se puede observar en las siguientes imágenes, como primeras partes se sacó la base de la precarga y pernos que sostienen al resorte.

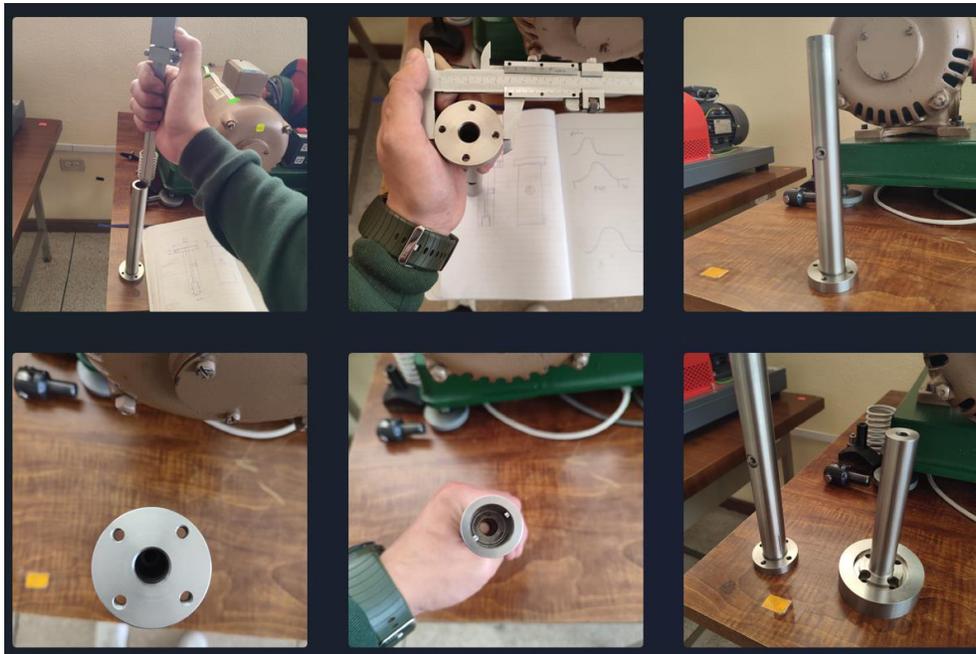
Figura 8

Desarmado de vástago del equipo



Nota: en la figura se puede evidenciar los pasos para poder desarmar el vástago del equipo de levas, dado que fue necesario para poder realizar los cálculos y determinar la constante propia del mismo.

Una vez desarmado el vástago con la ayuda de un pie de rey, un flexómetro y otros instrumentos de medición procedemos a determinar las dimensiones del vástago, considerando la precisión de cada medida que corresponde a 0.01 mm, todas estas medidas nos servirán de buena manera para poder encontrar el valor de la constante del vástago y aplicar este valor en el análisis de resultados para la leva polinomial 45678, el ajuste con la leva polidínica y la realización de la leva de la serie de Fourier.

Figura 9*Toma de medidas del vástago*

Nota: de esta forma se sacaron las dimensiones del vástago, considerando los agujeros internos para calcular la masa del vástago.

Al culminar con la toma de datos del vástago, se procede a volverlo a ensamblar el vástago al equipo de levas, colocando con grasa al vástago para evitar desgaste y daño de este a largo plazo y volviendo a colocar los elementos tal como se encontraban armados.

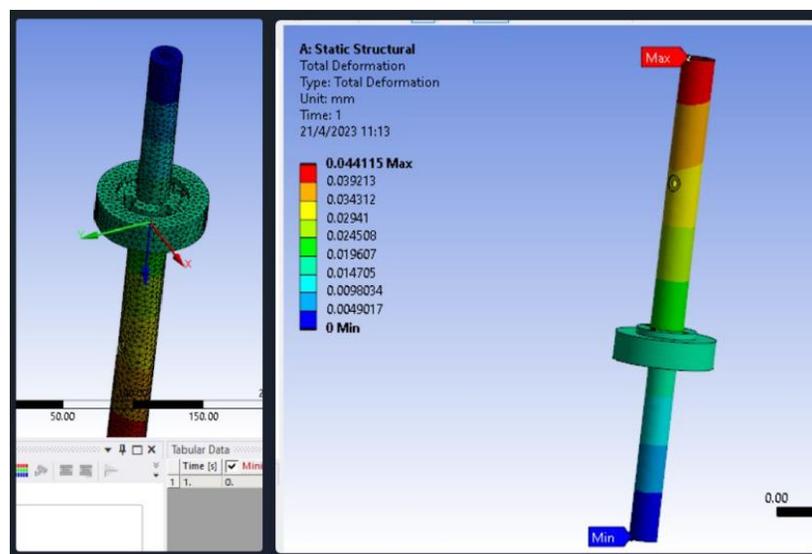
Figura 10*Armado del vástago*

Nota: engrasamos el vástago para proceder armar y comprobar el funcionamiento correcto del mismo.

Para determinar la constante del vástago realizamos el modelamiento en SolidWorks y aplicamos una carga de 10 kN obteniendo una deformación de aproximadamente 0.044 mm, con todo esto podemos determinar que la constante del vástago es de 2.2×10^8 [N/m], con esta constante aplicaremos a los cálculos para la determinación de los perfiles de levas para polinomio 45678, polidínica y la leva de la serie de Fourier.

Figura 11

Constante del vástago



Nota: con el dimensionamiento del vástago y todos los datos, se diseña el vástago en un software y al realizar el análisis del mismo se obtiene el esfuerzo máximo y admisible del vástago.

Análisis y diseño de la leva polinomial

El movimiento polinomial de superior al cuarto orden funciona bien para levas que están sometidas a altas velocidades porque la sacudida en sus puntos inicial y final es finita, en otras palabras, quiere decir que inicia en cero y culmina el movimiento en cero (Carlos Miranda, 2003). El movimiento polinomial superior a cuarto orden funciona bien antes o después de cualquier otro tipo de movimiento, ya que su velocidad y aceleración pueden tener cualquier valor dependiendo de los parámetros a los cuales se los está ajustando. (Rider, 2015)

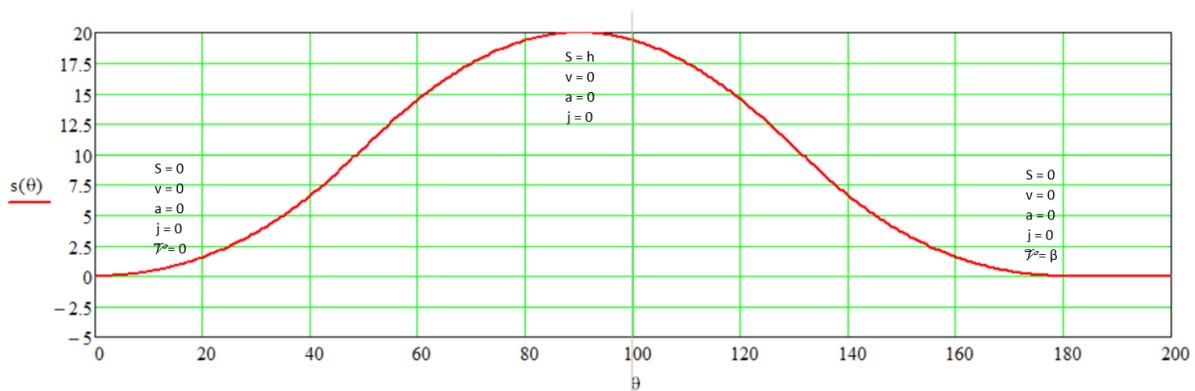
La principal ventaja de las levas polinomiales es que se pueden adaptar a cualquier requerimiento de desplazamiento, velocidad, aceleración y sobre aceleración, donde no se toma en cuenta la velocidad angular a la que va estar funcionando la leva.

$$s(\theta) = C_0 + C_1 \left[\frac{\theta}{\beta} \right] + C_2 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^2 + C_3 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^3 + C_4 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^4 + C_5 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^5 + C_6 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^6 \quad [1]$$

El grado del polinomio depende de las condiciones de frontera que existen en el recorrido de una leva, en este caso para el análisis que vamos a realizar se tendrá un total de ocho condiciones de subida y ocho condiciones de bajada.

Figura 12

Condiciones de frontera



Nota: figura de posición de la leva polinomial, con sus respectivos límites de frontera.

Donde:

- s: posición
- v: velocidad
- a: Aceleración
- j: sobre aceleración

Al tener ocho condiciones, como resultante vamos a tener un polinomio de grado siete:

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

Ecuación de la velocidad, a partir de la ecuación de la posición [2]

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

Ecuación de la aceleración, a partir de la ecuación de la velocidad [3]

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

Ecuación de la sobre aceleración, a partir de la ecuación de la aceleración [4]

$$j(\theta) = \frac{1}{\beta^3} \left[6 C_3 + 24 C_4 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^1 + 60 C_5 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^2 + 120 C_6 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^3 + 210 C_7 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^4 \right] \quad [5]$$

Evaluando las condiciones de frontera en las ecuaciones [2], [3], [4] y [5] ya antes mencionadas y se obtendrá como resultado:

Para $\theta = 0$

$$C_0 = 0 \quad C_1 = 0 \quad C_2 = 0 \quad C_3 = 0$$

Para $\theta = \beta$

$$h = C_4 + C_5 + C_6 + C_7$$

$$0 = \frac{1}{\beta} [4 C_4 + 5 C_5 + 6 C_6 + 7 C_7]$$

$$0 = \frac{1}{\beta^2} [12 C_4 + 20 C_5 + 30 C_6 + 42 C_7]$$

$$0 = \frac{1}{\beta^3} [24 C_4 + 60 C_5 + 120 C_6 + 210 C_7]$$

Como resultado tenemos un sistema de ecuaciones de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, procediendo a resolver dicho sistema de ecuaciones tenemos:

$$C_4 = 35h \quad C_5 = -84h \quad C_6 = 70h \quad C_7 = -20h$$

Y por consiguiente se tiene como ecuación resultante:

$$s(\theta) = h \left[256 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^4 - 1024 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^5 + 1536 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^6 - 1024 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^7 + 256 \left[\frac{\theta}{\beta} \right]^8 \right]$$

(Olmedo & Echeverría, 2018)

Se debe considerar que para la realización de la leva polinomial 4567 primero se tomarán en cuenta los parámetros de la leva convexa B propia del equipo TM1021 – CAM ANALYSIS MACHINE MAIN UNIT para ajustar las curvas de esta leva con la leva polinomial 4567 que se fabricará, de donde tenemos los siguientes parámetros:

$$\theta := 0,0.5 \dots 360$$

$$\begin{aligned} \beta_1 &:= 48.44 & \beta_2 &:= 180 - 2 * \beta_1 & \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 &= 180 & \beta &:= 180 \\ rf &:= 12.5 & rn &:= 25 & R &:= 30 & dc &:= 25 & \rho &:= 92 & h &:= 20 \\ nx &:= \frac{\rho + rf}{\rho - R} & nc &:= \frac{rf + rn}{dc} \end{aligned}$$

Como se procede a una comparativa con la leva convexa B que se mencionó anteriormente, tenemos que obtener las ecuaciones que representan la posición de la leva, de donde tenemos los siguiente:

$$\begin{aligned} s1(\theta) &:= (\rho - R) * \left(\sqrt{\cos\left(\theta * \frac{\pi}{180}\right)^2 - 1 + nx^2} - \cos\left(\theta * \frac{\pi}{180}\right) - \frac{R + rf}{\rho - R} \right) \\ s2(\theta) &:= dc * \left(\cos\left(\left(\theta - \beta_1 - \frac{\beta_2}{2}\right) * \frac{\pi}{180}\right) + \sqrt{nc^2 - \sin\left(\left(\theta - \beta_1 - \frac{\beta_2}{2}\right) * \frac{\pi}{180}\right)^2} \right) - (R + rf) \\ s3(\theta) &:= (\rho - R) * \left(\sqrt{\cos\left(\left(\theta - 2 * \beta_1 - \beta_2\right) * \frac{\pi}{180}\right)^2 - 1 + nx^2} - \cos\left(\left(\theta - 2 * \beta_1 - \beta_2\right) * \frac{\pi}{180}\right) - \frac{R + rf}{\rho - R} \right) \\ s4(\theta) &:= 0 \end{aligned}$$

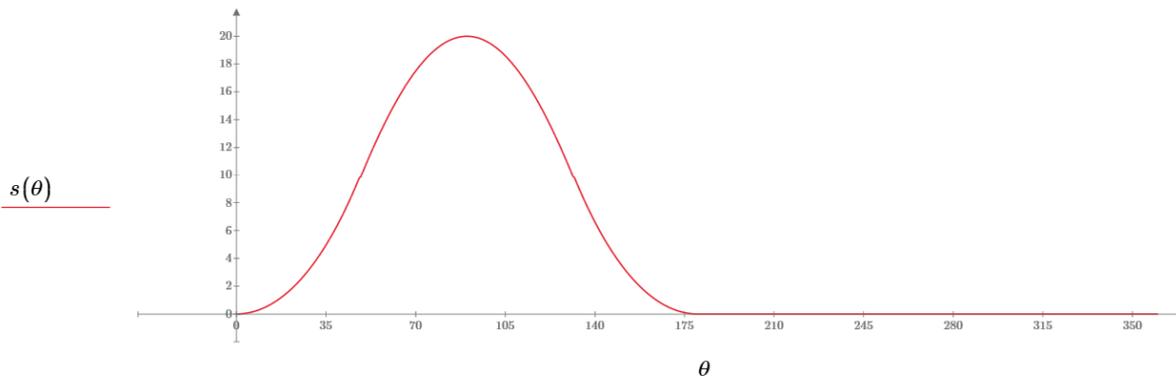
Condicionando las ecuaciones de posición s que se encuentra descrito en la parte superior, se procede a determinar las condiciones en base a los ángulos de la geometría de la leva, representándolo de la siguiente manera:

$$s(\theta) := \begin{cases} s1(\theta) & \text{if } \theta \leq \beta_1 \\ s2(\theta) & \text{if } \beta_1 \leq \theta \leq \beta_1 + \beta_2 \\ s3(\theta) & \text{if } \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 2 * \beta_1 + \beta_2 \\ s4(\theta) & \text{if } 2 * \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Para comprobación de la curva de la leva convexa tipo B tenemos que hacer una gráfica de posición versus desplazamiento, donde el desplazamiento se encuentra entre 0 grados hasta los 360.

Figura 13

Posición de la leva convexa tipo B



Nota: figura de posición de la leva convexa tipo B, que va desde los 0 grados hasta los 360.

Como podemos observar en la figura que representa la posición versus el desplazamiento el punto más alto de la curva se da a los 90 grados y llega hasta los 20 mm de altura, la curva llega hasta los 180 grados, pasado esta cantidad de grados la curva tiende a ser cero, lo cual se recalca que la curva que se obtuvo corresponde plenamente a la leva convexa tipo B.

Considerando la ecuación [6] que corresponde a la leva polinomial 4567 se procedió a realizar lo mismo que se hizo con la leva convexa tipo B, para posteriormente comparar las gráficas de posición de la leva convexa tipo B y de la leva polinomial.

$$s1p(\theta) := h * \left[256 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^4 - 1024 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^5 + 1536 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^6 - 1024 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^7 + 256 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^8 \right]$$

$$s2p(\theta) := 0$$

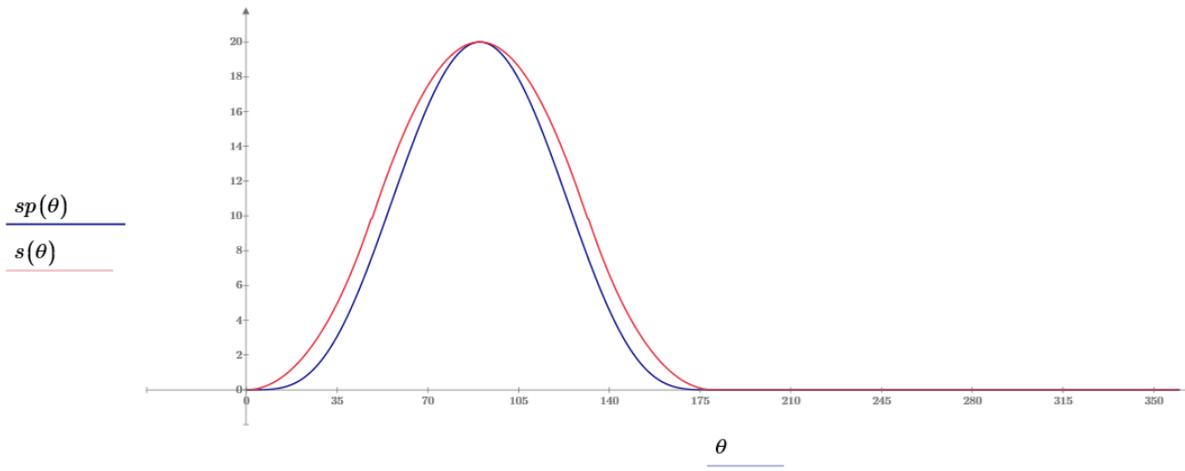
De igual manera se procede a implementar las condiciones para observar la gráfica de posición de la leva polinomial 4567.

$$sp(\theta) := \begin{cases} s1p(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ s2p(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Realizando las gráficas de posición versus desplazamiento de la leva convexa tipo B y de la leva polinomial 4567 vamos a encontrar lo siguiente:

Figura 14

Posición de la leva polinomial 45678 VS leva convexa tipo B



Nota: figura de posición de la leva polinomial 45678 VS la leva convexa tipo B que va desde los 0 grados hasta los 360, la leva polinomial trata de ajustarse a la leva convexa.

Como se puede observar en la gráfica de posición versus desplazamiento, la leva convexa tipo B se encuentra graficada con color rojo, mientras que la leva polinomial se encuentra representada con color azul, llegando a observar que la gráfica de la leva polinomial se acerca mucho a la de la leva convexa, de donde podemos establecer que los parámetros que se encuentran para la realización de esta leva polinomial se encuentran bien establecidos, dado que el objetivo es ajustar la leva polinomial lo máximo que se pueda con respecto a la leva convexa.

Para el análisis de velocidad para la leva convexa se tiene que derivar las ecuaciones de posición s con respecto al ángulo, de tal manera tenemos las siguientes ecuaciones que representan a la velocidad de la leva convexa.

$$v1(\theta) := -(R - \rho) * \left(\frac{\pi * \sin\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)}{180} - \frac{\pi * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right) * \sin\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)}{180 * \sqrt{nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 - 1}} \right)$$

$$v2(\theta) := dc * \left(\frac{\pi * \sin\left(\frac{\pi\left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)}{180}\right)}{180} + \frac{\pi * \cos\left(\frac{\pi\left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)}{180}\right) * \sin\left(\frac{\pi\left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)}{180}\right)}{180 * \sqrt{nc^2 - \sin\left(\frac{\pi}{180} * \left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)\right)^2}} \right)$$

$$v3(\theta) := (R - \rho) * \left(\frac{\pi * \sin\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)}{180} - \frac{\pi * \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right) * \sin\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)}{180 * \sqrt{nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 - 1}} \right)$$

$$v4(\theta) := 0$$

Implementando las limitaciones para cada función que representa la velocidad de la leva convexa, lo encontraremos de la siguiente manera:

$$v(\theta) := \begin{cases} v1(\theta) & \text{if } \theta \leq \beta_1 \\ v2(\theta) & \text{if } \beta_1 \leq \theta \leq \beta_1 + \beta_2 \\ v3(\theta) & \text{if } \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 2 * \beta_1 + \beta_2 \\ v4(\theta) & \text{if } 2 * \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

De igual manera realizaremos la misma derivación con la ecuación de la posición de la leva polinomial 4567 y estableceremos las respectivas limitaciones.

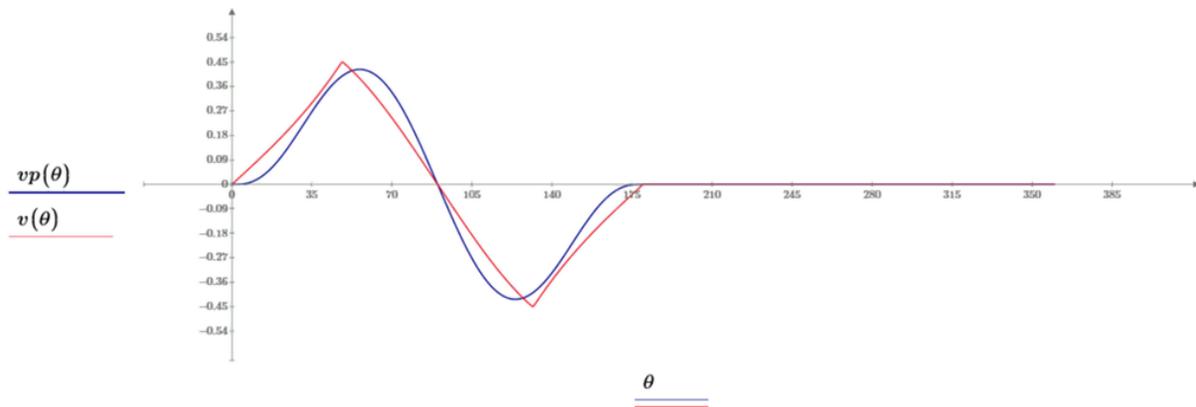
$$v1p(\theta) := h * \left[\frac{1024 * \theta^3}{\beta^4} - \frac{5120 * \theta^4}{\beta^5} + \frac{9216 * \theta^5}{\beta^6} - \frac{7168 * \theta^6}{\beta^7} + \frac{2048 * \theta^7}{\beta^8} \right]$$

$$v2p(\theta) := 0$$

$$vp(\theta) := \begin{cases} v1p(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ v2p(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Figura 15

Velocidad de la leva polinomial 45678 VS leva convexa tipo B



Nota: figura de velocidad de la leva polinomial 45678 VS la leva convexa tipo B, que va desde los 0 grados hasta los 360, la leva polinomial presenta un pequeño desplazamiento con respecto a la convexa.

Como se puede observar en la gráfica de velocidad versus desplazamiento determinamos que la gráfica de la leva polinomial 45678 que se encuentra con color azul se trata de ajustar muy cercana a la gráfica de la leva convexa de color roja, encontrándose ambas curvas en las limitaciones que se desea y por consiguiente ambas curvas al llegar a los 90 grados tienden a cero para posteriormente tener una curva decreciente hasta llegar a los 180 grados y posterior a esto mantenerse en cero.

Para la obtención de la aceleración se realiza una segunda derivación de la posición con respecto al desplazamiento, de tal manera vamos a tener lo siguiente:

$$a1(\theta) := -(R - \rho) * \left(\frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)}{32400} - \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nx^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 - 1}} + \frac{\pi^2 * \sin\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nx^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 - 1}} - \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 * \sin\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2}{32400 * \left(nx^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 - 1\right)^{3/2}} \right)$$

$$\begin{aligned}
a2(\theta) := & -dc * \left(\frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)}{32400} + \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nc^2 - \sin\left(\frac{\pi}{180} * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})\right)^2}} \right. \\
& - \frac{\pi^2 * \sin\left(\frac{\pi * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nc^2 - \sin\left(\frac{\pi}{180} * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})\right)^2}} + \frac{\pi^2 * \sin\left(\frac{\pi * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)^2 * \cos\left(\frac{\pi * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)^2}{32400 * \left(nc^2 - \sin\left(\frac{\pi * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)^2\right)^{3/2}} \left. \right) \\
a3(\theta) := & -(R - \rho) * \left(\frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)}{32400} - \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 - 1}} \right. \\
& + \frac{\pi^2 * \sin\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 - 1}} \\
& \left. - \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 * \sin\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2}{32400 * \left(nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 - 1\right)^{3/2}} \right) \\
a4(\theta) := & 0
\end{aligned}$$

Implementando las limitaciones para cada función que representa la velocidad de la leva convexa, lo encontraremos de la siguiente manera:

$$a(\theta) := \begin{cases} a1(\theta) & \text{if } \theta \leq \beta_1 \\ a2(\theta) & \text{if } \beta_1 \leq \theta \leq \beta_1 + \beta_2 \\ a3(\theta) & \text{if } \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 2 * \beta_1 + \beta_2 \\ a4(\theta) & \text{if } 2 * \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

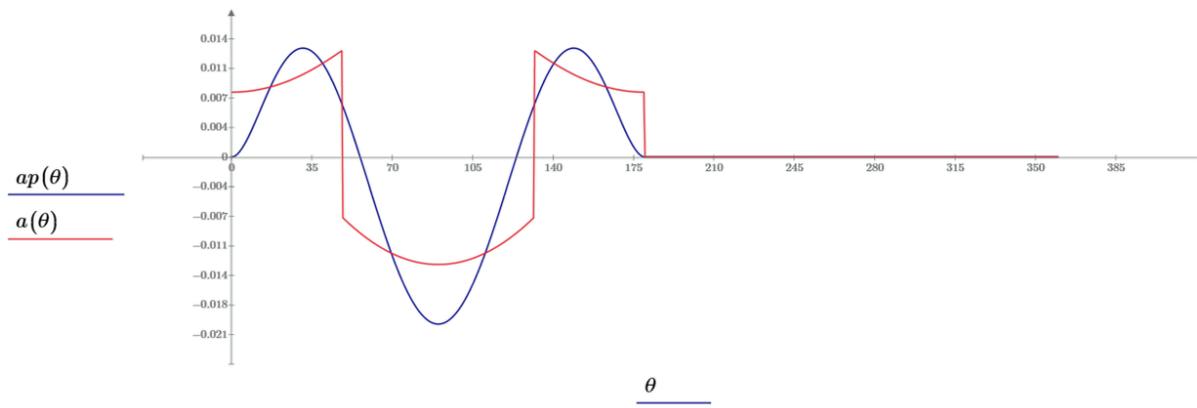
De igual manera realizaremos la misma derivación con la ecuación de la posición de la leva polinomial 4567 y estableceremos las respectivas limitaciones.

$$\begin{aligned}
a1p(\theta) := & h * \left[\frac{3072 * \theta^2}{\beta^4} - \frac{20480 * \theta^3}{\beta^5} + \frac{46080 * \theta^4}{\beta^6} - \frac{43008 * \theta^5}{\beta^7} + \frac{14336 * \theta^6}{\beta^8} \right] \\
a2p(\theta) := & 0
\end{aligned}$$

$$ap(\theta) := \begin{cases} a1p(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ a2p(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Figura 16

Aceleración de la leva polinomial 45678 VS leva convexa tipo B



Nota: figura de la aceleración de la leva polinomial 4567 que va desde los 0 grados hasta los 180 grados, posterior a esto tiende a cero, existe un poco de sobresalto de la leva polinomial con respecto a la leva convexa.

En la gráfica de aceleración ambas curvas se ajustan, la curva de la leva polinomial 45678 tiene una cantidad poco considerable de desaceleración con respecto a la leva convexa, la variación de esta desaceleración no es tan considerable para tener inconvenientes con respecto al análisis para obtener el perfil de leva.

Como se pudo observar en las gráficas anteriores de posición, velocidad y aceleración con la respectiva comparación entre la leva convexa tipo B y la leva polinomial 4567 ambas curvas se ajustan perfectamente de acuerdo a los parámetros que se han estado estableciendo, en donde podemos asegurar teóricamente que la leva polinomial 4567 será mejor que la leva convexa, conjunto con este análisis se considera necesario realizar una verificación del sobresalto que existe en la leva polinomial, para esto se debe realizar la tercera derivada de la ecuación de posición de la leva polinomial.

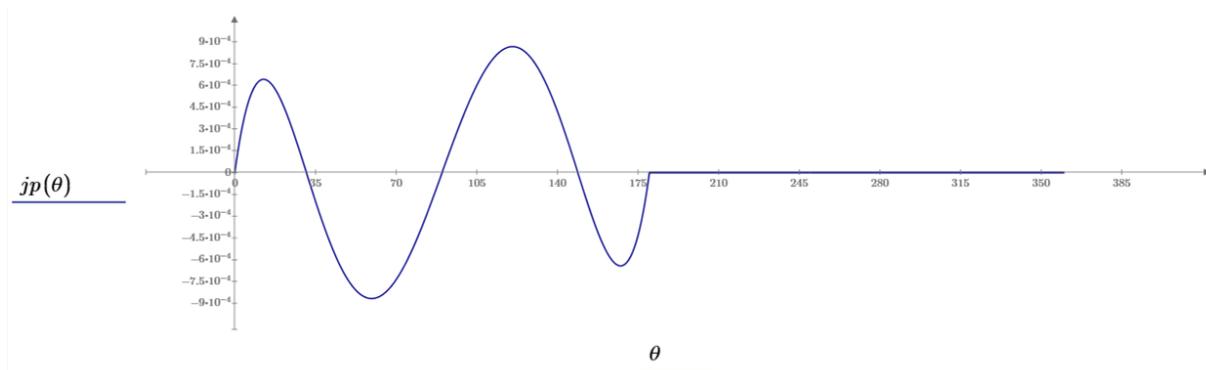
$$j1p(\theta) := h * \left[\frac{6144 * \theta}{\beta^4} - \frac{61440 * \theta^2}{\beta^5} + \frac{184320 * \theta^3}{\beta^6} - \frac{215040 * \theta^4}{\beta^7} + \frac{86016 * \theta^5}{\beta^8} \right]$$

$$j2p(\theta) := 0$$

$$jp(\theta) := \begin{cases} j1p(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ j2p(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Figura 17

Sobre aceleración de la leva polinomial 45678



Nota: figura de la sobre aceleración de la leva polinomial, esto hace referencia al observar que tan rápido existe la aceleración de la leva cada cierto ángulo, a partir de los 180 grados ya no existe aceleración y por ende no existiría sobre aceleración.

Con la gráfica de sobre aceleración para la leva polinomial 45678 se puede evidenciar que en los 60 y 120 grados son los puntos donde más sobre aceleración se va a tener en la leva, sin embargo, pese a esto la leva sigue siendo mejor que la leva convexa con la que se está realizando comparaciones donde la sobre aceleración será menor con respecto a la leva convexa tipo B, de igual manera podemos calcular el ángulo de presión y radio de curvatura para determinar si el perfil de leva que estamos encontrando del polinomio 4567 se ajustan a los requerimientos de la leva convexa tipo B.

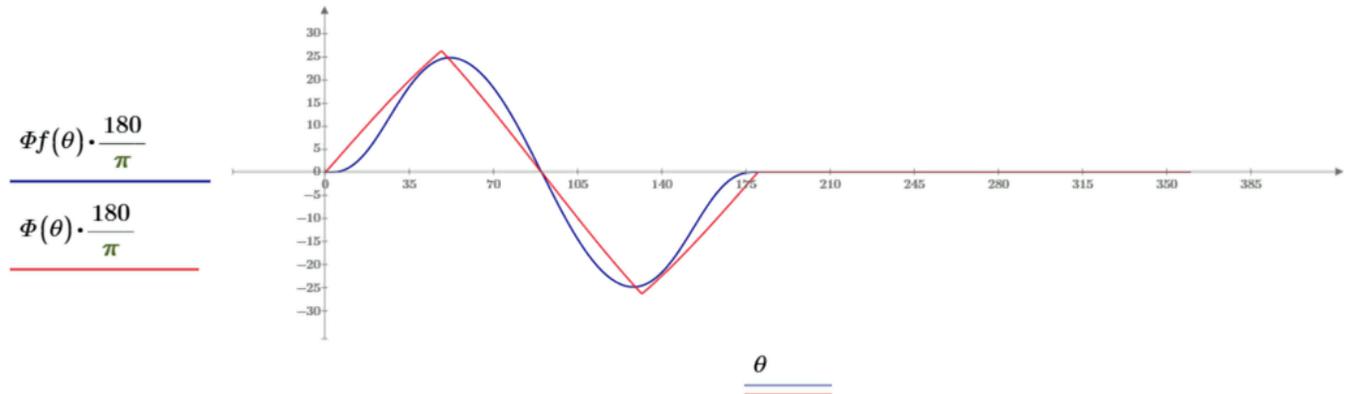
$$Rp := R + rf \quad \varepsilon := 0$$

$$\phi(\theta) := \operatorname{atan}\left(\frac{v(\theta) * \frac{180}{\pi} - \varepsilon}{s(\theta) + \sqrt{Rp^2 - \varepsilon^2}}\right)$$

$$\phi f(\theta) := \operatorname{atan}\left(\frac{vp(\theta) * \frac{180}{\pi} - \varepsilon}{sp(\theta) + \sqrt{Rp^2 - \varepsilon^2}}\right)$$

Figura 18

Ángulo de presión de la leva polinomial 45678 VS la leva convexa tipo B



Nota: la máxima amplitud del ángulo de presión llega a 25 grados, lo cual nos quiere decir que es una leva polinomial 45678 idónea, dado que el máximo permitido por la leva es de 30 grados.

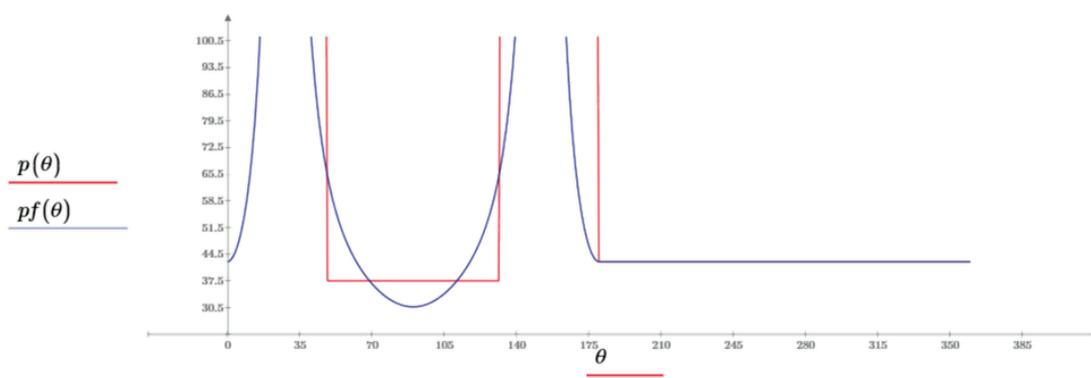
Con la gráfica del ángulo de presión se observa que no llegan a 30, lo cual es lo que se estaba buscando en la fabricación del perfil de la leva para que no exista puntos de despegue tan considerables que puedan afectar a la leva o al rodillo del seguidor cuando entren en contacto entre sí, con esto podemos pasar a realizar la comparativa del radio de curvatura donde se tiene lo siguiente:

$$\rho(\theta) := \frac{\left((Rp + s(\theta))^2 + \left(v(\theta) * \frac{180}{\pi} \right)^2 \right)^{3/2}}{(Rp + s(\theta))^2 + 2 * \left(v(\theta) * \frac{180}{\pi} \right)^2 - a(\theta) * \left(\frac{180}{\pi} \right)^2 * (Rp + s(\theta))}$$

$$\rho f(\theta) := \frac{\left((Rp + sp(\theta))^2 + \left(vp(\theta) * \frac{180}{\pi} \right)^2 \right)^{3/2}}{(Rp + sp(\theta))^2 + 2 * \left(vp(\theta) * \frac{180}{\pi} \right)^2 - ap(\theta) * \left(\frac{180}{\pi} \right)^2 * (Rp + sp(\theta))}$$

Figura 19

Radio de curvatura de la leva polinomial 45678 VS leva convexa tipo B

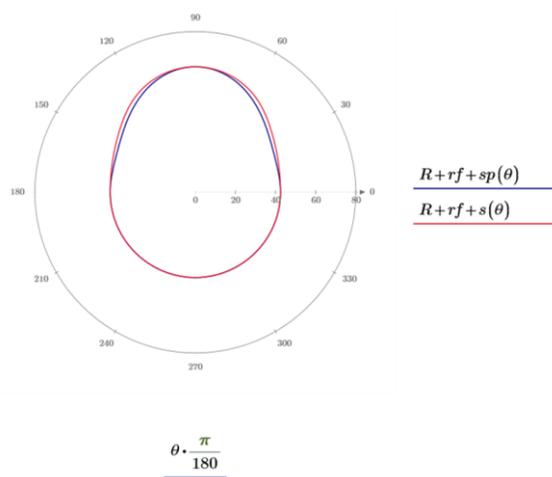


Nota: el radio de curvatura de la leva polinomial 45678 se suaviza más con respecto a la leva convexa tipo B, de esta manera se puede afirmar que la leva polinomial 45678 no tendrá un golpeteo considerable.

Con la gráfica de radio de curvatura se puede evidenciar que las sobre aceleraciones y despegues que se tendría en la leva cumple con los parámetros que se tomó en consideración con respecto a la leva convexa tipo B, con todas estas consideraciones ya se puede realizar la obtención del perfil de la leva polinomial 4567, teniendo lo siguiente:

Figura 20

Perfil de la leva polinomial 45678



Nota: en la figura se presenta el perfil de la leva polinomial 45678, de acuerdo a los parámetros ajustados.

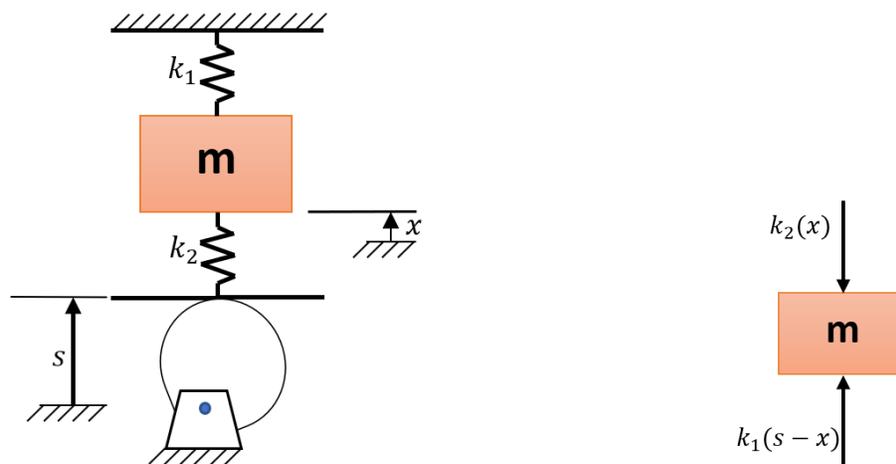
El perfil de la leva convexa tipo B se encuentra con una línea de color roja, mientras que el perfil de la leva polinomial 4567 se encuentra con color azul, como se observa la leva polinomial tiene dimensiones un poco menores en comparación de la leva convexa, sin embargo, sustentándonos en los cálculos realizados previamente, podemos asegurar que la leva polinomial con esas dimensiones tiene un comportamiento mejor que la leva convexa, esto se lo demostrará en el capítulo que corresponde a los ensayos experimentales.

Análisis y diseño de la leva polidínica

Para interpretar de mejor manera lo que es la leva polidínica, es necesario utilizar un diagrama de cuerpo libre que englobe a todo el sistema, de donde se tendrá que despejar la variable “s” que corresponde al comportamiento del perfil de la leva, teniendo como resultado lo siguiente:

Figura 21

Diagrama de cuerpo libre



Nota: Diagrama de cuerpo libre para la obtención de la posición del perfil de la leva.

$$m\ddot{x} = k_1(s - x) - k_2x$$

$$m\ddot{x} = k_1s - (k_1 + k_2)x$$

$$s = \frac{m\ddot{x} + (k_1 + k_2)x}{k_1}$$

El término polidínica es una contracción de “Polinomio” y “Dinámico”, fue adoptado por Thoren

Engemann y Stoddart en 1953 (Sclater, 2011), este término fue implementado con la finalidad de encontrar el perfil de la leva utilizando un modelo dinámico de un sistema de seguidor de leva, donde se compense la vibración dinámica del seguidor. (Norton, 2009) Las levas polidínica se aplican cuando se espera que la velocidad se mantenga constante como es el caso de la mayoría de maquinaria industrial

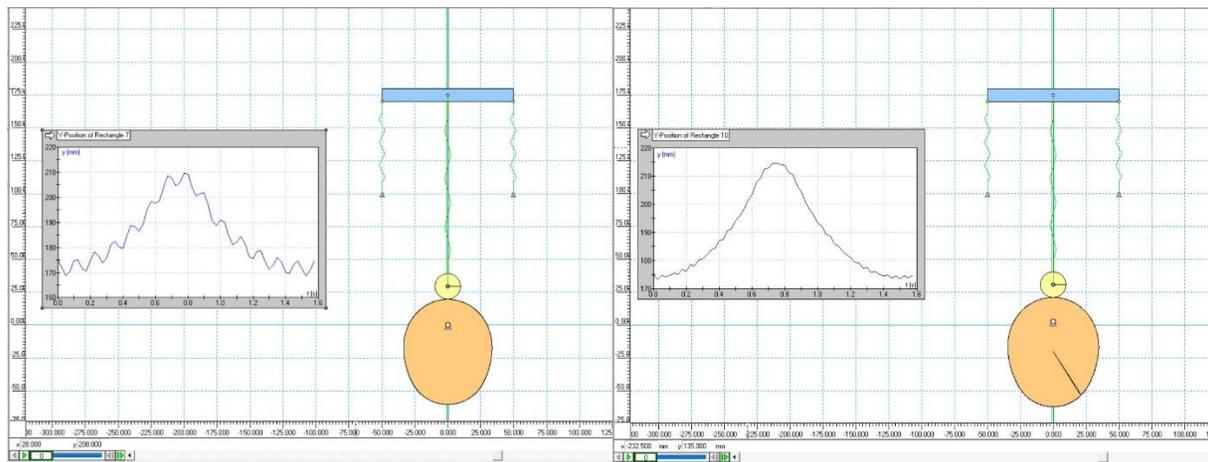
En las levas polidínica, el perfil de la leva está diseñado de tal manera que la curva de elevación del seguidor coincida con una ecuación polinomial seleccionada a la velocidad de diseño deseada, dadas las características dinámicas del sistema leva-seguidor (JJ, 2013). Los trenes de engranajes de válvulas de automóviles y los miembros de máquinas textiles son excelentes ejemplos de buenas aplicaciones polidínica. (Erdman & Sandor, 1998) El método polidino fue presentado originalmente por Dudley (1948) y elaborado por Stoddart (1953). Este es el primer método que diseña la forma de la leva para dar la acción de seguidor deseada. Las ventajas básicas de la leva polidínica son:

- Por medios directos puede eliminar el salto del seguidor fuera de la leva.
- Por cálculo directo proporciona control de la posición exacta del extremo del seguidor.
- Limita las vibraciones a amplitudes mínimas a la velocidad de diseño.
- Reducción del ruido de hasta 5 dB.

(Myszka, 2012b)

Figura 22

Diferencia entre leva polinomial y polidínica



Nota: Gráfica sobre comportamiento vibracional de leva polinomial y la leva polidínica.

La primera figura corresponde al comportamiento vibracional de la leva polinomial 45678, mientras que la segunda figura corresponde al comportamiento vibracional de la leva polidínica, como se puede observar en la figura, la leva polidínica tiene un mejor comportamiento referente a la vibración con respecto a la leva polinomial, lo cual hace que la leva polidínica sea más eficiente y controle de mejor manera este parámetro.

Se debe considerar que para la realización de la leva polidínica 45678 primero se tomarán en cuenta los parámetros de la leva convexa B propia del equipo TM1021 – CAM ANALYSIS MACHINE MAIN UNIT, de donde tenemos los siguientes parámetros:

$$\theta := 0,0.5 \dots 360$$

$$\beta_1 := 48.44 \quad \beta_2 := 180 - 2 * \beta_1 \quad \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 180 \quad \beta := 270$$

$$rf := 12.5 \quad rn := 25 \quad R := 30 \quad dc := 25 \quad \rho := 92 \quad h := 20$$

$$nx := \frac{\rho + rf}{\rho - R} \quad nc := \frac{rf + rn}{dc}$$

Como se procede a una comparativa con la leva convexa B que se mencionó anteriormente, tenemos que obtener las ecuaciones que representan la posición de la leva, de donde tenemos los siguiente:

$$s1(\theta) := (\rho - R) * \left(\sqrt{\cos\left(\theta * \frac{\pi}{180}\right)^2 - 1 + nx^2} - \cos\left(\theta * \frac{\pi}{180}\right) - \frac{R + rf}{\rho - R} \right)$$

$$s2(\theta) := dc * \left(\cos\left(\left(\theta - \beta_1 - \frac{\beta_2}{2}\right) * \frac{\pi}{180}\right) + \sqrt{nc^2 - \sin\left(\left(\theta - \beta_1 - \frac{\beta_2}{2}\right) * \frac{\pi}{180}\right)^2} \right) - (R + rf)$$

$$s3(\theta) := (\rho - R) * \left(\sqrt{\cos\left(\left(\theta - 2 * \beta_1 - \beta_2\right) * \frac{\pi}{180}\right)^2 - 1 + nx^2} - \cos\left(\left(\theta - 2 * \beta_1 - \beta_2\right) * \frac{\pi}{180}\right) - \frac{R + rf}{\rho - R} \right)$$

$$s4(\theta) := 0$$

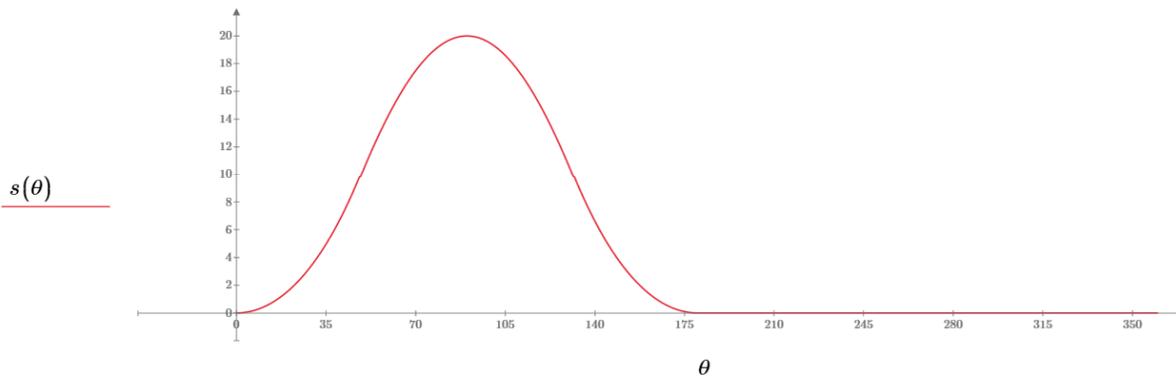
Condicionando las ecuaciones de posición s que se encuentra descrito en la parte superior, se procede a determinar las condiciones en base a los ángulos de la geometría de la leva, representándolo de la siguiente manera:

$$s(\theta) := \begin{cases} s1(\theta) & \text{if } \theta \leq \beta_1 \\ s2(\theta) & \text{if } \beta_1 \leq \theta \leq \beta_1 + \beta_2 \\ s3(\theta) & \text{if } \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 2 * \beta_1 + \beta_2 \\ s4(\theta) & \text{if } 2 * \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Para comprobación de la curva de la leva convexa tipo B tenemos que hacer una gráfica de posición versus desplazamiento, donde el desplazamiento se encuentra entre 0 grados hasta los 360.

Figura 23

Posición de la leva convexa tipo B



Nota: se presenta el comportamiento de la ecuación de posición de la leva convexa tipo B, donde a partir de 180 grados su comportamiento tiende a cero.

Como podemos observar en la figura que representa la posición versus el desplazamiento el punto más alto de la curva se da a los 90 grados y llega hasta los 20 mm de altura, la curva llega hasta los 180 grados, pasado esta cantidad de grados la curva tiende a ser cero, lo cual se recalca que la curva que se obtuvo corresponde plenamente a la leva convexa tipo B.

Considerando la ecuación [6] que corresponde a la leva polidínica 45678 se procedió a realizar lo mismo que se hizo con la leva convexa tipo B, para posteriormente comparar las gráficas de posición de la leva convexa tipo B y de la leva polidínica (To, 2017).

$$s1p(\theta) := h * \left[256 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^4 - 1024 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^5 + 1536 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^6 - 1024 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^7 + 256 * \left(\frac{\theta}{\beta}\right)^8 \right]$$

$$s2p(\theta) := 0$$

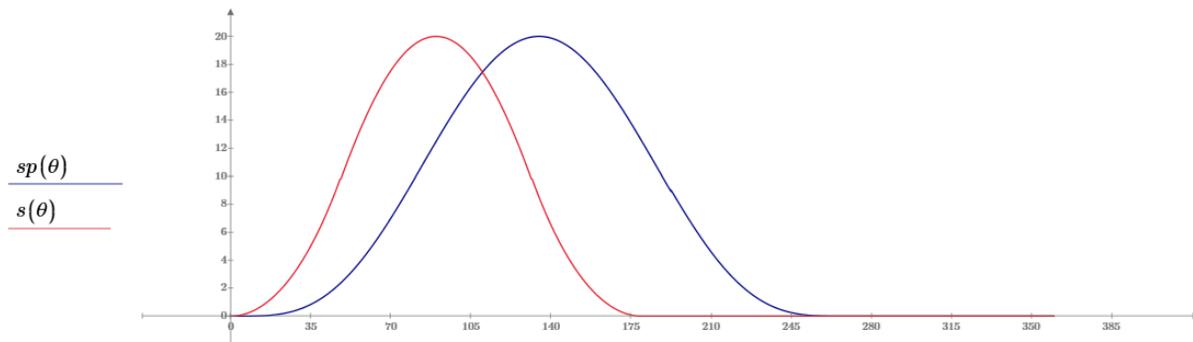
De igual manera se procede a implementar las condiciones para observar la gráfica de posición de la leva polidínica 45678.

$$sp(\theta) := \begin{cases} s1p(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ s2p(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Realizando las gráficas de posición versus desplazamiento de la leva convexa tipo B y de la leva polidínica ajustada a los nuevos parámetros se tiene que:

Figura 24

Desplazamiento de la leva polidínica VS leva convexa tipo B



Nota: figura de posición de la leva polidínica VS convexa tipo B, el desfase es mayor de la polidínica con respecto a la convexa.

Como se puede observar en la gráfica de posición versus desplazamiento, la leva convexa tipo B se encuentra graficada con color rojo, mientras que la leva polidínica se encuentra representada con color azul, llegando a observar que la gráfica de la leva polidínica se encuentra más desplazada en comparación de la leva convexa tipo B, lo que quiere decir que con esta leva polidínica se mejorará la eficiencia de la leva, donde el punto de despegue se obtenga a una revolución más alta con respecto de las levas fabricadas propias del laboratorio de mecanismo.

Para el análisis de velocidad para la leva convexa se tiene que derivar las ecuaciones de posición con respecto al ángulo, de tal manera tenemos las siguientes ecuaciones que representan a la velocidad de la leva convexa.

$$v1(\theta) := -(R - \rho) * \left(\frac{\pi * \sin\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)}{180} - \frac{\pi * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right) * \sin\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)}{180 * \sqrt{nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 - 1}} \right)$$

$$v2(\theta) := dc * \left(\frac{\pi * \sin\left(\frac{\pi\left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)}{180}\right)}{180} + \frac{\pi * \cos\left(\frac{\pi\left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)}{180}\right) * \sin\left(\frac{\pi\left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)}{180}\right)}{180 * \sqrt{nc^2 - \sin\left(\frac{\pi}{180} * \left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)\right)^2}} \right)$$

$$v3(\theta) := (R - \rho) * \left(\frac{\pi * \sin\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)}{180} - \frac{\pi * \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right) * \sin\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)}{180 * \sqrt{nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 - 1}} \right)$$

$$v4(\theta) := 0$$

Implementando las limitaciones para cada función que representa la velocidad de la leva convexa, lo encontraremos de la siguiente manera:

$$v(\theta) := \begin{cases} v1(\theta) & \text{if } \theta \leq \beta_1 \\ v2(\theta) & \text{if } \beta_1 \leq \theta \leq \beta_1 + \beta_2 \\ v3(\theta) & \text{if } \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 2 * \beta_1 + \beta_2 \\ v4(\theta) & \text{if } 2 * \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

De igual manera realizaremos la misma derivación con la ecuación de la posición de la leva polidínica 45678 y estableceremos las respectivas limitaciones.

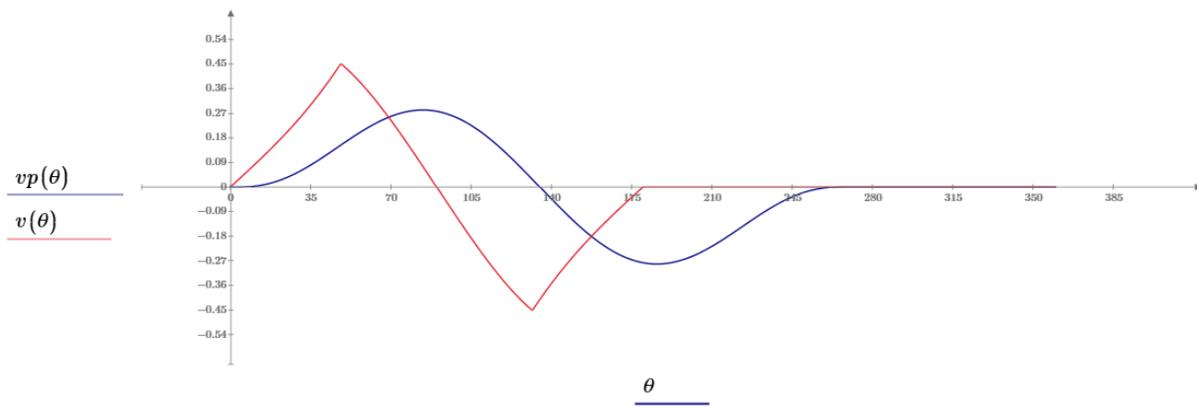
$$v1p(\theta) := h * \left[\frac{1024 * \theta^3}{\beta^4} - \frac{5120 * \theta^4}{\beta^5} + \frac{9216 * \theta^5}{\beta^6} - \frac{7168 * \theta^6}{\beta^7} + \frac{2048 * \theta^7}{\beta^8} \right]$$

$$v2p(\theta) := 0$$

$$vp(\theta) := \begin{cases} v1p(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ v2p(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Figura 25

Velocidad de la leva polidínica VS leva convexa tipo B



Nota: figura de velocidad de la leva polidínica, donde se ajusta de mejor manera haciendo que a los 270 grados tienda a cero.

Como se puede observar en la gráfica de velocidad versus desplazamiento determinamos que la gráfica de la leva polidínica que se encuentra con color azul no se ajusta a la gráfica de la leva convexa de color roja, dado que el desplazamiento angular de la leva convexa tipo B es de 180 grados, mientras que la leva polidínica es de 270 grados, ajustándose de mejor manera a las condiciones de mejoramiento del equipo.

Para la obtención de la aceleración se realiza una segunda derivación de la posición con respecto al desplazamiento, de tal manera vamos a tener lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 a1(\theta) := & -(R - \rho) * \left(\frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)}{32400} - \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nx^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 - 1}} + \frac{\pi^2 * \sin\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nx^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 - 1}} \right. \\
 & \left. - \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 * \sin\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2}{32400 * \left(nx^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 - 1\right)^{3/2}} \right) \\
 a2(\theta) := & -dc * \left(\frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * \left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)}{180}\right)}{32400} + \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * \left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nc^2 - \sin\left(\frac{\pi}{180} * \left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)\right)^2}} \right. \\
 & \left. - \frac{\pi^2 * \sin\left(\frac{\pi * \left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nc^2 - \sin\left(\frac{\pi}{180} * \left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)\right)^2}} + \frac{\pi^2 * \sin\left(\frac{\pi * \left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)}{180}\right)^2 * \cos\left(\frac{\pi * \left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)}{180}\right)^2}{32400 * \left(nc^2 - \sin\left(\frac{\pi * \left(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2}\right)}{180}\right)\right)^{3/2}} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a3(\theta) := & -(R - \rho) * \left(\frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)}{32400} - \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 - 1}} \right. \\
& + \frac{\pi^2 * \sin\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 - 1}} \\
& \left. - \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 * \sin\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2}{32400 * \left(nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 - 1\right)^{3/2}} \right) \\
a4(\theta) := & 0
\end{aligned}$$

Implementando las limitaciones para cada función que representa la velocidad de la leva convexa, lo encontraremos de la siguiente manera:

$$a(\theta) := \begin{cases} a1(\theta) & \text{if } \theta \leq \beta_1 \\ a2(\theta) & \text{if } \beta_1 \leq \theta \leq \beta_1 + \beta_2 \\ a3(\theta) & \text{if } \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 2 * \beta_1 + \beta_2 \\ a4(\theta) & \text{if } 2 * \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

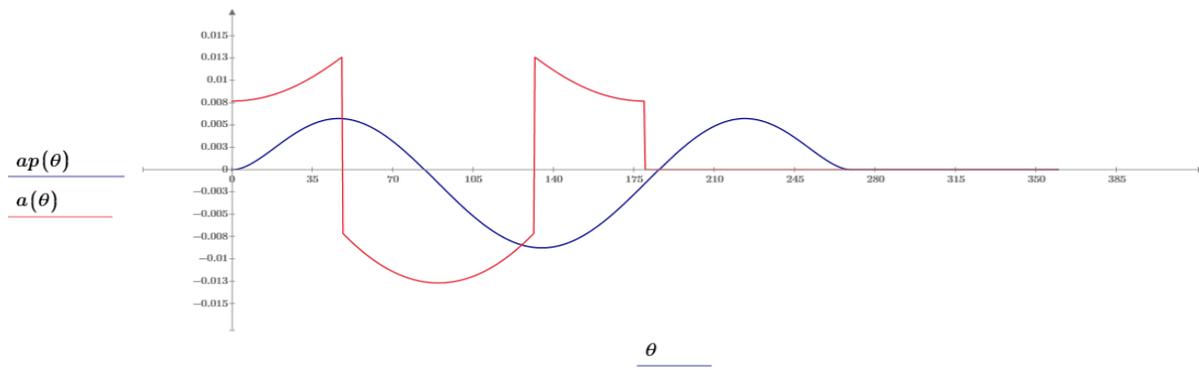
De igual manera realizaremos la misma derivación con la ecuación de la posición de la leva polidínica 45678 y estableceremos las respectivas limitaciones.

$$\begin{aligned}
a1p(\theta) := & h * \left[\frac{3072 * \theta^2}{\beta^4} - \frac{20480 * \theta^3}{\beta^5} + \frac{46080 * \theta^4}{\beta^6} - \frac{43008 * \theta^5}{\beta^7} + \frac{14336 * \theta^6}{\beta^8} \right] \\
a2p(\theta) := & 0
\end{aligned}$$

$$ap(\theta) := \begin{cases} a1p(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ a2p(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Figura 26

Aceleración de la leva polidínica VS leva convexa tipo B



Nota: la aceleración de la polidínica se mejora completamente con respecto a la convexa tipo B.

En la gráfica de aceleración la leva polidínica de color azul se ajusta de mejor manera evitando que exista un despegue alto, así como se puede evidenciar en la gráfica de color rojo que pertenece a la leva convexa tipo B, esto hace que la leva polidínica sea mejor comparado a la leva convexa y la leva polinomial 45678.

Como se pudo observar en las gráficas anteriores de posición, velocidad y aceleración con la respectiva comparación entre la leva convexa tipo B y la leva polidínica esta última se ajusta perfectamente de acuerdo a los parámetros que se han estado estableciendo, en donde podemos asegurar teóricamente que la leva polidínica será mejor que la leva convexa y que la leva polinomial 45678, conjunto con este análisis se considera necesario realizar una verificación del sobresalto que existe en la leva polinomial, para esto se debe realizar la tercera derivada de la ecuación de posición de la leva polidínica.

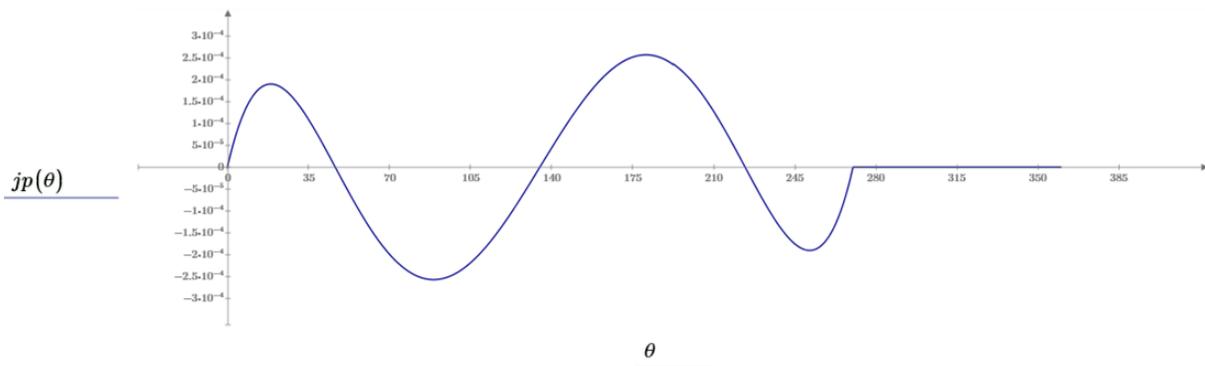
$$j1p(\theta) := h * \left[\frac{6144 * \theta}{\beta^4} - \frac{61440 * \theta^2}{\beta^5} + \frac{184320 * \theta^3}{\beta^6} - \frac{215040 * \theta^4}{\beta^7} + \frac{86016 * \theta^5}{\beta^8} \right]$$

$$j2p(\theta) := 0$$

$$jp(\theta) := \begin{cases} j1p(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ j2p(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Figura 27

Sobre aceleración de la leva polidínica



Nota: nos indica la rapidez con la que la leva polidínica acelera en cada rango de ángulos.

Con la gráfica de sobre aceleración para la leva polidínica se puede evidenciar que en los 90 y 180 grados son los puntos donde más sobre aceleración se va a tener en la leva, sin embargo, pese a esto la leva sigue siendo mejor que la leva convexa y que la leva polinomial 45678, con la que se está realizando comparaciones donde la sobre aceleración será menor con respecto a la leva convexa tipo B, de igual manera podemos calcular el ángulo de presión y radio de curvatura para determinar si el perfil de leva que estamos encontrando del polinomio 45678 se ajustan a los requerimientos de la leva convexa tipo B.

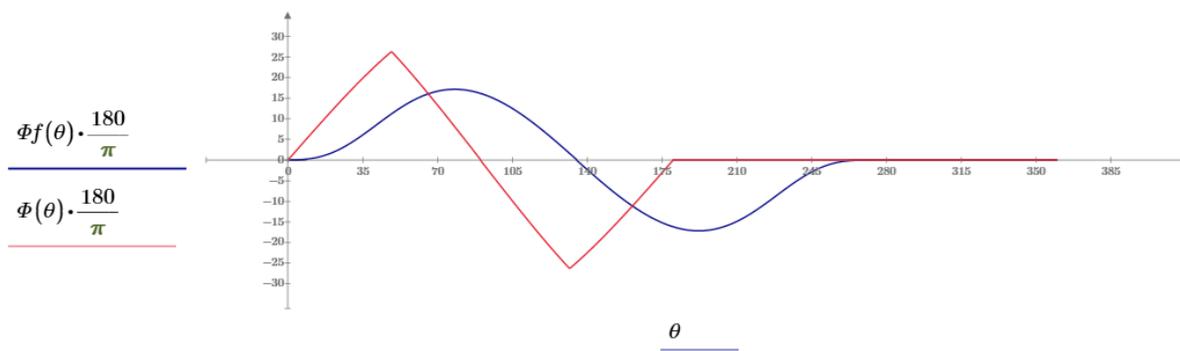
$$Rp := R + rf \quad \varepsilon := 0$$

$$\phi(\theta) := \operatorname{atan}\left(\frac{v(\theta) * \frac{180}{\pi} - \varepsilon}{s(\theta) + \sqrt{Rp^2 - \varepsilon^2}}\right)$$

$$\phi f(\theta) := \operatorname{atan}\left(\frac{vp(\theta) * \frac{180}{\pi} - \varepsilon}{sp(\theta) + \sqrt{Rp^2 - \varepsilon^2}}\right)$$

Figura 28

Ángulo de presión de la leva polidínica



Nota: el ángulo de presión de la leva polidínica se encuentra entre los 30 grados admisible según el diseño de levas.

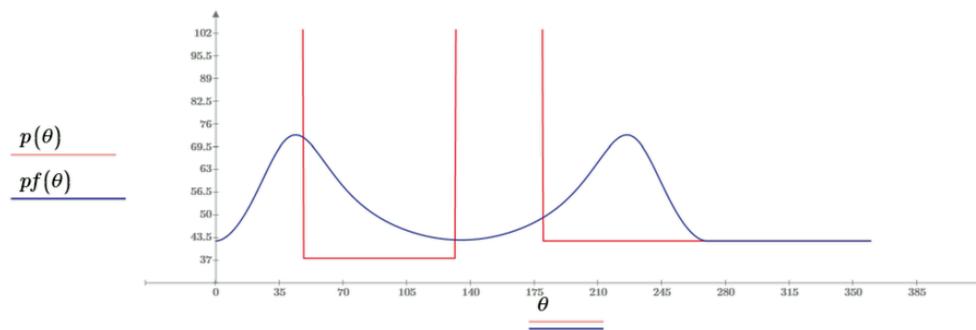
Con la gráfica del ángulo de presión se observa que no llegan a 30, lo cual es lo que se estaba buscando en la fabricación del perfil de la leva para que no exista puntos de despegue tan considerables que puedan afectar a la leva o al rodillo del seguidor cuando entren en contacto entre sí, con esto podemos pasar a realizar la comparativa del radio de curvatura donde se tiene lo siguiente:

$$\rho(\theta) := \frac{\left((Rp + s(\theta))^2 + \left(v(\theta) * \frac{180}{\pi} \right)^2 \right)^{3/2}}{(Rp + s(\theta))^2 + 2 * \left(v(\theta) * \frac{180}{\pi} \right)^2 - a(\theta) * \left(\frac{180}{\pi} \right)^2 * (Rp + s(\theta))}$$

$$\rho f(\theta) := \frac{\left((Rp + sp(\theta))^2 + \left(vp(\theta) * \frac{180}{\pi} \right)^2 \right)^{3/2}}{(Rp + sp(\theta))^2 + 2 * \left(vp(\theta) * \frac{180}{\pi} \right)^2 - ap(\theta) * \left(\frac{180}{\pi} \right)^2 * (Rp + sp(\theta))}$$

Figura 29

Radio de curvatura de la leva polidínica



Nota: radio de curvatura más amplia con respecto a la leva convexa.

Con la gráfica de radio de curvatura se puede evidenciar que las sobre aceleraciones y despegues que se tendría en la leva cumple con los parámetros que se tomó en consideración con respecto a la leva convexa tipo B y de la leva polinomial 45678.

Para mejorar el ajuste de la leva polidínica se tendrá que calcular un parámetro conocido como PING, este factor ayuda aumentar el grado de ajuste de la leva polidínica, recordando que el ángulo beta de desplazamiento es de 270 grados en este punto el despegue no es tan considerable como se espera, de esta forma tenemos lo siguiente:

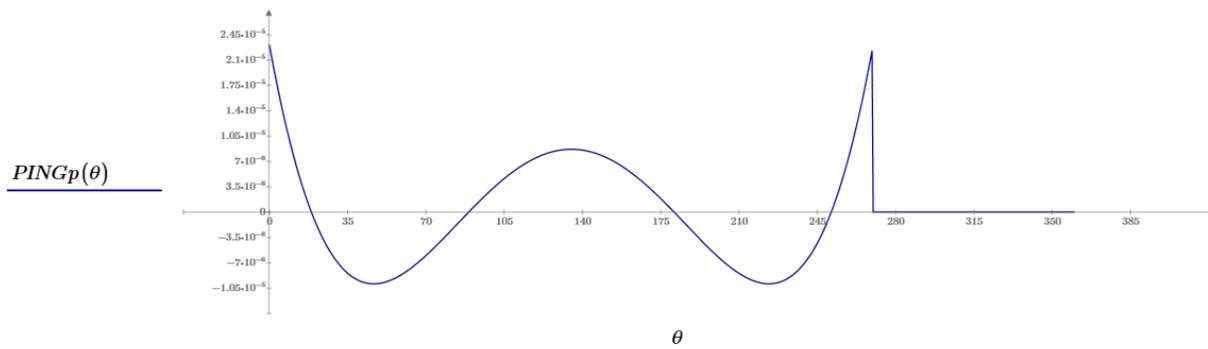
$$PING1p(\theta) := h * \left[\frac{6144}{\beta^4} - \frac{122880 * \theta}{\beta^5} + \frac{552960 * \theta^2}{\beta^6} - \frac{860160 * \theta^3}{\beta^7} + \frac{430080 * \theta^4}{\beta^8} \right]$$

$$PING2p(\theta) := 0$$

$$PINGp(\theta) := \begin{cases} PING1p(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ PING2p(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Figura 29

PING de ajuste para la leva polidínica



Nota: el PING es un parámetro que ajusta aún más la obtención de la gráfica de posición de la leva polidínica.

De forma general para obtener la ecuación de la posición de la leva polidínica se considerará un diagrama de cuerpo libre, donde se debe despejar la variable “s” que relaciona al perfil de la leva, teniendo como resultado lo siguiente:

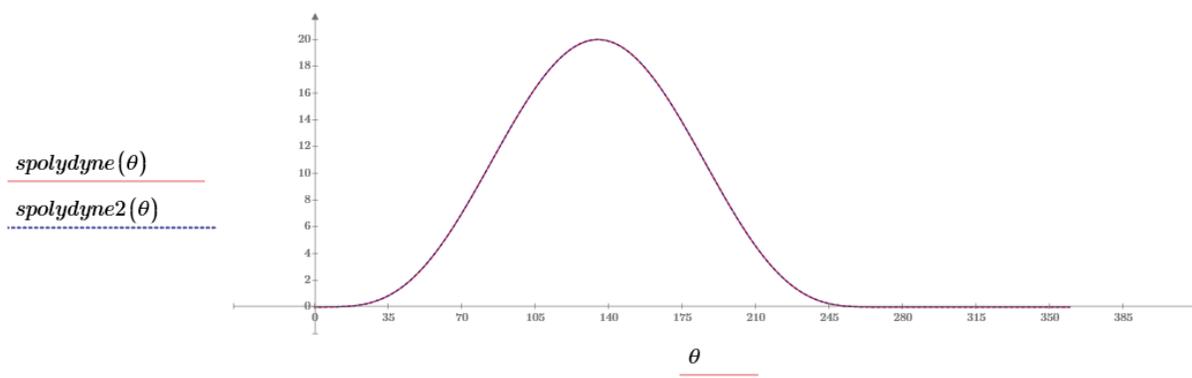
Para la obtención de la leva polidínica procedemos a utilizar la siguiente ecuación encontrada donde explica de mejor manera la leva polidínica y acomodando a las variables de nuestro sistema, con esta comparativa se obtendrá que la gráfica de posición de ambas levas es la misma.

$$spolydyne(\theta) := \frac{masa * 36 * f^2 * ap(\theta) + 6 * f * C * vp(\theta) + (k1 + k) * sp(\theta)}{k1}$$

$$spolydyne2(\theta) := \frac{masa * 36 * f^2 * ap(\theta) + (k1 + k) * sp(\theta)}{k1}$$

Figura 30

Ajuste de la posición de la leva polidínica



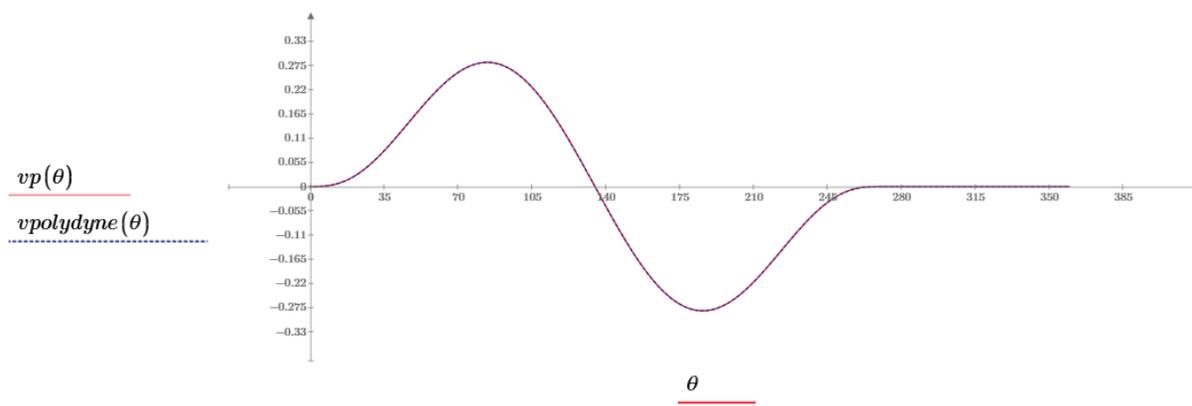
Nota: se presenta de mejor manera el ajuste que se tiene con respecto a la leva polidínica.

Como se puede evidenciar en la gráfica, las curvas polidínica con diferentes ajustes coinciden a la perfección, teniendo un desplazamiento de 270 grados, posterior a esto realizaremos la obtención de la velocidad de esta leva, por lo que se debe derivar la posición, teniendo como resultado lo siguiente:

$$vpolydyne(\theta) := \frac{masa * 36 * f^2 * jp(\theta) + 6 * f * C * ap(\theta) + (k1 + k) * vp(\theta)}{k1}$$

Figura 31

Ajuste de la velocidad de la leva polidínica



Nota: se presenta la curva de la velocidad con el ajuste de la leva polidínica, considerando el aumento del PING.

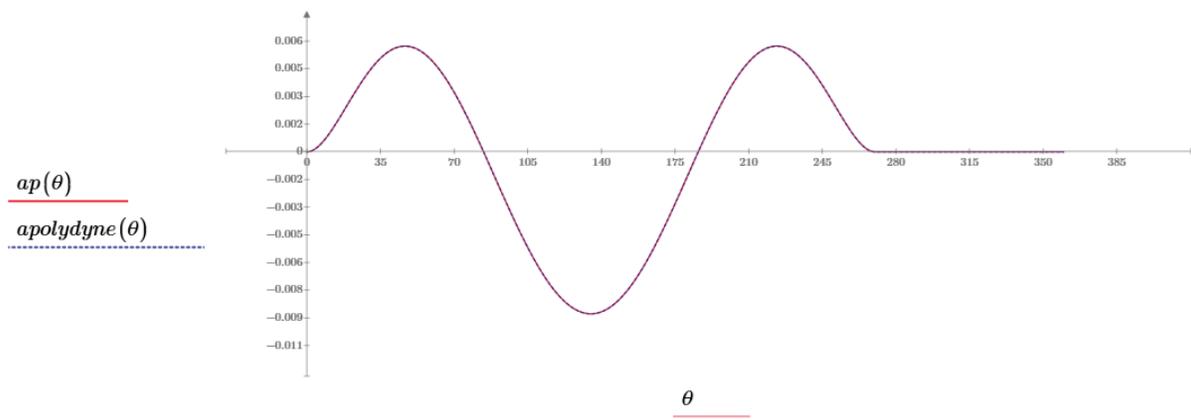
En la gráfica de la leva polidínica se puede apreciar cómo se ajusta con la leva polinomial 4567 lo que nos da a entender que el ajuste para esta leva es el adecuado, cumpliendo con todos los parámetros

de mejora que se implementaron para esta leva, posterior a esto procedemos a realizar la derivada de la velocidad para determinar si la aceleración corresponde a la leva polinomial 45678 que se trata de ajustar, obteniendo:

$$apolydyne(\theta) := \frac{masa * 36 * f^2 * PINGp(\theta) + 6 * f * C * jp(\theta) + (k1 + k) * ap(\theta)}{k1}$$

Figura 32

Ajuste de la aceleración polidínica

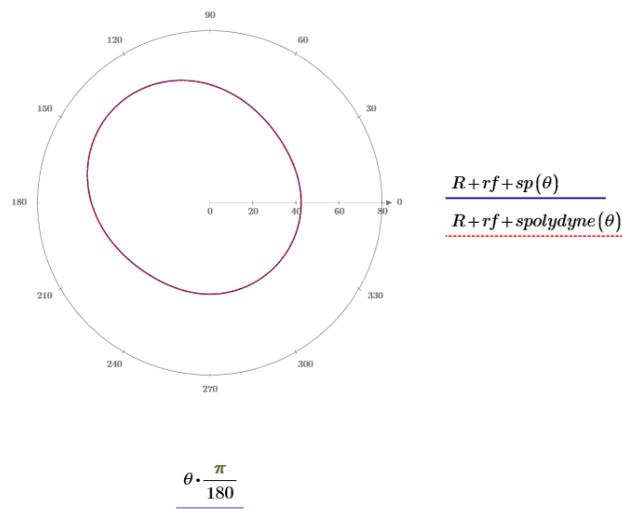


Nota: ajuste de la aceleración polidínica con la implementación del PING para su mejora.

En la gráfica de aceleración la leva polidínica se ajusta a la leva polinomial 45678 como se puede apreciar en la ilustración, de esta forma se siguen ajustando a los parámetros que se esperaban, como todos los parámetros se ajustaron de manera correcta para la obtención de la leva polidínica podemos obtener el perfil para esta leva.

Figura 33

Perfil de la leva polidínica



Nota: el perfil de la leva polidínica se ajusta al perfil de la leva polinomial de manera correcta, cumpliendo con los parámetros establecidos.

El perfil de la leva polinomial 45678 se encuentra con una línea de color roja, mientras que el perfil de la leva polidínica se encuentra con color azul, aumentando las condiciones de trabajo para esta leva y teniendo como referencia la leva polinomial 45678 se encontró el perfil de la leva que mejor responde a estas condiciones de trabajo.

Análisis y diseño de la leva con series de Fourier

Las series de Fourier son muy utilizadas en el análisis armónico de todo tipo de sistemas físicos, cabe mencionar que la respuesta de cualquier seguidor siempre corresponderá a una función periódica y no necesariamente a una función armónica por lo cual es susceptible su representación por una serie de Fourier, donde su fórmula general que rige a esta serie es:

$$y = \frac{a_0}{2} + (a_1 \sin x + b_1 \cos x) + (a_2 \sin 2x + b_2 \cos 2x) + \dots + (a_n \sin nx + b_n \cos nx)$$

Por consiguiente, la serie de Fourier se reduce a:

$$y = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \sin kx + b_k \cos kx$$

Después de ciertas investigaciones Fourier descubrió que al elegir los coeficientes apropiados la serie podría representar cualquier tipo de función periódica dado que en la práctica debe truncarse en la suma de un número finito de términos (Ambekar, 2007), para aproximarse bastante a la mayoría de funciones regulares nos hace mención que se debe truncar aproximadamente hasta los 12 términos, de esta forma las series de Fourier para posición, velocidad, aceleración y sobre aceleración quedarían expresadas de la siguiente manera:

$$s = h \left\{ \frac{\theta}{\beta} - \frac{1}{2\pi} \left[\sum_{k=1}^n a_k \sin \left(2\pi k \frac{\theta}{\beta} \right) + b_k \cos \left(2\pi k \frac{\theta}{\beta} \right) \right] \right\}$$

$$v = \frac{h}{\beta} \left\{ 1 - \left[\sum_{k=1}^n k a_k \cos \left(2\pi k \frac{\theta}{\beta} \right) - k b_k \sin \left(2\pi k \frac{\theta}{\beta} \right) \right] \right\}$$

$$a = 2\pi \frac{h}{\beta^2} \left[\sum_{k=1}^n k^2 a_k \sin \left(2\pi k \frac{\theta}{\beta} \right) + k^2 b_k \cos \left(2\pi k \frac{\theta}{\beta} \right) \right]$$

$$j = 4\pi^2 \frac{h}{\beta^3} \left[\sum_{k=1}^n k^3 a_k \cos \left(2\pi k \frac{\theta}{\beta} \right) - k^3 b_k \sin \left(2\pi k \frac{\theta}{\beta} \right) \right]$$

(Norton, 2009)

Se debe considerar que para la realización de la leva de Fourier primero se tomarán en cuenta los parámetros de la leva convexa B propia del equipo TM1021 – CAM ANALYSIS MACHINE MAIN UNIT y al ser tratada como una serie, nosotros llegaremos hasta el segundo grado de armonía de la serie de Fourier para el análisis y construcción de la respectiva leva que se ajusta a los siguientes parámetros:

$$\theta := 0,0.5 \dots 360$$

$$\beta_1 := 48.44 \quad \beta_2 := 180 - 2 * \beta_1 \quad \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 180 \quad \beta := 360$$

$$rf := 12.5 \quad rn := 25 \quad R := 30 \quad dc := 25 \quad \rho := 92 \quad h := 20$$

$$nx := \frac{\rho + rf}{\rho - R} \quad nc := \frac{rf + rn}{dc}$$

Para realizar la fabricación de la leva tenemos que obtener las ecuaciones que representan la posición de la leva convexa tipo B, de donde tenemos los siguiente:

$$s1(\theta) := (\rho - R) * \left(\sqrt{\cos\left(\theta * \frac{\pi}{180}\right)^2 - 1 + nx^2} - \cos\left(\theta * \frac{\pi}{180}\right) - \frac{R + rf}{\rho - R} \right)$$

$$s2(\theta) := dc * \left(\cos\left(\left(\theta - \beta_1 - \frac{\beta_2}{2}\right) * \frac{\pi}{180}\right) + \sqrt{nc^2 - \sin\left(\left(\theta - \beta_1 - \frac{\beta_2}{2}\right) * \frac{\pi}{180}\right)^2} \right) - (R + rf)$$

$$s3(\theta) := (\rho - R) * \left(\sqrt{\cos\left(\left(\theta - 2 * \beta_1 - \beta_2\right) * \frac{\pi}{180}\right)^2 - 1 + nx^2} - \cos\left(\left(\theta - 2 * \beta_1 - \beta_2\right) * \frac{\pi}{180}\right) - \frac{R + rf}{\rho - R} \right)$$

$$s4(\theta) := 0$$

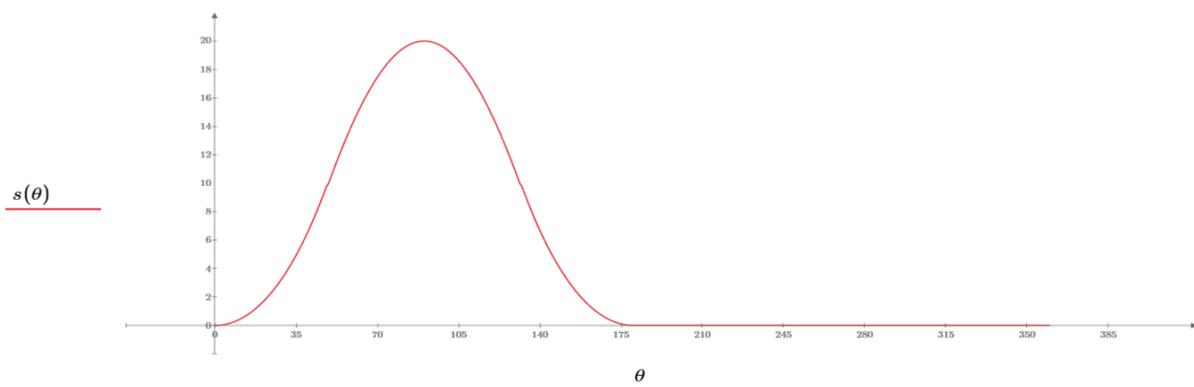
Condicionando las ecuaciones de posición que se encuentra descrito en la parte superior, se procede a determinar las condiciones en base a los ángulos de la geometría de la leva, representándolo de la siguiente manera:

$$s(\theta) := \begin{cases} s1(\theta) & \text{if } \theta \leq \beta_1 \\ s2(\theta) & \text{if } \beta_1 \leq \theta \leq \beta_1 + \beta_2 \\ s3(\theta) & \text{if } \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 2 * \beta_1 + \beta_2 \\ s4(\theta) & \text{if } 2 * \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Para comprobación de la curva de la leva convexa tipo B tenemos que hacer una gráfica de posición versus desplazamiento, donde el desplazamiento se encuentra entre 0 grados hasta los 360.

Figura 34

Ecuación del desplazamiento de la leva convexa tipo B



Nota: comportamiento de la leva convexa tipo B, a lo largo de los 360 grados.

Como podemos observar en la figura que representa la posición versus el desplazamiento el punto más alto de la curva se da a los 90 grados y llega hasta los 20 mm de altura, la curva llega hasta los

180 grados, pasado esta cantidad de grados la curva tiende a ser cero, lo cual se recalca que la curva que se obtuvo corresponde plenamente a la leva convexa tipo B.

Para la obtención de las constantes de los doce términos de la serie de Fourier, se debe resolver el siguiente sistema de ecuaciones para hallar los coeficientes que se ajustan a la serie, teniendo como consiguiente:

$$\begin{pmatrix} A0 \\ A1 \\ A2 \\ A3 \\ A4 \\ A5 \\ A6 \\ B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \end{pmatrix} := \frac{1}{12} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & \sqrt{3} & 1 & 0 & -1 & -\sqrt{3} & -2 & -\sqrt{3} & -1 & 0 & 1 & \sqrt{3} \\ 2 & 1 & -1 & -2 & -1 & 1 & 2 & 1 & -1 & -2 & -1 & 1 \\ 2 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & -2 & 0 \\ 2 & -1 & -1 & 2 & -1 & -1 & 2 & -1 & -1 & 2 & -1 & -1 \\ 2 & -\sqrt{3} & 1 & 0 & -1 & \sqrt{3} & -2 & \sqrt{3} & -1 & 0 & 1 & -\sqrt{3} \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & \sqrt{3} & 2 & \sqrt{3} & 1 & 0 & -1 & -\sqrt{3} & -2 & -\sqrt{3} & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 0 & 2 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & -2 & 0 & 2 & 0 & -2 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 0 & 1 & -\sqrt{3} & 2 & -\sqrt{3} & 1 & 0 & -1 & \sqrt{3} & -2 & \sqrt{3} & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0.873 \\ 3.602 \\ 8.518 \\ 14.506 \\ 18.586 \\ 20 \\ 18.586 \\ 14.506 \\ 8.518 \\ 3.602 \\ 0.873 \end{pmatrix} = \begin{table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;">| | |
| --- | --- |
| | 0 |
| 0 | 9.347 |
| 1 | -10.264 |
| 2 | 0.719 |
| 3 | 0.301 |
| 4 | -0.088 |
| 5 | -0.037 |
| 6 | 0.022 |
| 7 | 0 |
| 8 | 0 |
| 9 | 0 |
| 10 | 0 |
| 11 | 0 |$$

Considerando la ecuación que se ajusta a la serie de Fourier y recordando que solo analizaremos hasta el doceavo grado de armonía, procedemos a expresar las ecuaciones de posición, considerando que al ser una serie cicloidal necesitamos una ecuación que se ajuste a la subida y bajada de la curva, teniendo, por consiguiente:

$$\begin{aligned} s1f(\theta) := & A0 + A1\cos\left(\frac{2 * \theta * \pi}{\beta}\right) + A2\cos\left(\frac{4 * \theta * \pi}{\beta}\right) + A3\cos\left(\frac{6 * \theta * \pi}{\beta}\right) + A4\cos\left(\frac{8 * \theta * \pi}{\beta}\right) + A5\cos\left(\frac{10 * \theta * \pi}{\beta}\right) \\ & + A6\cos\left(\frac{12 * \theta * \pi}{\beta}\right) + B1\sin\left(\frac{2 * \theta * \pi}{\beta}\right) + B2\sin\left(\frac{4 * \theta * \pi}{\beta}\right) + B3\sin\left(\frac{6 * \theta * \pi}{\beta}\right) + B4\sin\left(\frac{8 * \theta * \pi}{\beta}\right) \\ & + B5\sin\left(\frac{10 * \theta * \pi}{\beta}\right) \\ s2f(\theta) := & 0 \end{aligned}$$

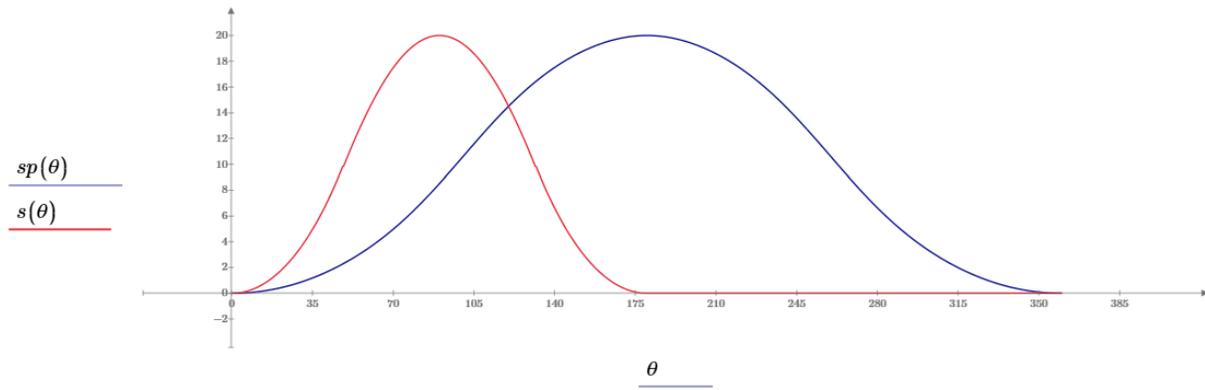
De igual manera se procede a implementar las condiciones para observar la gráfica de posición de la leva de la serie de Fourier.

$$sf(\theta) := \begin{cases} s1f(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ s2f(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Realizando las gráficas de posición versus desplazamiento de la leva convexa tipo B y de la leva de la serie de Fourier con segundo grado de armonía vamos a encontrar lo siguiente:

Figura 35

Desplazamiento de la leva convexa tipo B VS leva de serie de Fourier



Nota: el comportamiento del desplazamiento de la serie de Fourier de grado 13 es más armónico durante el recorrido de los 360 grados.

Como se puede observar en la gráfica de posición versus desplazamiento, la leva convexa tipo B se encuentra graficada con color rojo, mientras que la leva de la serie de Fourier se encuentra representada con color azul, llegando a observar que la gráfica de la leva de Fourier se aleja considerablemente a la de la leva convexa, de donde podemos establecer que los parámetros que se encuentran para la realización de esta leva de series de Fourier se encuentran bien establecidos y mejorará el comportamiento de la leva.

Para el análisis de velocidad para la leva convexa se tiene que derivar las ecuaciones de posición s con respecto al ángulo, de tal manera tenemos las siguientes ecuaciones que representan a la velocidad de la leva convexa.

$$v1(\theta) := -(R - \rho) * \left(\frac{\pi * \sin\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)}{180} - \frac{\pi * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right) * \sin\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)}{180 * \sqrt{\cos^2\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right) - 1}} \right)$$

$$v2(\theta) := dc * \left(\frac{\pi * \sin\left(\frac{\pi(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)}{180} + \frac{\pi * \cos\left(\frac{\pi(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right) * \sin\left(\frac{\pi(\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)}{180 * \sqrt{nc^2 - \sin\left(\frac{\pi}{180} * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})\right)^2}} \right)$$

$$v3(\theta) := (R - \rho) * \left(\frac{\pi * \sin\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)}{180} - \frac{\pi * \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right) * \sin\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)}{180 * \sqrt{nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 - 1}} \right)$$

$$v4(\theta) := 0$$

Implementando las limitaciones para cada función que representa la velocidad de la leva convexa, lo encontraremos de la siguiente manera:

$$v(\theta) := \begin{cases} v1(\theta) & \text{if } \theta \leq \beta_1 \\ v2(\theta) & \text{if } \beta_1 \leq \theta \leq \beta_1 + \beta_2 \\ v3(\theta) & \text{if } \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 2 * \beta_1 + \beta_2 \\ v4(\theta) & \text{if } 2 * \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

De igual manera realizaremos la misma derivación con la ecuación de la posición de la leva polinomial 4567 y estableceremos las respectivas limitaciones.

$$v1f(\theta) := -\frac{2\pi}{\beta} A1 \cos\left(\frac{2 * \theta * \pi}{\beta}\right) - \frac{4\pi}{\beta} A2 \cos\left(\frac{4 * \theta * \pi}{\beta}\right) - \frac{6\pi}{\beta} A3 \cos\left(\frac{6 * \theta * \pi}{\beta}\right) - \frac{8\pi}{\beta} A4 \cos\left(\frac{8 * \theta * \pi}{\beta}\right)$$

$$- \frac{10\pi}{\beta} A5 \cos\left(\frac{10 * \theta * \pi}{\beta}\right) - \frac{12\pi}{\beta} A6 \cos\left(\frac{12 * \theta * \pi}{\beta}\right) + \frac{2\pi}{\beta} B1 \sin\left(\frac{2 * \theta * \pi}{\beta}\right) + \frac{4\pi}{\beta} B2 \sin\left(\frac{4 * \theta * \pi}{\beta}\right)$$

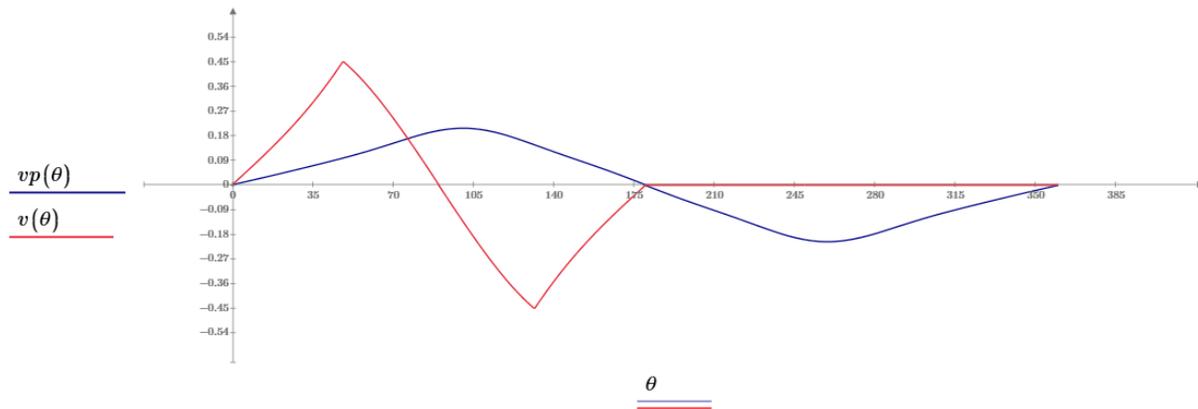
$$+ \frac{6\pi}{\beta} B3 \sin\left(\frac{6 * \theta * \pi}{\beta}\right) + \frac{8\pi}{\beta} B4 \sin\left(\frac{8 * \theta * \pi}{\beta}\right) - \frac{10\pi}{\beta} B5 \sin\left(\frac{10 * \theta * \pi}{\beta}\right)$$

$$v2f(\theta) := 0$$

$$vf(\theta) := \begin{cases} v1f(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ v2f(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Figura 36

Velocidad de la leva convexa tipo B VS la leva de la serie de Fourier



Nota: la aceleración de la leva de la serie de Fourier no tiene sobresaltos considerables.

Como se puede observar en la gráfica de velocidad versus desplazamiento determinamos que la gráfica de la leva de la serie de Fourier que se encuentra con color azul no se ajusta a la gráfica de la leva convexa de color roja, haciendo referencia que la leva de Fourier es mejor que la convexa esto se lo puede comprobar en la gráfica.

Para la obtención de la aceleración se realiza una segunda derivación de la posición con respecto al desplazamiento, de tal manera vamos a tener lo siguiente:

$$a1(\theta) := -(R - \rho) * \left(\frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)}{32400} - \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nx^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 - 1}} + \frac{\pi^2 * \sin\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nx^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 - 1}} - \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 * \sin\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2}{32400 * \left(nx^2 * \cos\left(\frac{\pi * \theta}{180}\right)^2 - 1\right)^{3/2}} \right)$$

$$\begin{aligned}
a2(\theta) := & -dc * \left(\frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)}{32400} + \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nc^2 - \sin\left(\frac{\pi}{180} * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})\right)^2}} \right. \\
& - \frac{\pi^2 * \sin\left(\frac{\pi * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nc^2 - \sin\left(\frac{\pi}{180} * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})\right)^2}} + \left. \frac{\pi^2 * \sin\left(\frac{\pi * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right) * \cos\left(\frac{\pi * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)^2}{32400 * \left(nc^2 - \sin\left(\frac{\pi * (\beta_1 - \theta + \frac{\beta_2}{2})}{180}\right)\right)^{3/2}} \right) \\
a3(\theta) := & -(R - \rho) * \left(\frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)}{32400} - \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 - 1}} \right. \\
& + \frac{\pi^2 * \sin\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2}{32400 * \sqrt{nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 - 1}} \\
& \left. - \frac{\pi^2 * \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 * \sin\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2}{32400 * \left(nx^2 + \cos\left(\frac{\pi * (2 * \beta_1 - \theta + \beta_2)}{180}\right)^2 - 1\right)^{3/2}} \right) \\
a4(\theta) := & 0
\end{aligned}$$

Implementando las limitaciones para cada función que representa la velocidad de la leva convexa, lo encontraremos de la siguiente manera:

$$a(\theta) := \begin{cases} a1(\theta) & \text{if } \theta \leq \beta_1 \\ a2(\theta) & \text{if } \beta_1 \leq \theta \leq \beta_1 + \beta_2 \\ a3(\theta) & \text{if } \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 2 * \beta_1 + \beta_2 \\ a4(\theta) & \text{if } 2 * \beta_1 + \beta_2 \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

De igual manera realizaremos la misma derivación con la ecuación de la posición de la leva polinomial 4567 y estableceremos las respectivas limitaciones.

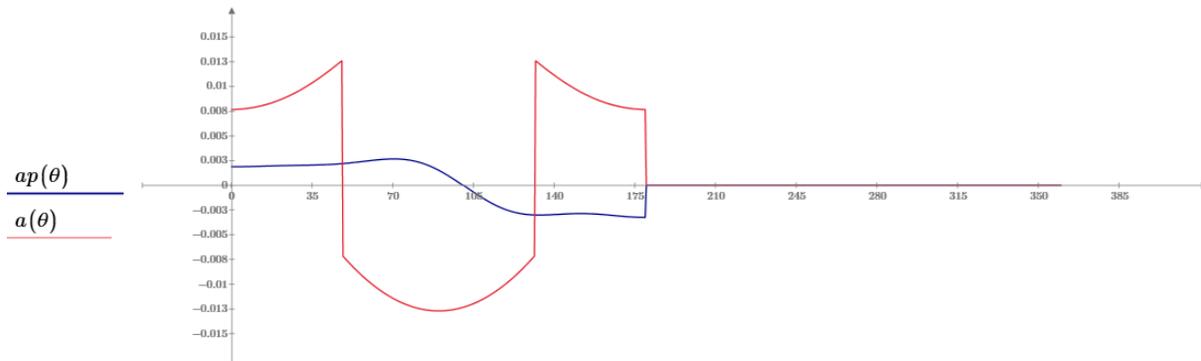
$$\begin{aligned}
a1f(\theta) := & -\frac{4\pi^2}{\beta^2} A1 \cos\left(\frac{2 * \theta * \pi}{\beta}\right) - \frac{16\pi^2}{\beta^2} A2 \cos\left(\frac{4 * \theta * \pi}{\beta}\right) - \frac{36\pi^2}{\beta^2} A3 \cos\left(\frac{6 * \theta * \pi}{\beta}\right) - \frac{64\pi^2}{\beta^2} A4 \cos\left(\frac{8 * \theta * \pi}{\beta}\right) \\
& - \frac{100\pi^2}{\beta^2} A5 \cos\left(\frac{10 * \theta * \pi}{\beta}\right) - \frac{144\pi^2}{\beta^2} A6 \cos\left(\frac{12 * \theta * \pi}{\beta}\right) - \frac{4\pi^2}{\beta^2} B1 \sin\left(\frac{2 * \theta * \pi}{\beta}\right) \\
& - \frac{16\pi^2}{\beta^2} B2 \sin\left(\frac{4 * \theta * \pi}{\beta}\right) - \frac{36\pi^2}{\beta^2} B3 \sin\left(\frac{6 * \theta * \pi}{\beta}\right) - \frac{64\pi^2}{\beta^2} B4 \sin\left(\frac{8 * \theta * \pi}{\beta}\right)
\end{aligned}$$

$$a2f(\theta) := 0$$

$$af(\theta) := \begin{cases} a1f(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ a2f(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}$$

Figura 37

Aceleración de la leva de la serie de Fourier



Nota: la aceleración de la serie de Fourier es más armónico con respecto a la de la leva convexa tipo B.

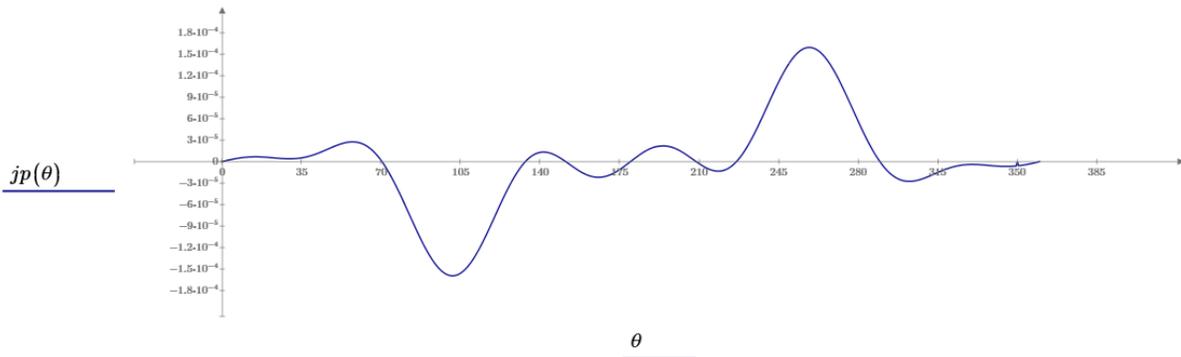
En la gráfica de aceleración ambas curvas se ajustan, la curva de la leva de la serie de Fourier tiene una cantidad poco considerable de desaceleración con respecto a la leva convexa, por la forma de la gráfica podemos mencionar que no existe un sobresalto en comparación con la leva convexa tipo B, que es la leva que se plantea mejorar para buenas prácticas en el laboratorio de mecanismos.

Como se pudo observar en las gráficas anteriores de posición, velocidad y aceleración con la respectiva comparación entre la leva convexa tipo B y la leva de la serie de Fourier ambas curvas se ajustan perfectamente de acuerdo a los parámetros que se han estado estableciendo, en donde podemos asegurar teóricamente que la leva de la serie de Fourier con doceavo grado de armonía será mejor que la leva convexa, conjunto con este análisis se considera necesario realizar una verificación del sobresalto que existe en la leva polinomial, para esto se debe realizar la tercera derivada de la ecuación de posición de la leva polinomial.

$$\begin{aligned}
 j1f(\theta) &:= -\frac{4\pi^2}{\beta^3}A1\cos\left(\frac{2*\theta*\pi}{\beta}\right) - \frac{16\pi^2}{\beta^3}A2\cos\left(\frac{4*\theta*\pi}{\beta}\right) - \frac{36\pi^2}{\beta^3}A3\cos\left(\frac{6*\theta*\pi}{\beta}\right) - \frac{64\pi^2}{\beta^3}A4\cos\left(\frac{8*\theta*\pi}{\beta}\right) \\
 &\quad - \frac{100\pi^2}{\beta^3}A5\cos\left(\frac{10*\theta*\pi}{\beta}\right) - \frac{144\pi^2}{\beta^3}A6\cos\left(\frac{12*\theta*\pi}{\beta}\right) - \frac{4\pi^2}{\beta^3}B1\sin\left(\frac{2*\theta*\pi}{\beta}\right) \\
 &\quad - \frac{16\pi^2}{\beta^3}B2\sin\left(\frac{4*\theta*\pi}{\beta}\right) - \frac{36\pi^2}{\beta^3}B3\sin\left(\frac{6*\theta*\pi}{\beta}\right) - \frac{64\pi^2}{\beta^3}B4\sin\left(\frac{8*\theta*\pi}{\beta}\right) \\
 j2f(\theta) &:= 0 \\
 jf(\theta) &:= \begin{cases} j1f(\theta) & \text{if } \beta \geq \theta \\ j2f(\theta) & \text{if } \beta \leq \theta \leq 360 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Figura 38

Sobre aceleración de la leva de la serie de Fourier



Nota: la sobre aceleración de la leva de la serie de Fourier nos indica que tan rápido existe una aceleración con referente a cada ángulo.

Con la gráfica de sobre aceleración para la leva de la serie de Fourier con doceavo grado de armonía se puede evidenciar que en los 90 y 270 grados son los puntos donde más sobre aceleración se va a tener en la leva, sin embargo, pese a esto la leva sigue siendo mejor que la leva convexa con la que se está realizando comparaciones donde la sobre aceleración será menor con respecto a la leva convexa tipo B, de igual manera podemos calcular el ángulo de presión y radio de curvatura para determinar si el perfil de leva que estamos encontrando de la serie de Fourier con doceavo grado de armonía se ajustan a los requerimientos de la leva convexa tipo B.

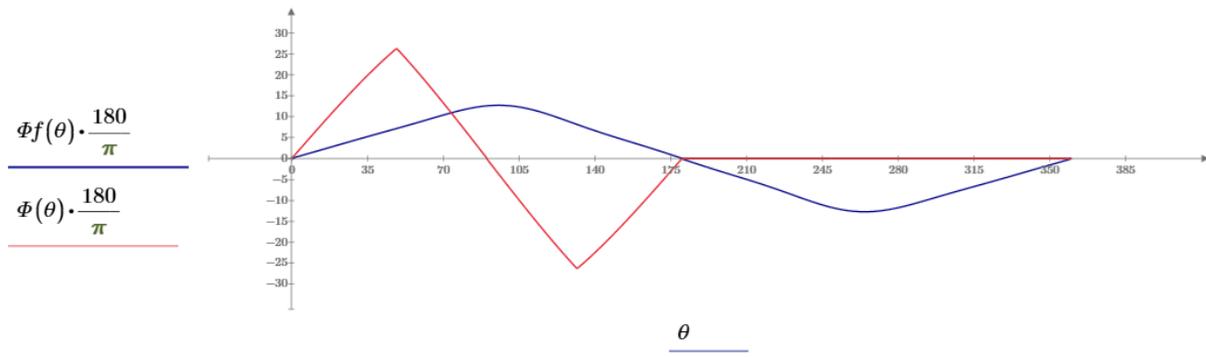
$$Rp := R + rf \quad \varepsilon := 0$$

$$\phi(\theta) := \operatorname{atan}\left(\frac{v(\theta) * \frac{180}{\pi} - \varepsilon}{s(\theta) + \sqrt{Rp^2 - \varepsilon^2}}\right)$$

$$\phi f(\theta) := \operatorname{atan}\left(\frac{vf(\theta) * \frac{180}{\pi} - \varepsilon}{sf(\theta) + \sqrt{Rp^2 - \varepsilon^2}}\right)$$

Figura 39

Ángulo de presión de la leva de la serie de Fourier



Nota: en ángulo de presión de la serie de Fourier cumple con las especificaciones de diseño de levas, siendo menor a 30 grados.

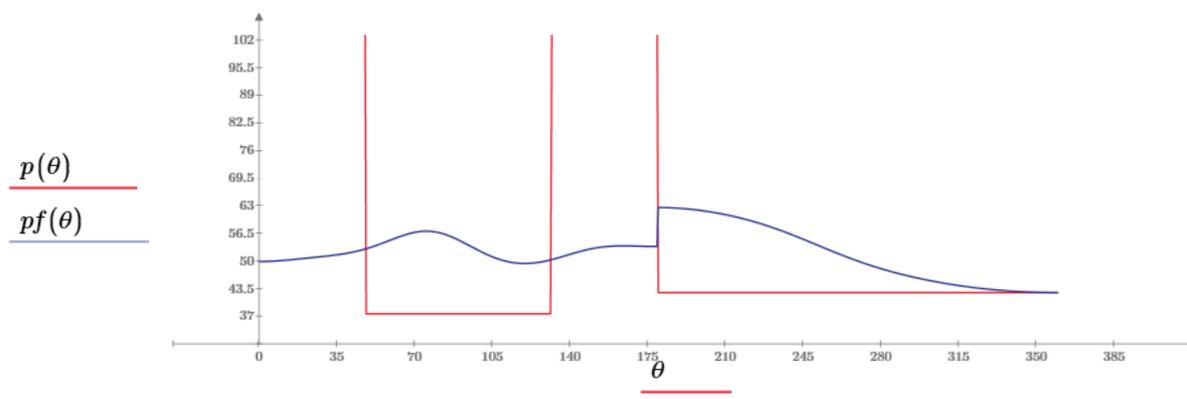
Con la gráfica del ángulo de presión se observa que no llegan a 30, lo cual es lo que se estaba buscando en la fabricación del perfil de la leva para que no exista puntos de despeque tan considerables que puedan afectar a la leva o al rodillo del seguidor cuando entren en contacto entre sí, con esto podemos pasar a realizar la comparativa del radio de curvatura donde se tiene lo siguiente:

$$\rho(\theta) := \frac{\left((Rp + s(\theta))^2 + \left(v(\theta) * \frac{180}{\pi}\right)^2\right)^{3/2}}{(Rp + s(\theta))^2 + 2 * \left(v(\theta) * \frac{180}{\pi}\right)^2 - a(\theta) * \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 * (Rp + s(\theta))}$$

$$\rho f(\theta) := \frac{\left((Rp + sf(\theta))^2 + \left(vf(\theta) * \frac{180}{\pi}\right)^2\right)^{3/2}}{(Rp + sf(\theta))^2 + 2 * \left(vf(\theta) * \frac{180}{\pi}\right)^2 - af(\theta) * \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 * (Rp + sf(\theta))}$$

Figura 40

Radio de curvatura de la serie de Fourier

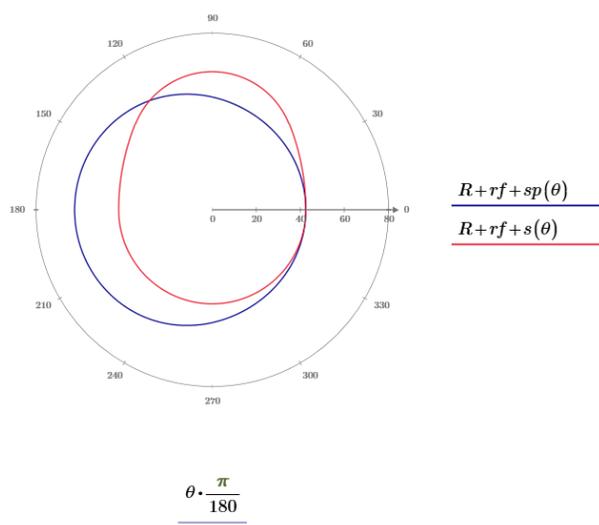


Nota: de acuerdo al radio de curvatura de la serie de Fourier, no existirá sobre saltos que afecten al funcionamiento de la leva.

Con la gráfica de radio de curvatura se puede evidenciar que las sobre aceleraciones y despegues que se tendría en la leva cumple con los parámetros que se tomó en consideración con respecto a la leva convexa tipo B, con todas estas consideraciones ya se puede realizar la obtención del perfil de la leva de la serie de Fourier con doceavo grado de armonía, teniendo lo siguiente:

Figura 41

Perfil de la leva de la serie de Fourier



Nota: figura del perfil de la leva de la serie de Fourier con los parámetros establecidos.

El perfil de la leva convexa tipo B se encuentra con una línea de color roja, mientras que el perfil de la leva de la serie de Fourier con doceavo grado de armonía se encuentra con color azul, como se observa la leva polinomial tiene dimensiones un poco menores en comparación de la leva convexa, sin embargo, sustentándonos en los cálculos realizados previamente, podemos asegurar que la leva de la serie de Fourier con esas dimensiones tiene un comportamiento mejor que la leva convexa, esto se lo demostrará en el capítulo que corresponde a los ensayos experimentales.

Análisis de la respuesta dinámica

Continuando con el análisis de las levas a fabricar se procede a realizar en análisis de la respuesta dinámica de cada leva, considerando que para llegar a este análisis previamente se verificó que las respuestas cinemáticas sean las adecuadas y las que se requiere para su fabricación una vez determinado ciertos parámetros del equipo TM1021 – cam analyis machine main unit donde su máxima capacidad es de 500 rpm.

Leva polinomial 45678

Para el análisis de la respuesta dinámica de la leva polinomial 45678 primero debemos analizar la fuerza de contacto de la leva, para esto tenemos los siguientes parámetros con los que realizaremos el análisis dinámico de cada leva.

Necesitamos las constantes del vástago y del resorte:

$$k1 := 220000000 \frac{N}{m} \quad k2 := 3770 \frac{N}{m}$$

La altura de trabajo del seguidor a la cual estará configurado el equipo:

$$h := \frac{20}{1000} [m]$$

La masa total del sistema:

$$mf := 0.239 [kg] \text{ masa del seguidor}$$

$$ms := 1.915 [kg] \text{ masa del vástago}$$

$$mr := 0.043 [kg] \text{ masa del resorte}$$

$$m := m_f + m_s + m_r = 2.197[kg]$$

Las revoluciones de trabajo del equipo y la transformación de la misma a rad/seg:

$$N := 270 [rpm] \quad \omega := N * 2 * \frac{\pi}{60} = 28,274 \left[\frac{rad}{seg} \right]$$

Limitamos los ángulos de la leva con el que se realizará el análisis:

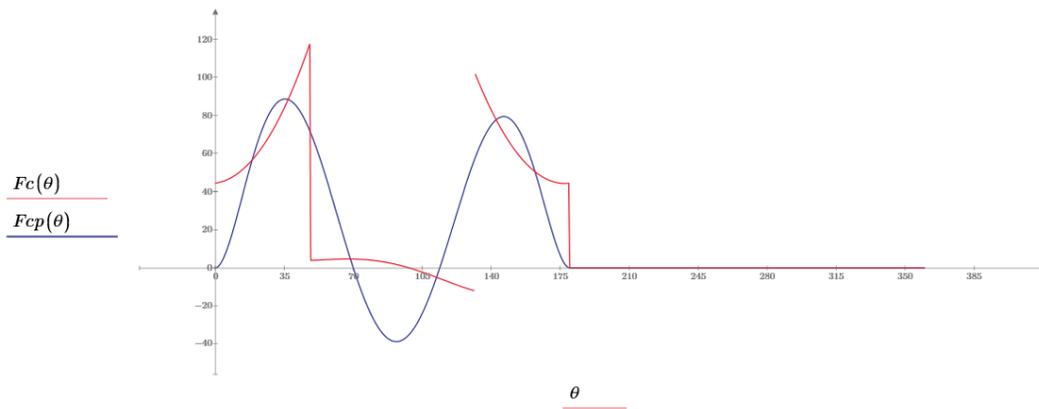
$$\beta_1 := 48.44 * \frac{\pi}{180} \quad \beta_2 := 83.12 * \frac{\pi}{180} \quad \beta_3 := 48.44 * \frac{\pi}{180}$$

Para el análisis dinámico de la leva primero procedemos a encontrar la fuerza de contacto de la leva polinomial 45678, considerando las ecuaciones de posición, velocidad, aceleración encontrada en el análisis estático de la misma, no existe precarga y la constante de C será igual a 10.921, de esto tenemos lo siguiente:

$$F_{cp}(\theta) := \left(m * \frac{ap(\theta) * \left(\frac{180}{\pi} \right)^2}{1000} * w^2 \right) + \left(C * \frac{vp(\theta) * \frac{180}{\pi}}{1000} * w \right) + \frac{k_2}{1000} * sp(\theta) + Precarga$$

Figura 42

Fuerza de contacto leva polinomial 45678



Nota: fuerza de contacto de la leva polinomial 45678, donde el comportamiento es armónico, no existe tanto golpeteo de acuerdo a la gráfica.

Como se puede observar en la figura está la comparativa de la fuerza de contacto de la leva convexa tipo B de color rojo con respecto a la fuerza de contacto de la leva polinomial 45678 de color azul, de esta forma podemos determinar que el despegue que se obtendrá con la leva polinomial 45678

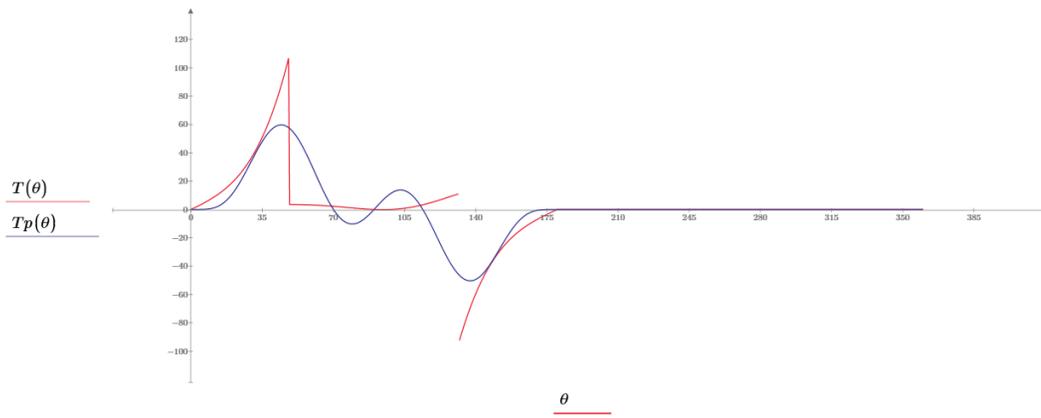
será mejor que el de la leva con la que se compara, el despegue será sumamente reducido a estos parámetros a los que se está implementando.

Para el siguiente análisis realizamos la gráfica del par torsión, de esta forma la ecuación que gobierna esto se da de la siguiente manera:

$$Tf(\theta) := Fcp(\theta) * \frac{vp(\theta) * \frac{180}{\pi}}{w}$$

Figura 43

Par torsional leva polinomial 45678



Nota: torque de la leva polinomial 45678 se ve una mejora en comparativa con la leva convexa tipo B.

En la gráfica de par torsión se observa una mejora de la leva polinomial 45678 de color azul con respecto a la leva convexa tipo B de color rojo, haciendo que el comportamiento de la leva con los parámetros del equipo TM1021 – cam analysis machine main unit se suavicen haciendo referencia a que el golpeteo y sobresalto no exista a gran magnitud.

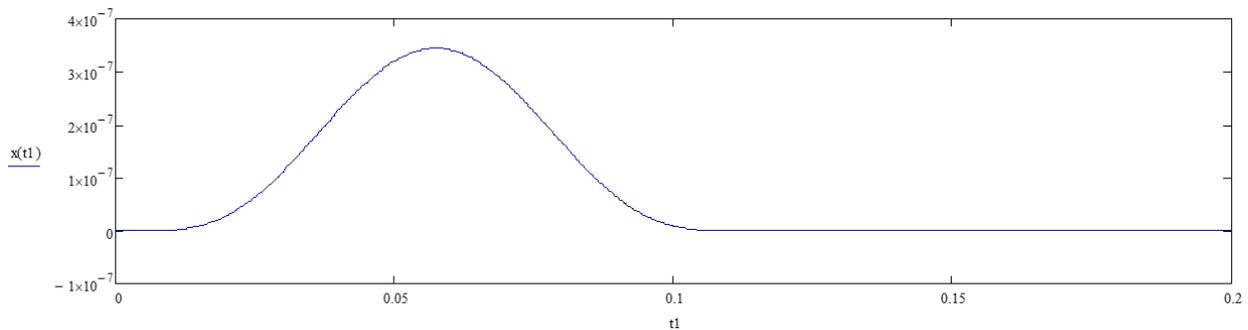
Cabe mencionar que el seguidor se mantiene en contacto con la leva por ayuda del resorte y el amortiguador que se encuentra en contacto con el vástago que corresponde a la fricción viscosa entre el vástago y el cojinete (Olmedo & Echeverría, 2018), con estas consideraciones se puede escribir la ecuación del modelo determinístico de la siguiente manera:

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

Debemos resolver la ecuación diferencial, para esto usaremos la función “Odesolve” propia del software libre Mathcad donde se agregan las condiciones iniciales, las ecuaciones propias y de manera implícita nos devuelve las ecuaciones resueltas y evaluadas en los puntos que se hayan indicado (McConville, 2015).

Figura 44

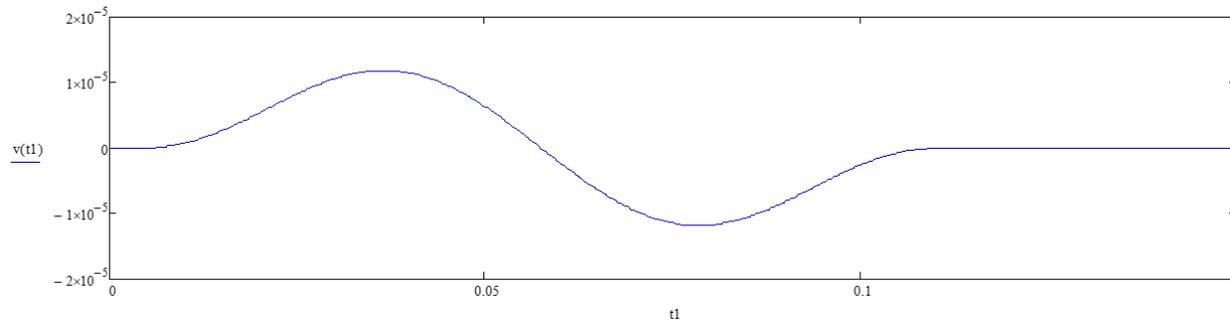
Gráfica de posición del análisis dinámico leva polinomial 45678



Nota: Gráfica de la posición de la leva polinomial 45678 con respecto a la respuesta dinámica.

Figura 45

Gráfica de velocidad del análisis dinámico leva polinomial 45678



Nota: Gráfica de la velocidad de la leva polinomial 45678 con respecto a la respuesta dinámica.

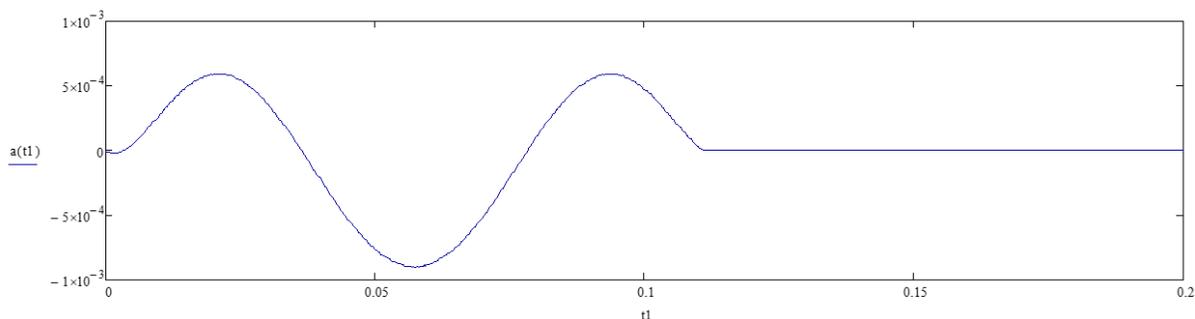
Como se puede observar en las gráficas de posición y velocidad de la leva polinomial 45678, no existe una presencia considerable de vibración, por lo que podemos afirmar que la leva no se ve afectada por este factor bajo las condiciones de diseño implementadas para su fabricación, con esto se procede a la realización de otros análisis.

Para la obtención de la ecuación de la aceleración se tiene lo siguiente:

$$a(t1) := \frac{v\left(t1 + \frac{T1}{1000}\right) - v(t1)}{\frac{T1}{1000}}$$

Figura 46

Gráfica de aceleración del análisis dinámico leva polinomial 45678



Nota: Gráfica de la aceleración de la leva polinomial 45678 con respecto a la respuesta dinámica.

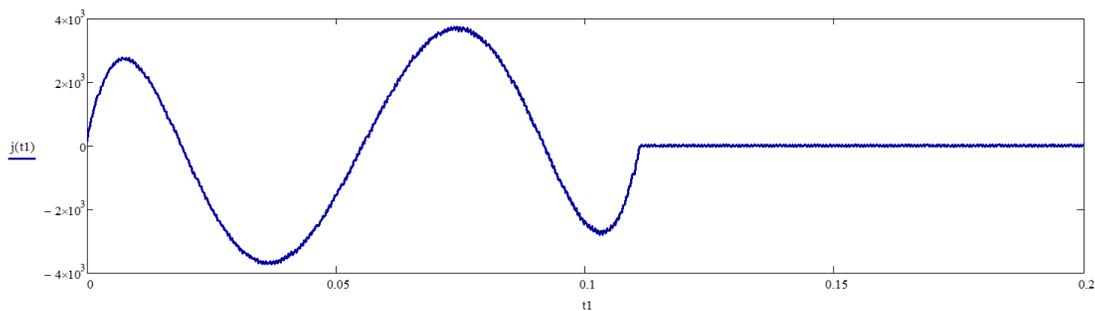
De igual forma en la gráfica de aceleración de la leva polinomial 45678 aún no se sigue evidenciando vibración a lo largo de la gráfica, por lo que la leva no se ve afectada en ningún aspecto ante estos parámetros.

Para la obtención de la ecuación de sobre aceleración tendremos:

$$j(t1) := \frac{a\left(t1 + \frac{T1}{1000}\right) - a(t1)}{\frac{T1}{1000}}$$

Figura 47

Gráfica de sobre aceleración del análisis dinámico leva polinomial 45678



Nota: Gráfica de la sobre aceleración de la leva polinomial 45678 con respecto a la respuesta dinámica.

En el análisis de sobre aceleración donde determina que tan rápido es la aceleración de la leva durante el ciclo de trabajo, se puede determinar que la vibración empieza a desarrollarse de manera constante, sin embargo, cabe mencionar que en el equipo TM1021 – CAM ANALYSIS MACHINE MAIN UNIT existe un volante de inercia seguido del vástago del motor, lo cual hará que esta vibración se reduzca considerablemente bajo las condiciones de funcionamiento.

Leva polidínica

Para el análisis de la respuesta dinámica de la leva polidínica primero debemos analizar la fuerza de contacto de la leva, para esto tenemos los siguientes parámetros con los que realizaremos el análisis dinámico de cada leva.

Necesitamos las constantes del vástago y del resorte:

$$k1 := 220000000 \frac{N}{m} \quad k2 := 3770 \frac{N}{m}$$

La altura de trabajo del seguidor a la cual estará configurado el equipo:

$$h := \frac{20}{1000} [m]$$

La masa total del sistema:

$$mf := 0.239 [kg] \text{ masa del seguidor}$$

$$ms := 1.915 [kg] \text{ masa del vástago}$$

$$mr := 0.043 [kg] \text{ masa del resorte}$$

$$ma := 2 [kg] \text{ masa adicional}$$

$$m := mf + ms + mr + ma = 4.197 [kg]$$

Las revoluciones de trabajo del equipo y la transformación de la misma a rad/seg:

$$N := 270 [rpm] \quad w := N * 2 * \frac{\pi}{60} = 28,274 \left[\frac{rad}{seg} \right]$$

Limitamos los ángulos de la leva con el que se realizará el análisis:

$$\beta_1 := 48.44 * \frac{\pi}{180} \quad \beta_2 := 83.12 * \frac{\pi}{180} \quad \beta_3 := 48.44 * \frac{\pi}{180}$$

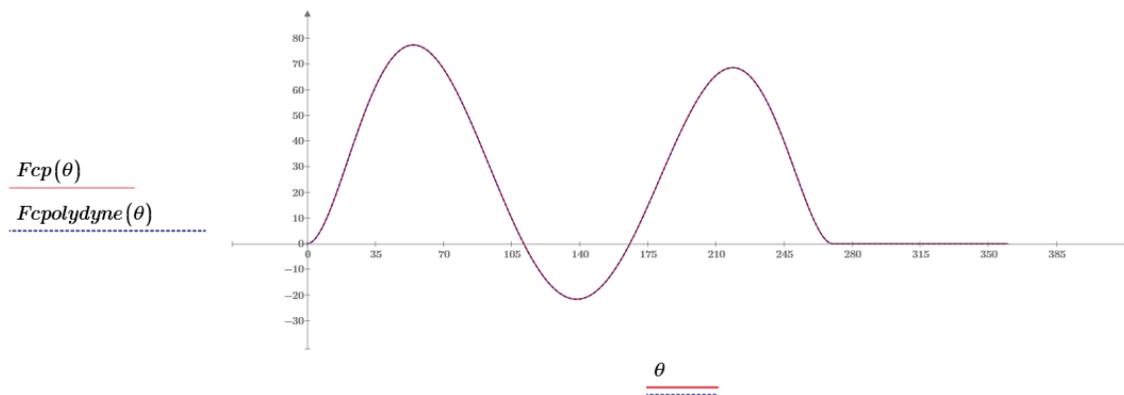
Para el análisis dinámico de la leva primero procedemos a encontrar la fuerza de contacto de la leva polidínica, considerando las ecuaciones de posición, velocidad, aceleración encontrada en el análisis estático de la misma, no existe precarga y la constante de C será igual a 15.095, de esto tenemos lo siguiente:

$$F_{cpolydyne}(\theta) := \left(m * \frac{apolydyne(\theta) * \left(\frac{180}{\pi}\right)^2}{1000} * w^2 \right) + \left(C * \frac{vpolydyne(\theta) * \frac{180}{\pi} * w}{1000} \right) + \frac{k2}{1000}$$

* spolydyne(θ) + Precarga

Figura 48

Fuerza de contacto leva polidínica



Nota: fuerza de contacto de la leva polidínica totalmente ajustada con la corrección realizada antes de la obtención de su perfil.

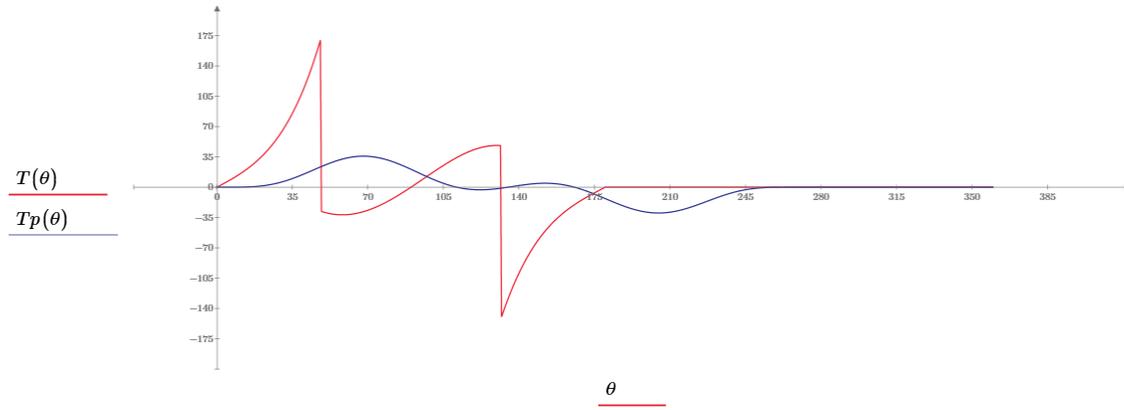
Como se puede observar en la figura está la comparativa de la fuerza de contacto de la leva convexa tipo B de color rojo con respecto a la fuerza de contacto de la leva polidínica de color azul, de esta forma podemos determinar que el despegue que se obtendrá con la leva polidínica será mejor que el de la leva con la que se compara, el despegue será sumamente reducido a estos parámetros a los que se está implementando.

Para el siguiente análisis realizamos la gráfica del par torsión, de esta forma la ecuación que gobierna esto se da de la siguiente manera:

$$T_p(\theta) := F_{cpolydyne}(\theta) * \frac{vpolydyne(\theta) * \frac{180}{\pi}}{w}$$

Figura 49

Par torsional leva polidínica



Nota: el torque de la leva polidínica es sumamente bajo en comparativa con la leva convexa tipo B, tiene un comportamiento armónico.

En la gráfica de par torsión se observa una mejora de la leva polidínica de color azul con respecto a la leva convexa tipo B de color rojo, haciendo que el comportamiento de la leva con los parámetros del equipo TM1021 – cam analys machine main unit se suavicen haciendo referencia a que el golpeteo y sobresalto no exista a gran magnitud, donde el pico más alto de la leva polidínica llega a 35, comparado con la leva convexa tipo B que llega a 175.

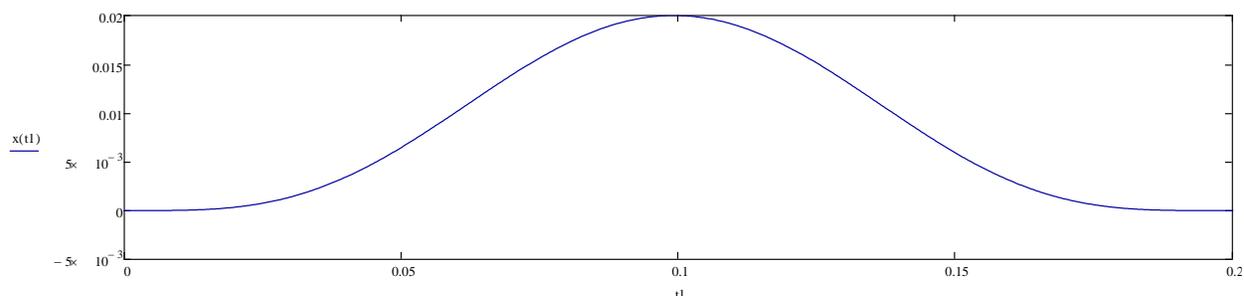
Cabe mencionar que el seguidor se mantiene en contacto con la leva por ayuda del resorte y el amortiguador que se encuentra en contacto con el vástago que corresponde a la fricción viscosa entre el vástago y el cojinete (Olmedo & Echeverría, 2018), con estas consideraciones se puede escribir la ecuación del modelo determinístico de la siguiente manera:

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

Debemos resolver la ecuación diferencial, para esto usaremos la función “Odesolve” propia del software libre Mathcad donde se agregan las condiciones iniciales, las ecuaciones propias y de manera implícita nos devuelve las ecuaciones resueltas y evaluadas en los puntos que se hayan indicado.

Figura 50

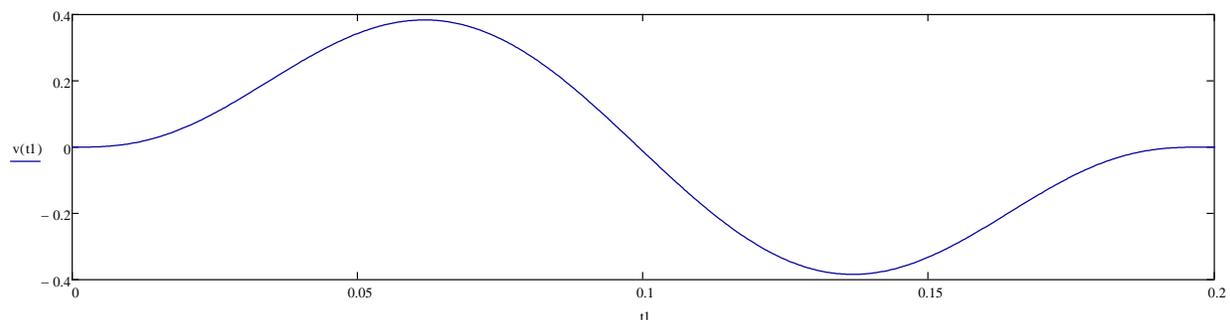
Gráfica de posición del análisis dinámico leva polidínica



Nota: Gráfica de la posición de la leva polidínica 45678 con respecto a la respuesta dinámica.

Figura 51

Gráfica de velocidad del análisis dinámico leva polidínica



Nota: Gráfica de la velocidad de la leva polidínica 45678 con respecto a la respuesta dinámica.

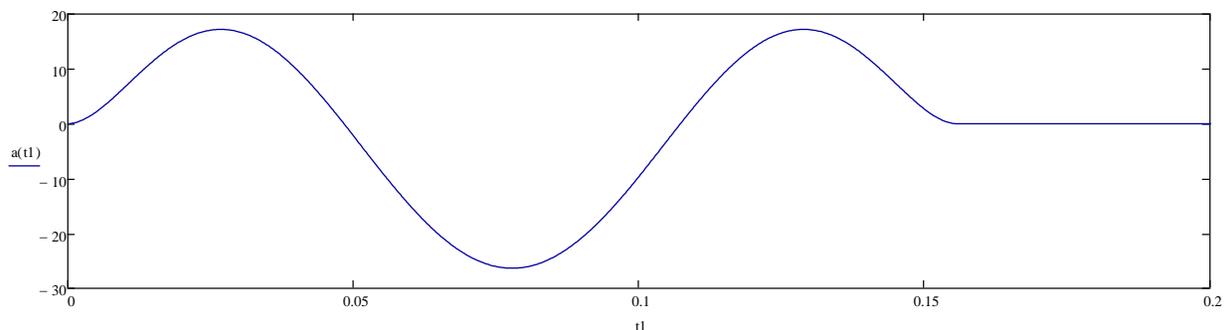
Como se puede observar en las gráficas de posición y velocidad de la leva polidínica 45678, existe una presencia considerable de vibración en la velocidad, por lo cual este factor será evidente en el funcionamiento del equipo TM1021 – cam analyis machine main unit donde se notará esta vibración en todo momento de funcionamiento de la leva.

Para la obtención de la ecuación de la aceleración se tiene lo siguiente:

$$a(t1) := \frac{v\left(t1 + \frac{T1}{1000}\right) - v(t1)}{\frac{T1}{1000}}$$

Figura 52

Gráfica de aceleración del análisis dinámico leva polidínica



Nota: Gráfica de la aceleración de la leva polidínica 45678 con respecto a la respuesta dinámica.

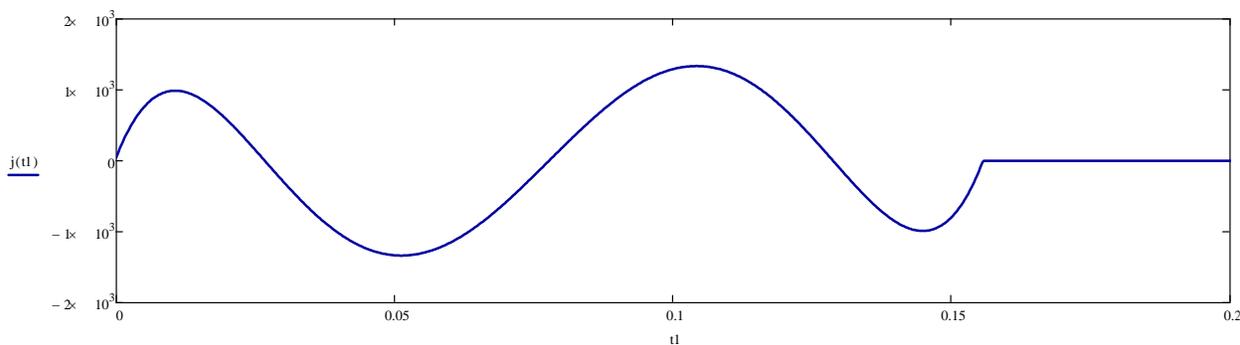
En la gráfica de aceleración de la leva polidínica 45678 se sigue evidenciando vibración a lo largo de la gráfica, por lo que la leva no se ve afectada ante estos parámetros establecidos de funcionamiento.

Para la obtención de la ecuación de sobre aceleración tendremos:

$$j(t1) := \frac{a\left(t1 + \frac{T1}{1000}\right) - a(t1)}{\frac{T1}{1000}}$$

Figura 53

Gráfica de sobre aceleración del análisis dinámico leva polidínica



Nota: Gráfica de la sobre aceleración de la leva polidínica 45678 con respecto a la respuesta dinámica.

En el análisis de sobre aceleración donde determina que tan rápido es la aceleración de la leva durante el ciclo de trabajo, se puede determinar que la vibración empieza a desarrollarse de manera constante a lo largo del análisis, con geometría simétricas hasta cierto ángulo de llegada, sin embargo, cabe mencionar que en el equipo TM1021 – cam analysis machine main unit existe un volante de inercia seguido del vástago del motor, lo cual hará que esta vibración se reduzca considerablemente bajo las condiciones de funcionamiento.

Leva de Fourier

Para el análisis de la respuesta dinámica de la leva de la serie de Fourier de grado 13, primero debemos analizar la fuerza de contacto de la leva, para esto tenemos los siguientes parámetros con los que realizaremos el análisis dinámico de cada leva.

Necesitamos las constantes del vástago y del resorte:

$$k1 := 220000000 \frac{N}{m} \quad k2 := 3770 \frac{N}{m}$$

La altura de trabajo del seguidor a la cual estará configurado el equipo:

$$h := \frac{20}{1000} [m]$$

La masa total del sistema:

$$mf := 0.239[kg] \text{ masa del seguidor}$$

$$ms := 1.915[kg] \text{ masa del vástago}$$

$$mr := 0.043[kg] \text{ masa del resorte}$$

$$m := mf + ms + mr = 2.197[kg]$$

Las revoluciones de trabajo del equipo y la transformación de la misma a rad/seg:

$$N := 270 [rpm] \quad w := N * 2 * \frac{\pi}{60} = 28,274 \left[\frac{rad}{seg} \right]$$

Limitamos los ángulos de la leva con el que se realizará el análisis:

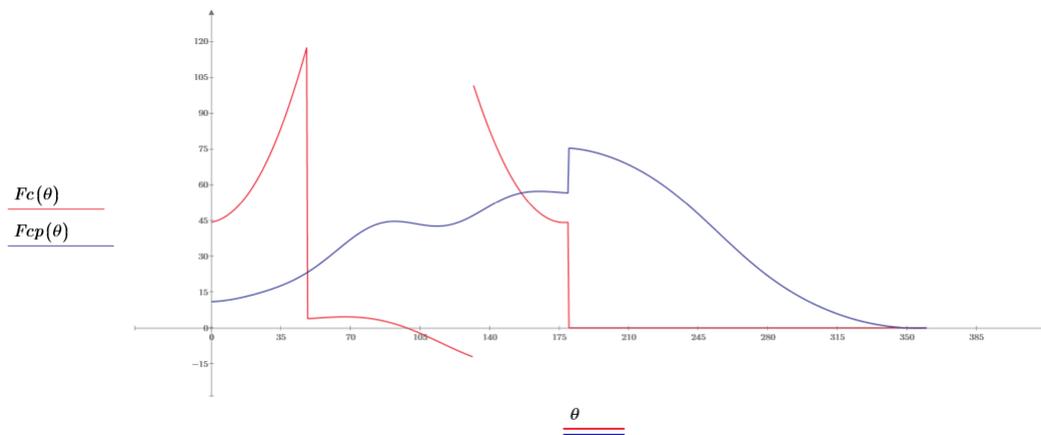
$$\beta_1 := 48.44 * \frac{\pi}{180} \quad \beta_2 := 83.12 * \frac{\pi}{180} \quad \beta_3 := 48.44 * \frac{\pi}{180}$$

Para el análisis dinámico de la leva primero procedemos a encontrar la fuerza de contacto de la leva de la serie de Fourier grado 13, considerando las ecuaciones de posición, velocidad, aceleración encontrada en el análisis estático de la misma, no existe precarga y la constante de C será igual a 7.2, de esto tenemos lo siguiente:

$$F_{cp}(\theta) := \left(m * \frac{ap(\theta) * \left(\frac{180}{\pi}\right)^2}{1000} * w^2 \right) + \left(C * \frac{vp(\theta) * \frac{180}{\pi} * w}{1000} \right) + \frac{k2}{1000} * sp(\theta) + Precarga$$

Figura 54

Fuerza de contacto leva de Fourier



Nota: fuerza de contacto de la leva de la serie de Fourier grado 13, no existe golpeteo ni despegue trabajando a los 270 rpm.

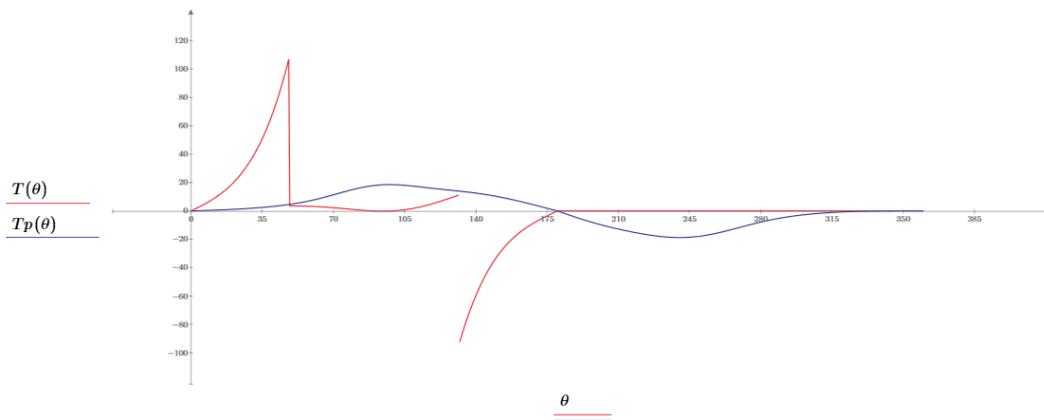
Como se puede observar en la figura está la comparativa de la fuerza de contacto de la leva convexa tipo B de color rojo con respecto a la fuerza de contacto de la leva de la serie de Fourier grado 13, de color azul, de esta forma podemos determinar que el despegue que se obtendrá con la leva de la serie de Fourier será mejor que el de la leva con la que se compara, el despegue será sumamente reducido a estos parámetros a los que se está implementando, como se observa el comportamiento de la fuerza de contacto es creciente hasta los 180 grados, posterior a eso decrece la fuerza de contacto hasta llegar a cero a los 360 grados.

Para el siguiente análisis realizamos la gráfica del par torsión, de esta forma la ecuación que gobierna esto se da de la siguiente manera:

$$Tp(\theta) := Fcp(\theta) * \frac{vp(\theta) * \frac{180}{\pi}}{w}$$

Figura 55

Par torsión leva de Fourier



Nota: torque de la leva de la serie de Fourier grado 13, no es considerable el torque que existe en esta leva, no se evidencia despegue de la leva con respecto al seguidor.

En la gráfica de par torsión se observa una mejora de la leva polidínica de color azul con respecto a la leva convexa tipo B de color rojo, haciendo que el comportamiento de la leva con los parámetros del equipo TM1021 – cam analys machine main unit se suavicen haciendo referencia a que el golpeteo y sobresalto no exista a gran magnitud, donde el pico más alto de la leva de la serie de Fourier llega a 20, comparado con la leva convexa tipo B que llega a 110.

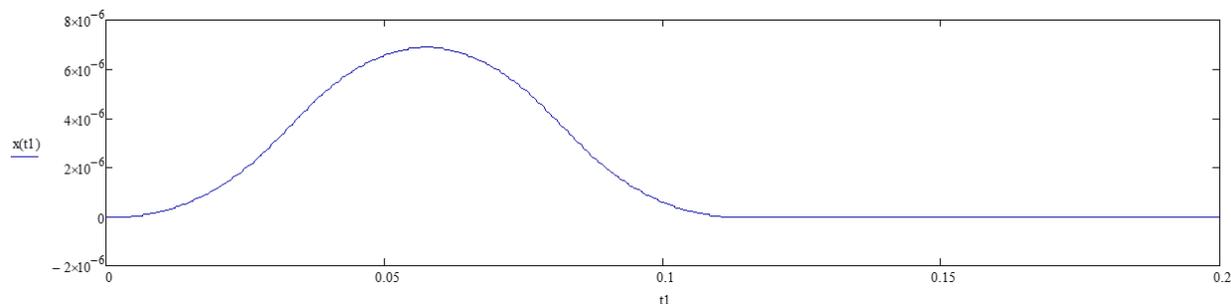
Cabe mencionar que el seguidor se mantiene en contacto con la leva por ayuda del resorte y el amortiguador que se encuentra en contacto con el vástago que corresponde a la fricción viscosa entre el vástago y el cojinete (Olmedo & Echeverría, 2018), con estas consideraciones se puede escribir la ecuación del modelo determinístico de la siguiente manera:

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

Debemos resolver la ecuación diferencial, para esto usaremos la función “Odesolve” propia del software libre Mathcad donde se agregan las condiciones iniciales, las ecuaciones propias y de manera implícita nos devuelve las ecuaciones resueltas y evaluadas en los puntos que se hayan indicado.

Figura 56

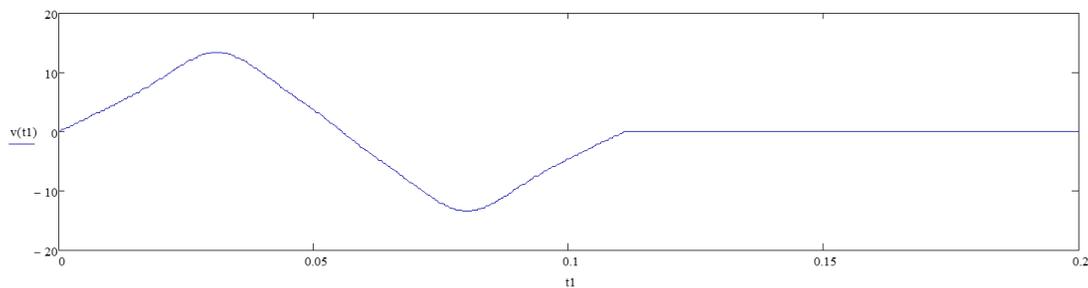
Gráfica de posición del análisis dinámico de la leva de Fourier



Nota: Gráfica de la posición de la leva de la serie de Fourier grado 13 con respecto a la respuesta dinámica.

Figura 57

Gráfica de velocidad del análisis dinámico de la leva de Fourier



Nota: Gráfica de la velocidad de la leva de la serie de Fourier grado 13 con respecto a la respuesta dinámica.

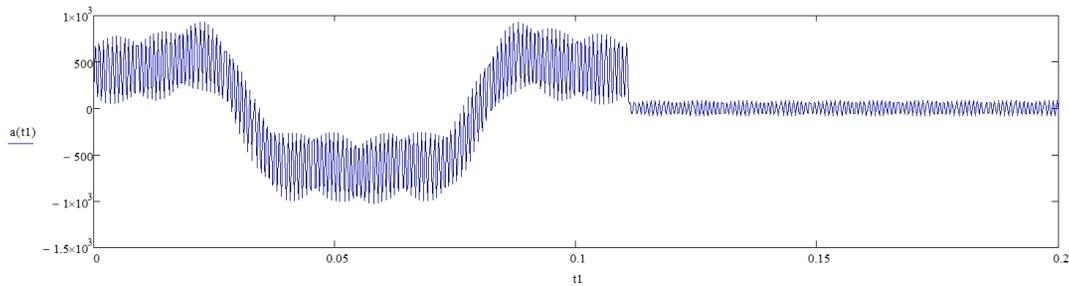
Como se puede observar en las gráficas de posición y velocidad de la leva de la serie de Fourier grado 13, existe una presencia considerable de vibración en la velocidad, por lo cual este factor será evidente en el funcionamiento del equipo TM1021 – CAM ANALYSIS MACHINE MAIN UNIT donde se notará esta característica.

Para la obtención de la ecuación de la aceleración se tiene lo siguiente:

$$a(t1) := \frac{v\left(t1 + \frac{T1}{1000}\right) - v(t1)}{\frac{T1}{1000}}$$

Figura 58

Gráfica de aceleración del análisis dinámico de la leva de Fourier



Nota: Gráfica de la aceleración de la leva de la serie de Fourier grado 13 con respecto a la respuesta dinámica.

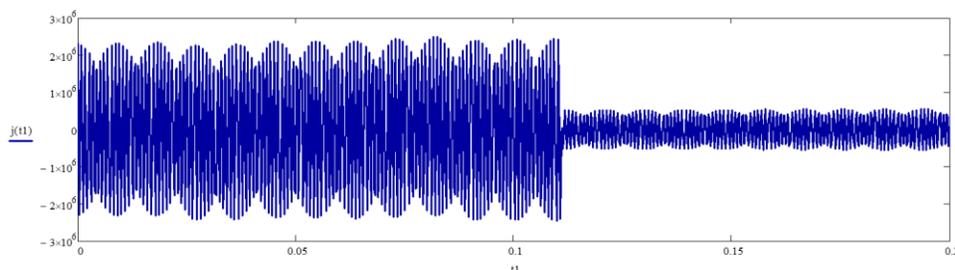
En la gráfica de aceleración de la leva de la serie de Fourier de grado 13 sigue evidenciando vibración más inestable y de una amplia magnitud a lo largo de la gráfica, llegando aproximadamente a los 200 grados centígrados y posterior a esto se reduce considerablemente el factor de la vibración.

Para la obtención de la ecuación de sobre aceleración tendremos:

$$j(t1) := \frac{a\left(t1 + \frac{T1}{1000}\right) - a(t1)}{\frac{T1}{1000}}$$

Figura 59

Gráfica de sobre aceleración del análisis dinámico de la leva de Fourier



Nota: Gráfica de la sobre aceleración de la leva de la serie de Fourier grado 13 con respecto a la respuesta dinámica.

En el análisis de sobre aceleración donde determina que tan rápido es la aceleración de la leva durante el ciclo de trabajo, se puede determinar que la vibración empieza a desarrollarse de manera constante a lo largo del análisis, con geometría simétricas hasta cierto ángulo de llegada, la vibración es muy inestable hasta aproximadamente los 200 grados, posterior a esto la vibración reduce considerablemente y se mantiene estable hasta culminar con el ciclo de funcionamiento, sin embargo, cabe mencionar que en el equipo TM1021 – cam analyis machine main unit existe un volante de inercia seguido del vástago del motor, lo cual hará que esta vibración se reduzca considerablemente bajo las condiciones de funcionamiento.

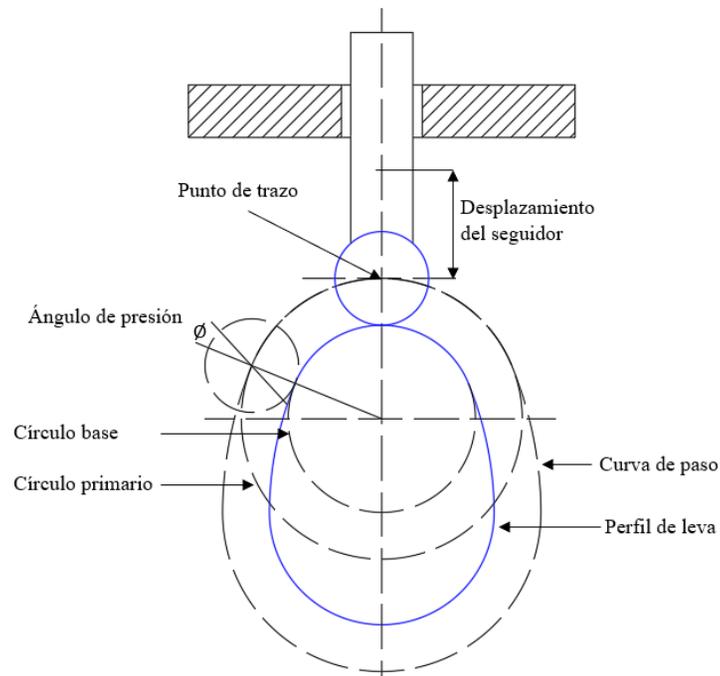
Capítulo Diseño y Simulación

Diseño y modelamiento CAD

Los mecanismos leva – seguidor constan con una serie de nomenclaturas esenciales para la fabricación de las mismas, las cuales podemos observar en la imagen.

Figura 60

Esquema general de las partes de una leva



Nota: esquema de una leva con sus respectivas partes, para tener una mejor comprensión de la función de cada parte de la leva.

Las partes de este mecanismo son:

- Punto de trazo: es el punto teórico ubicado en el centro del seguidor de rodillo o en el punto medio de la superficie de un seguidor de cara plana.
- Curva de paso: es el lugar geométrico generado por el punto de trazo y donde describe una trayectoria similar al perfil de la leva, pero separada de esta por el radio del rodillo.
- Círculo primario: es el círculo más pequeño que se puede trazar con centro en el eje de rotación de la leva y tangente a la curva de paso.

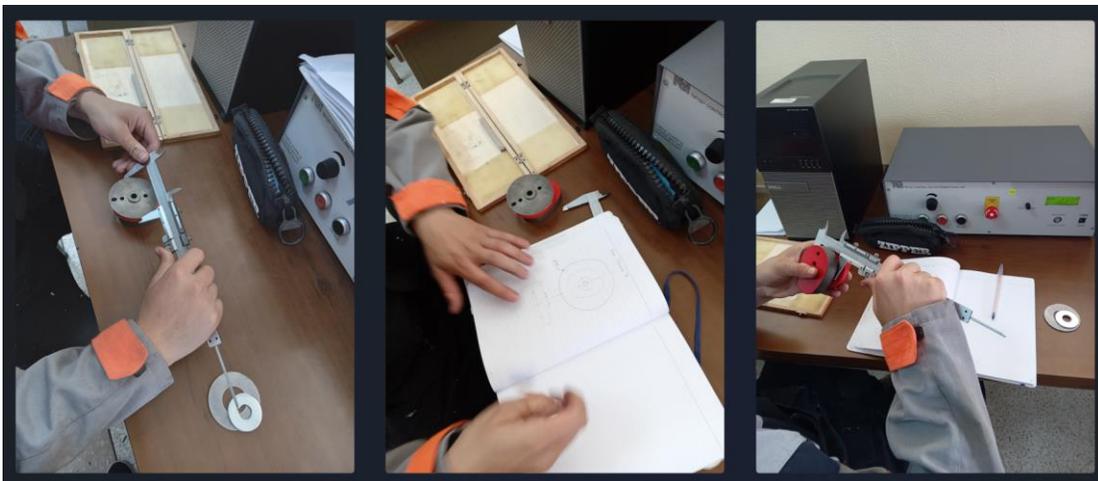
- Círculo base: es el círculo más pequeño que se puede trazar con centro en el eje de rotación de la leva y tangente al perfil de ella.
- Ángulo de presión: es el ángulo comprendido entre la dirección del desplazamiento del seguidor y la normal a la superficie de la leva en ese punto de tangencia.
- Perfil de la leva: es el contorno de la superficie de trabajo de la leva.
- Desplazamiento del seguidor: se define como la posición del mecanismo seguidor a partir de un punto específico denominado cero o reposo, en relación con el tiempo o con alguna fracción del ciclo de la maquinaria medida en forma angular.

(Sánchez & Burstein, 2009)

Para el diseño de las levas se tomó como referencia la leva convexa tipo B propia del equipo TM1021 – cam analys machine main unit del laboratorio de mecanismos, se elige la leva convexa tipo B dado que con esta leva se realizará las comparaciones respectivas con las levas polinomial 4567 y polidínica que se fabricará, de esta forma se tuvieron medidas referenciales para el diseño de las levas ya mencionadas como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 61

Toma de medidas referenciales de una leva



Nota: toma de medidas de la leva convexa tipo B, con ayuda de un pie de rey “calibrador” que sirva como base para las levas que están planificadas para su fabricación.

Tal como se puede observar en la ilustración se utilizó un pie de rey que tiene una precisión de 0.02 mm, de esta forma se pudo obtener de manera efectiva las dimensiones de las bases de la leva. Sin embargo, para obtener una mayor precisión de las medidas de la leva convexa tipo B se hizo uso del equipo propio del laboratorio de metrología.

Figura 62

Equipo de validación metrológica



Nota: equipo de validación de metrología ZEISS, con sus respectivas especificaciones técnicas, el equipo se encuentra en el laboratorio de metrología.

Tabla 3

Especificaciones técnicas del equipo ZEISS

ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO	
Volumen de medición	500X500x500 mm ³
Error de medición de longitud E0 en μm	2.4 + L/300 18°C – 22°C
E0/E40 en μm MPE según ISO 10360-2:2009	
Rango de temperatura ampliado (ZEISS TVA 1)	2.7 + L/250 18°C – 26°C
E0/E40 en μm	
Rango de temperatura ampliado (ZEISS TVA 2)	2.9 + L/200 18°C – 30°C
E0/E40 en μm	
Software	ZEISS CALYPSO
Sensor táctil	VAST XXT TL 3
Longitud de la aguja	radialmente hasta 65 mm (punta de estrella)

Diámetro de la sonda

0.3 – 8 mm

Nota: especificaciones técnicas del equipo de validación metrológica ZEISS, por página principal de ZEISS 2022

La máquina Zeiss es un instrumento computacional de validación metrológica que sirve para determinar medidas de diversas piezas por medio del control de coordenadas y diferentes sensores en punta que posee de acuerdo a la geometría de la pieza que se vaya a realizar la medición.

Figura 63

Limitaciones del equipo de validación metrológica ZEISS

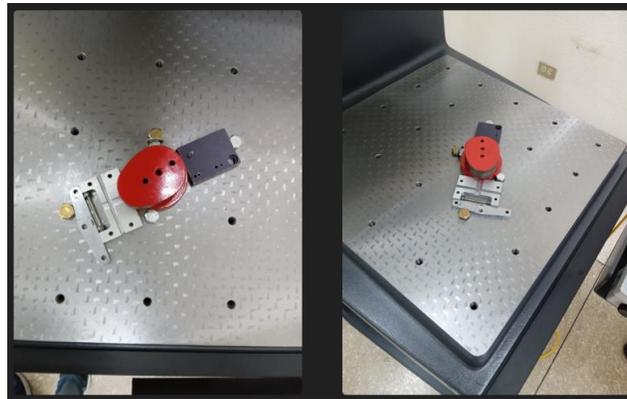


Nota: limitaciones del equipo para la toma de medidas, así como su dimensionamiento de la base, por ZEISS 2022.

Se utilizó la máquina ZEISS para comprobar las medidas de la leva convexa tipo B del laboratorio de mecanismos, de esta forma tendremos como referencia las medidas de esa leva convexa para poder fabricar las levas polinomial 4567, la leva polidínica y la leva de la serie de Fourier, lo que primero se procede a realizar es sujetar bien la leva a la base del equipo, para que no existe desbalances o errores en la toma de mediciones, valiéndonos de la ayuda de topes y pernos para que la leva quede fija a la mesa.

Figura 64

Sujeción de la leva en la mesa del equipo ZEISS

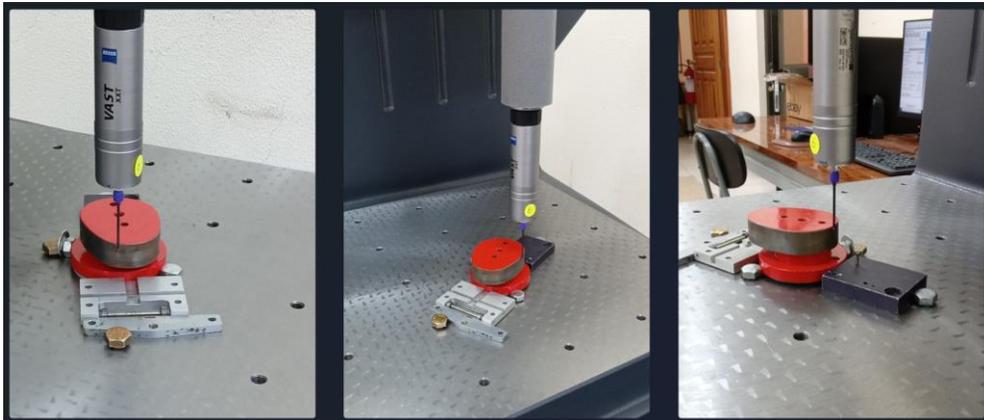


Nota: sujeción de la leva convexa tipo B a la mesa base del equipo ZEISS.

De esta manera comprobamos que la pieza quede bien sujeta, una vez comprobado esta acción, se configura la máquina para poder usar el sensor tipo lápiz de bola de 1 mm de diámetro para la toma de medidas.

Figura 65

Toma de puntos referenciales de la leva



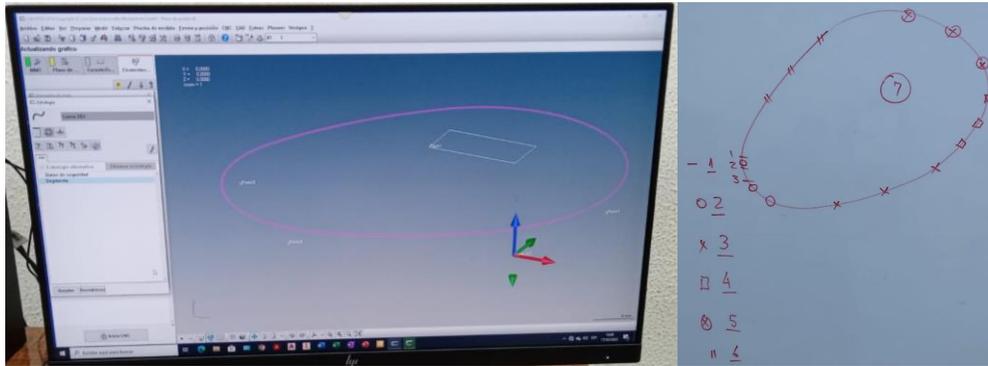
Nota: toma de puntos referenciales de la leva convexa tipo B antes de empezar con el corrido de las coordenadas del equipo ZEISS.

Como primer paso se realiza un barrido de la leva convexa, tomando como referencia ciertos puntos de la misma para que en el programa ZEISS calypso se tenga una referencia del perfil,

recordando que de igual forma debemos tener claro cuáles fueron las secuencias de la toma de puntos de referencia para la leva convexa, de esta forma tenemos la siguiente referencia:

Figura 66

Toma de puntos referenciales antes del barrido

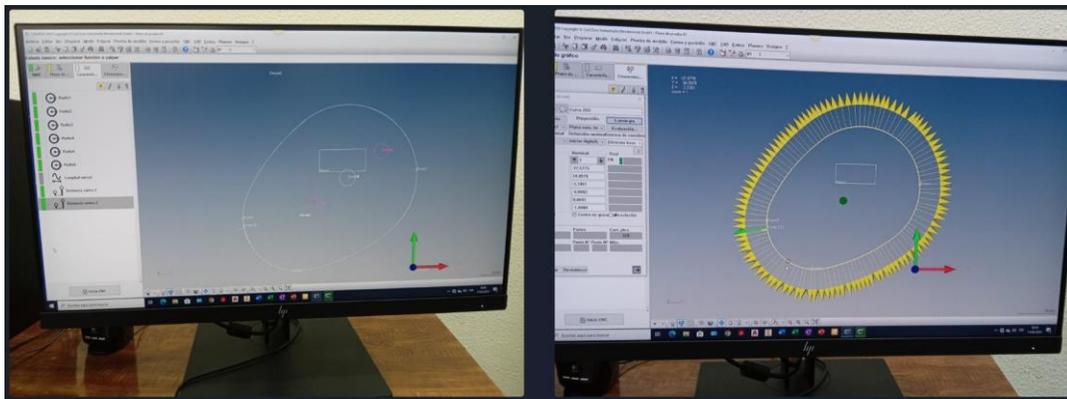


Nota: esquema de los puntos referenciales tomados con el puntero de 1 mm de diámetro y proyectado en el software del equipo ZEISS.

Después de haber tomado los puntos de la leva como referencia y haber identificado las secuencias de los puntos con símbolos como se evidencia en la imagen, se procede a realizar un barrido completo de la leva donde nos dará las dimensiones correctas al igual que la correcta ubicación de los agujeros de la leva, este barrido completo tomó un tiempo aproximado de 2 minutos en recorrer todo el perfil de la leva, así como en la ubicación de los agujeros.

Figura 67

Perfil de la leva en el programa calypso ZEISS

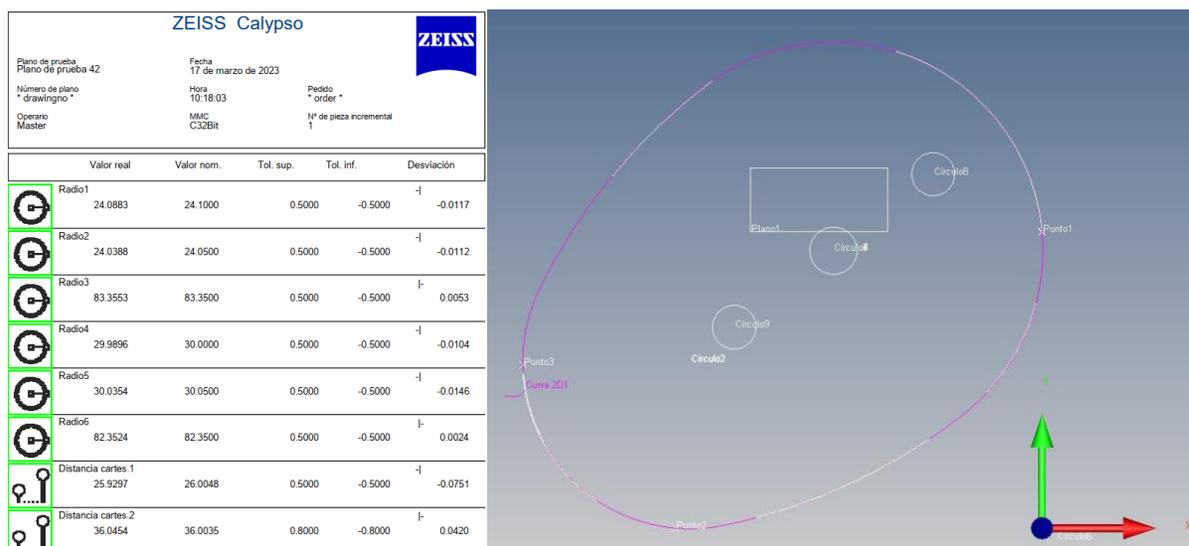


Nota: barrido final de la leva convexa tipo B con las dimensiones exactas y precisión de 1 mm.

Con el barrido completo de la leva convexa se tiene las medidas exactas, con un grado de precisión de una décima de milímetro, todos estos datos y medidas tomadas con ayuda del equipo ZEISS se exportaron a un archivo .IGS que tiene extensión para poder abrir en Autocad o Solidworks, recordemos que la figura generada por el programa es un plano, por lo que se encuentra en 2D, con esto podemos determinar un reporte donde nos especifica con más detalle las medidas de las partes donde se realizó el corrido.

Figura 68

Reporte dimensional de la leva



Nota: reporte dimensional de la leva convexa tipo B con ayuda del software ZEISS Calypso.

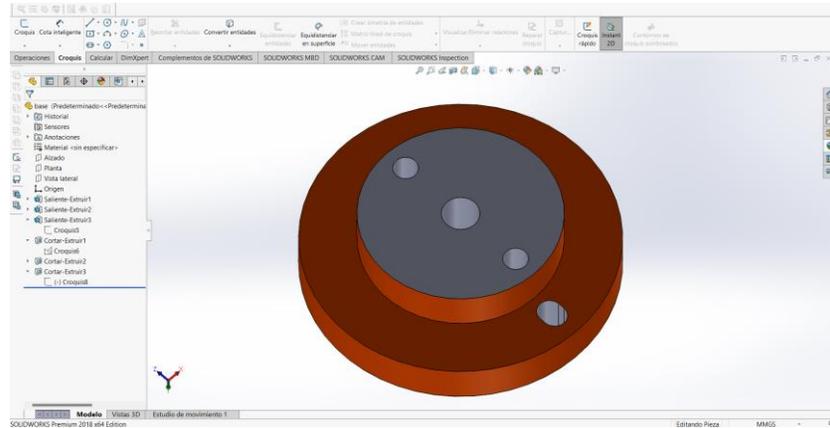
De esta manera es como tenemos las dimensiones de la leva convexa tipo B con una precisión de décima de milímetro para poder tener de referencia en la fabricación de las levas que se mencionaron en el estudio del presente documento, con este método de toma de medidas por coordenadas queda verificada de manera correcta la validación metrológica de esta leva, cabe mencionar que posterior a la fabricación, análisis y ensayos de las levas polinomial 45678, polidínica y la leva de las series de Fourier se procederá a realizar el mismo análisis metrológico para asegurar la validación de cálculos teóricos con los cálculos prácticos en la realización de la misma.

Teniendo todos estos parámetros básicos para el diseño de las levas se procedió a ingresar los datos en el software SolidWorks de donde se procedió a realizar lo siguiente:

Diseño de la base para las levas

Figura 69

Esquema de la base a utilizar en las levas

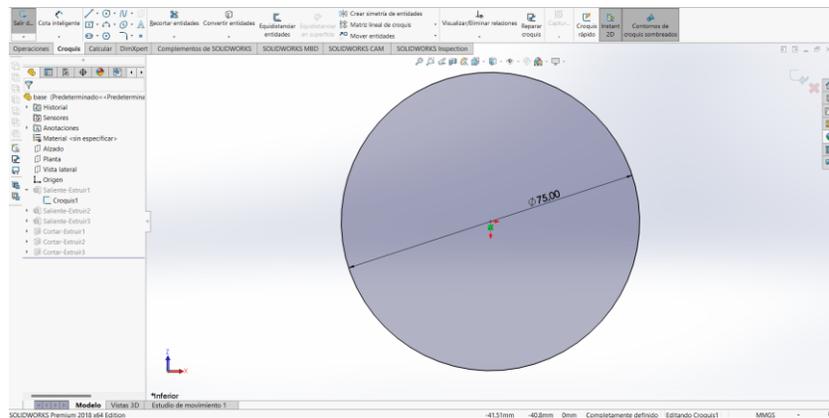


Nota: base referencial para la fabricación de las levas polinomial 45678, leva polidínica y la leva de la serie de Fourier de grado 13, esta base se acoplará directamente al equipo de levas del laboratorio de mecanismos.

Para la realización de la base de la leva tomamos en cuenta las dimensiones tomadas mediante la ayuda del equipo del laboratorio de metrología y con el pie de rey, de esta forma creamos un croquis con el diámetro que se muestra en la imagen, teniendo un espesor de 10 mm.

Figura 70

Croquis de la base

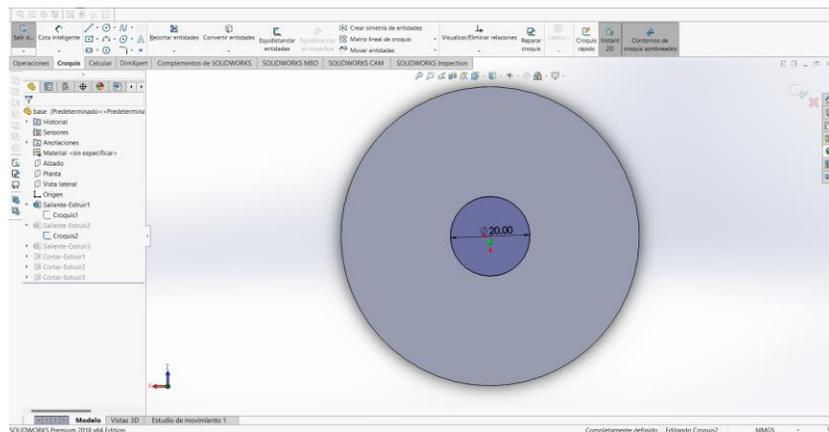


Nota: realización del croquis de la base de la leva, considerando las dimensiones tomadas con el equipo ZEISS.

En una de las caras del cilindro anteriormente de la ilustración procedemos a realizar una circunferencia de 20 mm de diámetro con una elevación de 3 mm de espesor, teniendo el siguiente esquema.

Figura 71

Arandela de fijación

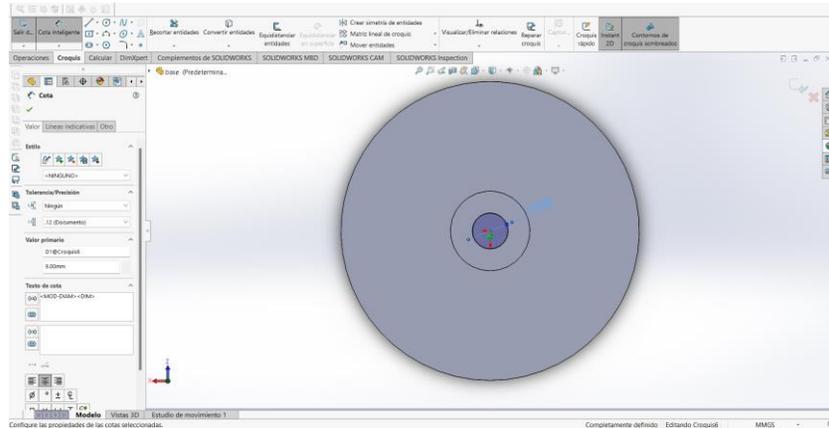


Nota: en la base de la leva se debe realizar una arandela que servirá para fijarla al equipo TM1021 – cam analysis machine main unit.

En la misma cara donde se realizó la circunferencia, se procede a realizar un corte pasante de una circunferencia de 9 mm de diámetro, de esta forma se culmina el croquis de este lado de la cara de la base.

Figura 72

Agujeros pasantes en la base

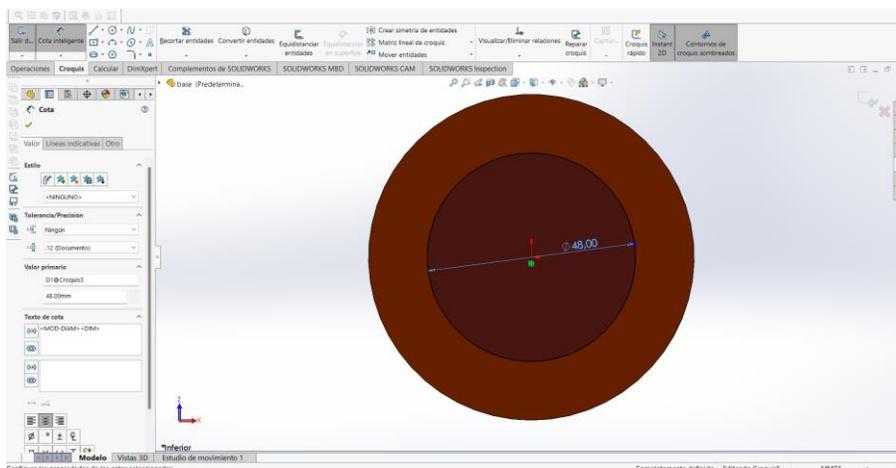


Nota: se realiza un agujero pasante en la base de la leva, donde se ajustará con ayuda de un perno.

Al otro lado de la cara de la base procedemos a realizar un croquis de una circunferencia de 48 mm de diámetro con un espesor de 10 mm que servirá como acople para las levas que se realizarán, de tal forma que nos queda de la siguiente manera.

Figura 73

Extrucción de los croquis de referencia

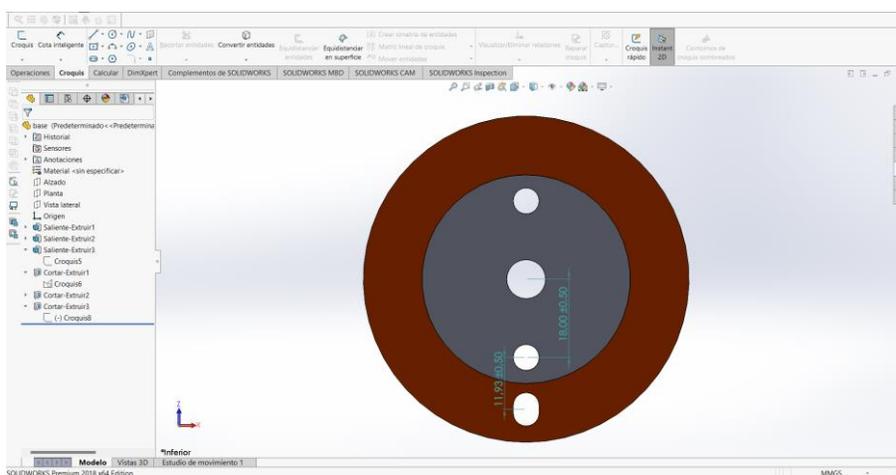


Nota: base de la leva creada con la unión que servirá para acoplar al perfil de las levas que se fabricarán.

En el mismo sentido de la cara de la base procedemos a realizar agujeros pasantes y un chavetero, de tal forma que se puede ver en la siguiente ilustración, cabe mencionar que las medidas en detalle de cada elemento se encontrarán en los planos adjuntos en la sección de apéndices.

Figura 74

Dimensionamiento de la base para las levas

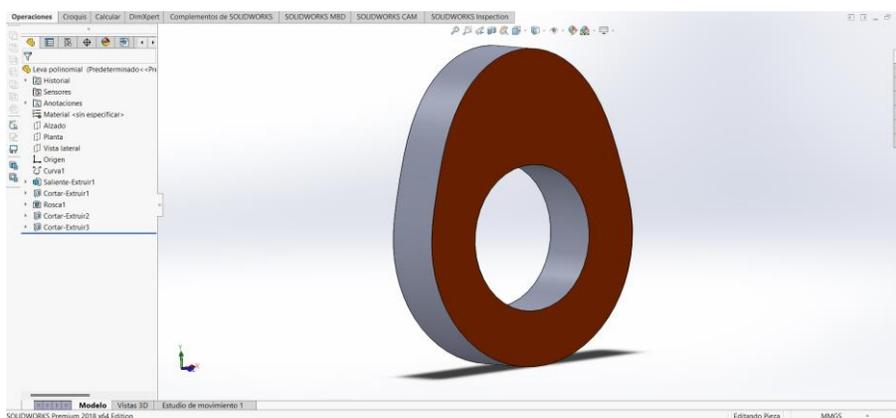


Nota: base para las levas culminado, con las especificaciones establecidas.

Diseño de la leva polinomial 45678

Figura 75

Esquema en 3D de la leva polinomial 45678



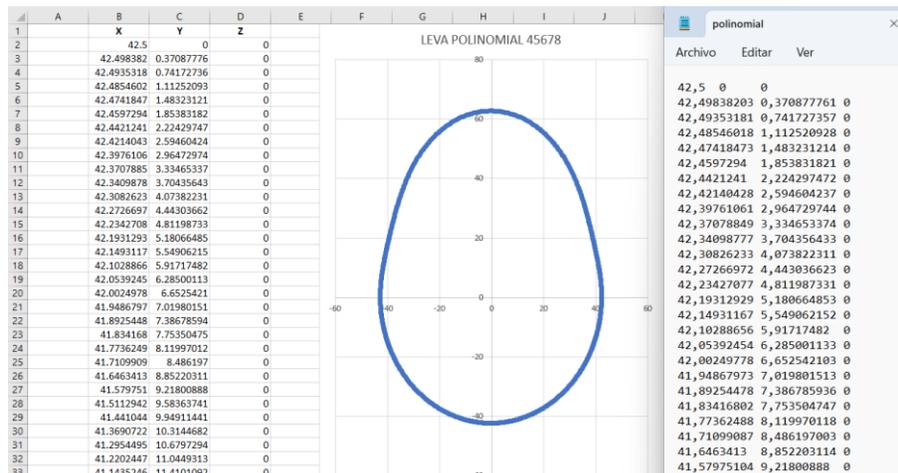
Nota: esquema final para el perfil de la leva polinomial 45678.

Con el análisis y diseño de la leva polinomial 45678 realizado en el “CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO” se determinó el perfil de la leva que se ajusta a los requerimientos establecidos del equipo y

de la leva convexa tipo B propia del equipo TM1021 – cam analys machine main unit de esta manera se obtuvieron las siguientes coordenadas para la gráfica respectiva de la leva.

Figura 76

Obtención de las coordenadas de la leva polinomial

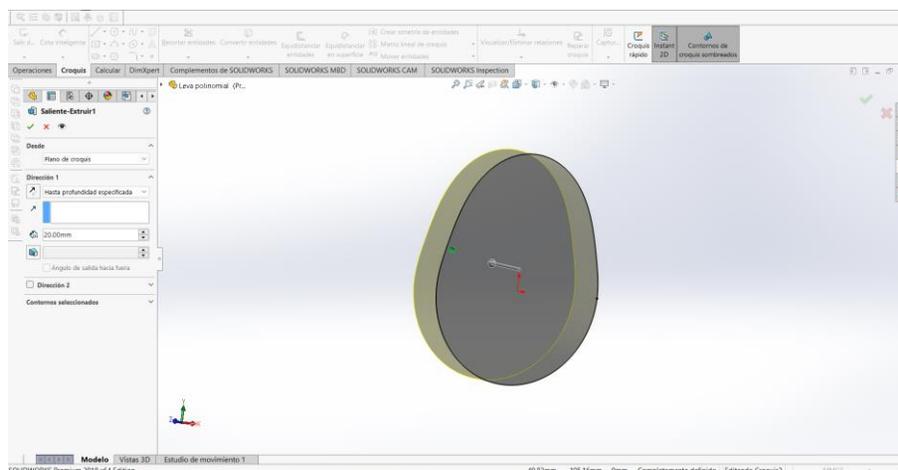


Nota: toma de coordenadas para la creación del perfil de la leva polinomial 45678.

Una vez teniendo las coordenadas para la leva polinomial 45678 se procede a importar las coordenadas en el software SolidWorks de esta forma tendremos el perfil en el programa y realizaremos una extrucción de 20 mm de espesor, de tal forma se obtendrá lo siguiente.

Figura 77

Extrucción de la leva polinomial

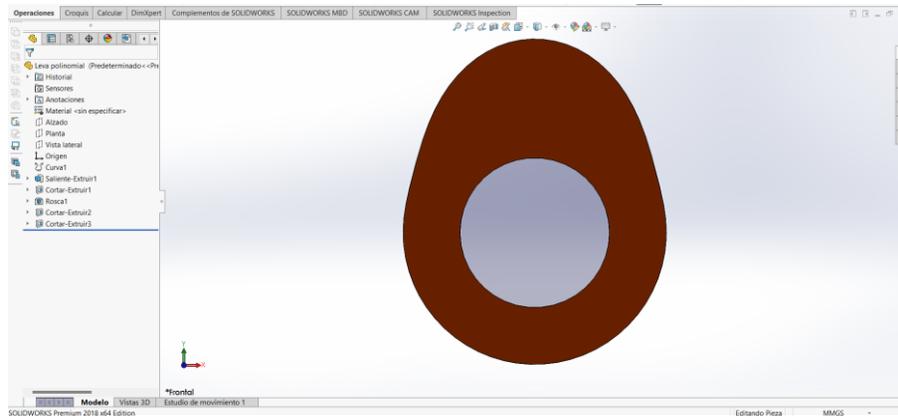


Nota: esquema de la leva polinomial 45678 en 3D, con ayuda del software Solid Works.

Posterior a este paso se realiza un agujero de 48.30 mm de diámetro, dado que la fabricación de la leva tiene dos piezas para ser ensambladas, de esto se tiene la siguiente gráfica:

Figura 78

Diseño de la leva polinomial a construir



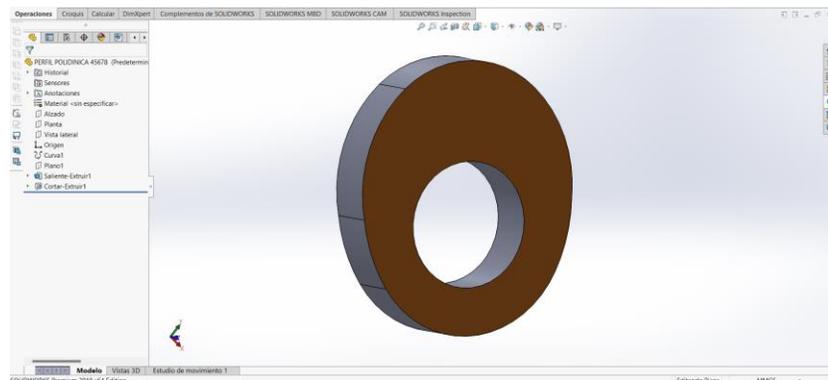
Nota: diseño final del perfil de la leva polinomial 45678, con el agujero central para el acoplamiento con la base.

Cabe mencionar que las dimensiones exactas de la leva polinomial 45678 se detallarán en el capítulo correspondiente a los planos.

Diseño de la leva polidínica

Figura 79

Esquema en 3D de la leva polidínica



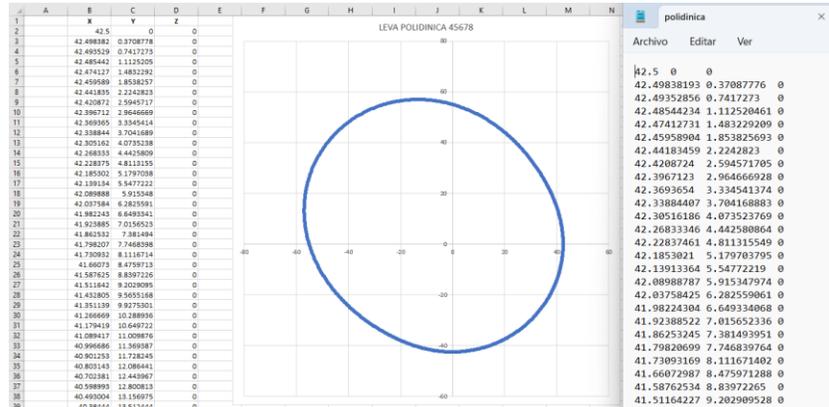
Nota: esquema del diseño final de la leva polidínica.

Con el análisis y diseño de la leva polidínica realizado en el “CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO” se determinó el perfil de la leva que se ajusta a los requerimientos obtenidos de la leva polinomial 45678

que es con la cual se realizará la respectiva comparativa para determinar como la leva polidínica se ajusta de mejor manera a la leva polinomial 45678, de esta manera se obtuvieron las siguientes coordenadas para la gráfica respectiva de la leva.

Figura 80

Obtención de las coordenadas de la leva polidínica

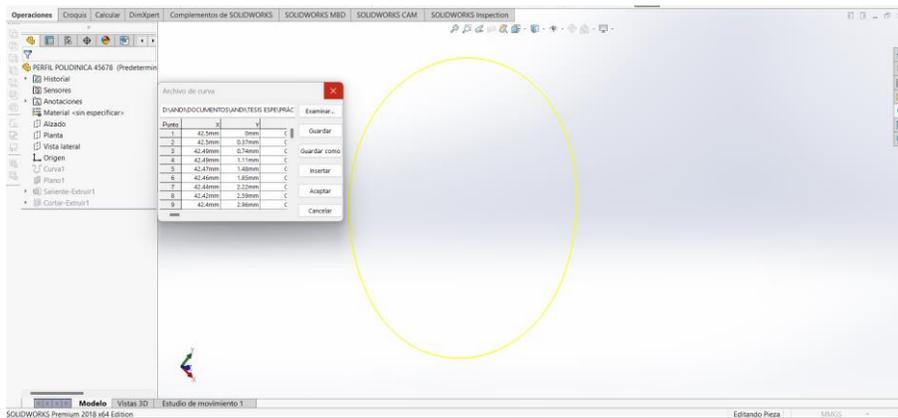


Nota: obtención de las coordenadas para el diseño del perfil de la leva polidínica.

Teniendo las coordenadas para la realización de la leva polidínica que se ajusta a las características del equipo TM1021 – CAM ANALYSIS MACHINE MAIN UNIT se procede a obtener las coordenadas en el Excel y posterior a esto en un block de notas para poder importar en el programa SolidWorks, de esta forma el perfil de la leva en el software queda de la siguiente manera:

Figura 81

Croquis de la leva polidínica

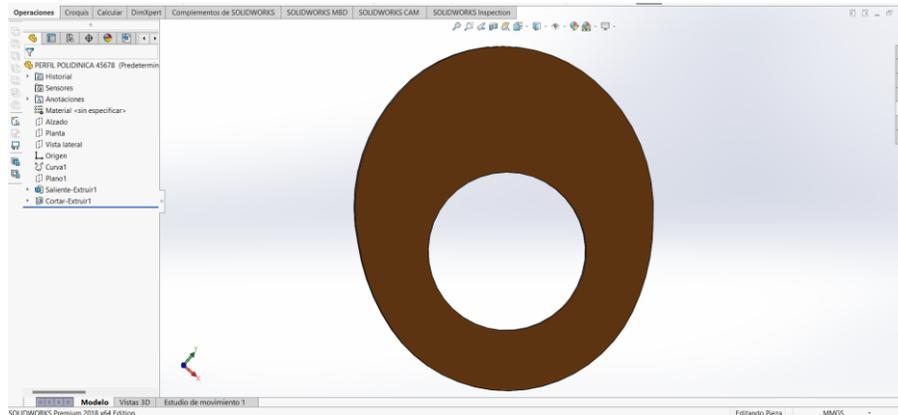


Nota: importación de las coordenadas de la leva polidínica para la realización del croquis.

Teniendo en como referencia el perfil de la leva polidínica procedemos a realizar la operación de extrucción de 20 mm de espesor, posteriormente se realiza la perforación de 48.30 mm de diámetro, teniendo como consiguiente:

Figura 82

Diseño de la leva polidínica a construir



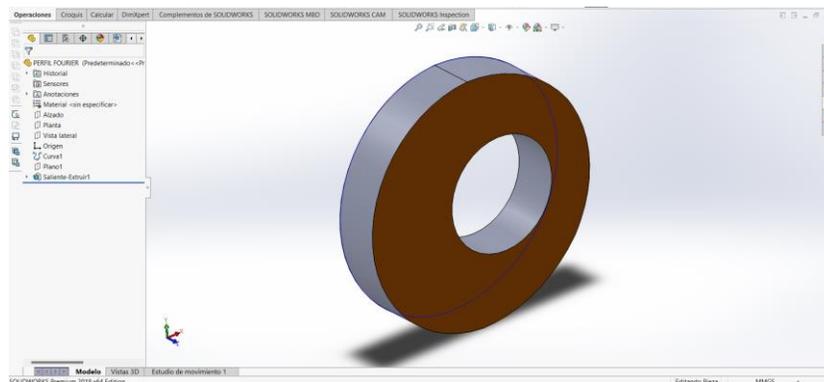
Nota: diseño final de la leva polidínica con el agujero respectivo para el acople con la base de la leva.

Cabe mencionar que las dimensiones exactas de la leva polinomial 45678 se detallarán en el capítulo correspondiente a los planos.

Diseño de la leva de Fourier

Figura 83

Esquema en 3D de la leva de la serie de Fourier



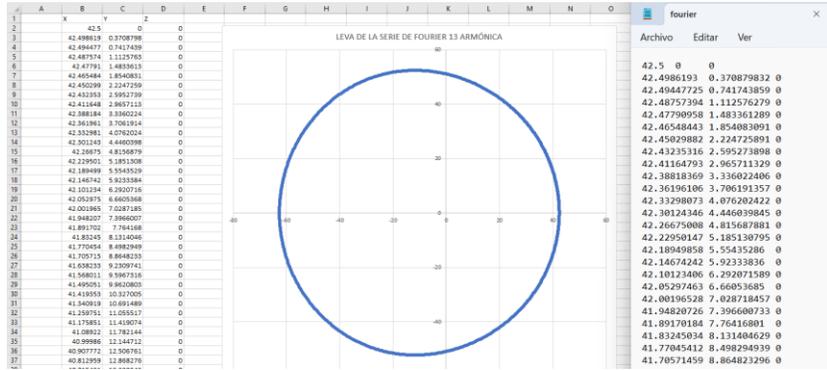
Nota: esquema final para el diseño de la leva de la serie de Fourier de grado 13.

Con el análisis y diseño de la leva de Fourier realizado en el “CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO” se determinó el perfil de la leva que se ajusta a los requerimientos establecidos del equipo TM1021 – cam

análisis de la máquina principal de esta manera se obtuvieron las siguientes coordenadas para la gráfica respectiva de la leva.

Figura 84

Obtención de las coordenadas de la leva de la serie de Fourier

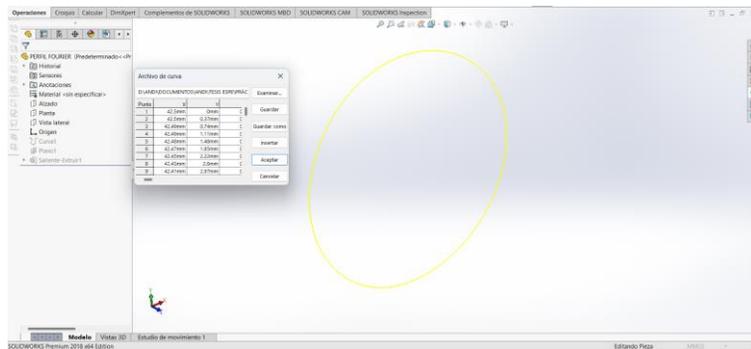


Nota: obtención de las coordenadas para el diseño de la leva de la serie de Fourier grado 13.

Una vez teniendo las coordenadas para la leva de Fourier se procede a importar las coordenadas en el software SolidWorks de esta forma tendremos el perfil en el programa y realizaremos una extrucción de 20 mm de espesor y un agujero de 48.30 mm de diámetro para acoplarle con la base de la leva, de tal forma se obtendrá lo siguiente.

Figura 85

Croquis de la leva de la serie de Fourier

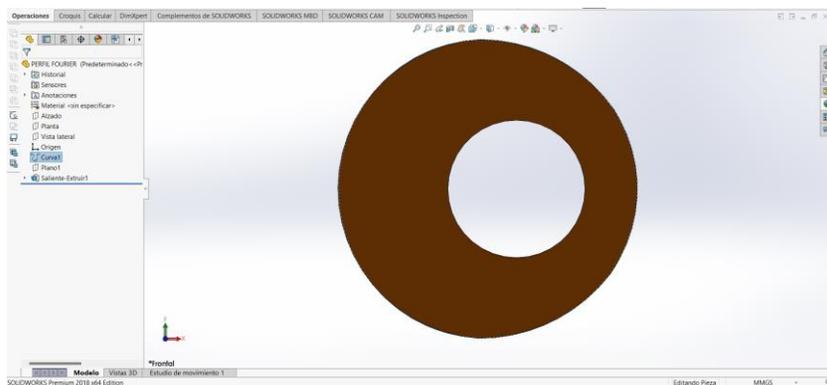


Nota: importación de las coordenadas de la leva de la serie de Fourier de grado 13 para la realización del croquis.

Posterior a este paso se realizan las perforaciones correspondientes de acuerdo a los planos que se encuentran en la sección de apéndices, de esta manera el perfil de la leva de series de Fourier quedará de la siguiente manera:

Figura 86

Diseño de la leva de la serie de Fourier a construir



Nota: diseño final de la leva de la serie de Fourier de grado 13 con el agujero respectivo para el acople con la base de la leva.

Capítulo Construcción

Figura 87

Inicio de la fabricación por electroerosión



Nota: placa base para la construcción de las levas polinomial 45678, polidínica y leva de la serie de Fourier grado 13.

Selección de proceso para fabricación

Fabricación por mecanizado CNC

El proceso de fabricación por CNC (Control Numérico Computarizado) es un proceso versátil que se utiliza comúnmente para la fabricación de piezas que poseen una geometría compleja, donde su funcionamiento se basa en el uso de controles numéricos y máquinas herramientas para eliminar las capas del material en bruto, los pasos para la fabricación en CNC es primero el diseño del modelo CAD donde se obtendrá el diseño en 3D, posteriormente el archivo CAD se lo debe pasar a CAM donde se obtendrá el código G que se detalla los procesos y usos de herramientas para lograr con la fabricación de la geometría deseada, con el código G para la programación se realiza la configuración de la máquina y de sus herramientas ubicándolas las herramientas necesarias en los husillos, una vez realizado esto se ingresa el código G al equipo y se centra el material en bruto y los ejes de las herramientas para proceder con la fabricación del mismo, la máquina CNC tiene una tolerancia de aproximadamente 0,01

mm que es la precisión más exacta que depende el equipo y de las herramientas que se utilizan, el precio aproximado para el uso de este tipo de máquina es de \$50 a \$120 por hora de trabajo de la máquina, aparte de costos adicionales como la mano de obra.

Fabricación por electrohilo

la electroerosión por hilo es un proceso manejado por control numérico, consta de un hilo de cobre cargado eléctricamente donde mediante la erosión térmica es capaz de cortar material de diferente espesor, cabe mencionar que estos cortes son finos y de gran precisión, puede llegar a precisiones que varían de 3 a 5 micras.

El principio del proceso se basa en que el hilo de cobre está protegido mediante un fluido dieléctrico, este choca con la placa base formando chispas entre el hilo y la placa base, esto debido a la serie de descargas de corriente continua emitidas por el hilo, para los agujeros internos de la leva se necesitó primero realizar una pequeña perforación para que el hilo pueda ingresar y realizar el proceso sin dificultad, la velocidad de corte para este proceso fue de $300 \text{ mm}^2/\text{min}$, donde cuanto más sea la velocidad de avance del hilo mejor será la calidad superficial de la pieza, cabe mencionar que se utilizó este proceso de fabricación debido a la facilidad de fabricación, haciendo referencia a las geometrías que se obtuvieron en los diferentes perfiles de levas, el tiempo, costo, calidad y tolerancia para la fabricación de las levas mencionadas.

Selección de material

Para la fabricación del perfil de la leva y del eje base de la leva se debe considerar ciertos parámetros indispensables para la selección del material, uno de estos parámetros es que el perfil debe ser resistente al desgaste abrasivo, debe tener una buena tenacidad y como parámetro fundamental de igual manera debe ser resistente al desgaste adhesivo, para la base de la leva se espera que el material sea tenaz y tenga buena resistencia al desgaste, además de tener buenas propiedades de soldabilidad, dado estas características que deben tener las piezas para las levas se ha realizado una investigación a

través de diferentes empresas que venden aceros a nivel local para determinar la mejor selección del acero, por lo cual se decidió seleccionar al acero AISI 1018 para la fabricación de la base de la leva, mientras que para los perfiles de las levas se seleccionó el material AISI 8620 de los aceros Iván Bohman, los cuales cada acero seleccionado tiene las siguientes características.

Para la fabricación de las bases de las levas se utilizará el acero AISI 1018 que tiene un porcentaje de carbono equivalente al 0,15%, una dureza Brinell de 124, no necesita temple, es muy bueno para soldar, tiene una alta resistencia al impacto, se utiliza para fabricación de piezas automotrices, construcción, elementos de sujeción, entre otras aplicaciones, al tener un porcentaje alto de manganeso evita que tenga corrosión.

Para la fabricación de los perfiles de las levas se utilizará el acero AISI 8620 este acero es especial dado que se utiliza para casos donde se requiere alta dureza y resistencia al desgaste superficial, posee una buena tenacidad, posee buena soldabilidad ante cualquier material y no requiere un tratamiento térmico dado que tiene buenas propiedades, en caso de requerir un tratamiento térmico lo único que hará es aliviar las tensiones superficiales de la pieza.

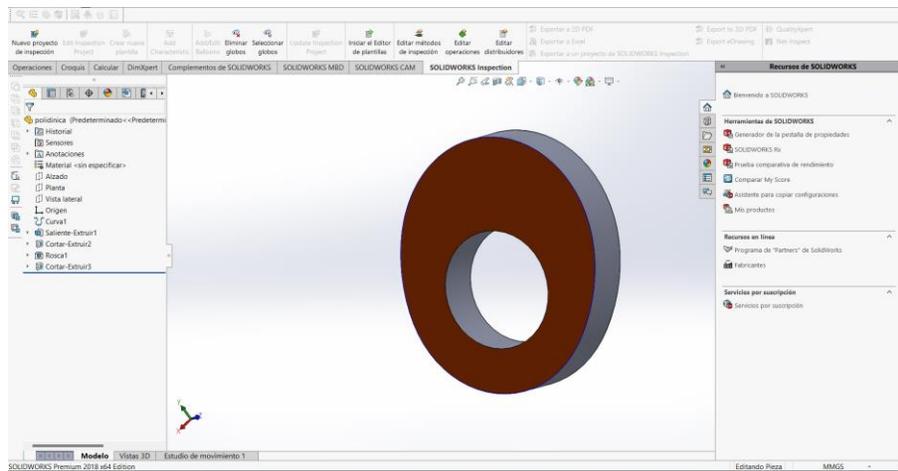
Fabricación de las levas

Para el proceso de fabricación de la leva polinomial 45678, la leva polidínica y la leva de la serie de Fourier de grado 13 se utilizó la electroerosión por hilo, las tres levas fabricadas, la leva polinomial 45678, leva polidínica y la leva de la serie de Fourier siguen los mismos pasos para su fabricación, la única diferencia que existe es en la variación de su perfil, de ahí el resto de procedimientos es el mismo, de esta forma se tiene lo siguiente:

1. Como primer paso se debe realizar el perfil de la leva en un software, posterior a esto procedemos a guardarlo en formato DXF dado que es el programa que utiliza la cortadora por electroerosión.

Figura 88

Guardado del archivo en formato DXF



Nota: diseño final de la leva en el software Solid Works.

2. Una vez guardado el perfil en formato DXF, se procede a abrir el archivo en el equipo de electroerosión para programar el corte de cada leva.

Figura 89

Importación del archivo DXF al programa para electroerosión



Nota: importación del archivo DXF al programa del equipo de electroerosión.

3. Ya programado y aceptado la orientación y sistema de coordenadas para la electroerosión, se ajusta la placa base al cabezal del torno, fijándose que quede completamente plana, la placa base debe tener

una pequeña perforación para que pase el hilo y sigue el proceso de mecanizado que está programado para la obtención de las levas, el tiempo aproximado de fabricación por cada leva va desde los 30 minutos hasta los 40 minutos.

Figura 90

Inicio del corte por hilo - electroerosión



Nota: inicio de la programación para el corte de las placas donde se obtendrán las levas.

4. Ya finalizado el procedimiento, tenemos las piezas de la siguiente manera.

Figura 91

Finalización del corte por hilo de la base de las levas y sus bases



Nota: trabajo final del corte de la base y perfil de las levas.

5. Se debe unir las piezas que se encuentran por separado, vamos utilizar la soldadora mig.

Figura 92

Soldadura entre la base y la leva



Nota: unión de la base de la leva con su respectivo perfil mediante soldadura por proceso mig.

6. Procedemos a pulir el área soldada por medio de una amoladora y disco de desbaste, posterior a esto se rectificó la cara de la leva realizamos los acabados respectivos.

Figura 93

Pulido de las caras de las levas soldadas



Nota: pulido y rectificado de las levas polinomial 45678, polidínica y leva de la serie de Fourier de grado 13.

7. Como paso final se realiza la colocación de la identificación para cada leva y pintamos las caras que no van a estar en contacto con el seguidor.

Figura 94

Pintado y grabado de identificación para cada leva



Nota: acabado final de las levas fabricadas.

Para poder identificar las tres levas fabricadas, tenemos las siguientes identificaciones para cada una:

- Leva polinomial 45678, identificación: L – 45678
- Leva polidínica, identificación: LP – 45678
- Leva de la serie de Fourier grado 13, identificación: LF – 13

Nota: En las tres levas se llevaron a cabo los mismos pasos para su fabricación, por lo cual no fue necesario describir el mismo proceso para cada leva, sino uno en general, adicional a esto, los planos de procesos para cada leva se encuentran en el apartado de apéndices.

Capítulo Pruebas y Ensayos

Figura 95

VDAS para adquisición de datos



Nota: Software VDAS para adquisición de datos.

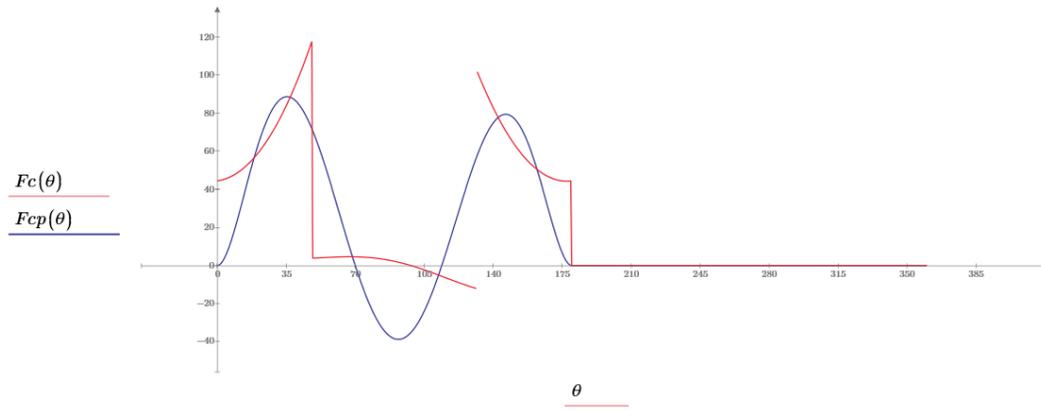
Una vez realizado los cálculos estáticos y dinámicos teóricos para determinar el perfil de la leva polinomial 45678, leva polidínica y la leva de la serie de Fourier de grado 13 que cumplan con las condiciones de mejora, se procederá a utilizar el equipo TM1021 – cam analysis machine main unit para la realización de los ensayos, la cual tiene como finalidad el comparar las gráficas prácticas que se obtendrán en el equipo de levas y las gráficas teóricas de las mismas, con respecto a las tres levas que se han realizado en el presente tema de titulación, de esta forma encontrando la finalidad y funcionalidad de cada leva para diferentes casos prácticos aplicables en el laboratorio de mecanismos del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica propia de la Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE y definir cuál de las tres levas fabricadas tiene mejoras considerables, tomando en cuenta que se tomó la leva convexa tipo B como punto de referencia para el análisis de mejora y fabricación de la leva polinomial 45678, leva polidínica y la leva de la serie de Fourier de grado 13.

Nota: para llevar a cabo los ensayos bajo los parámetros establecidos se hizo una serie de prueba error en el equipo de levas, estas pruebas se las puede observar de manera detallada en la sección de apéndices “Apéndice A” que se encuentran adjuntos en el presente documento.

Ensayos y pruebas de funcionamiento de la leva polinomial

Figura 96

Fuerza de contacto teórica de la leva polinomial



Nota: Fuerza de contacto de la leva polinomial 45678.

La leva polinomial 45678 está diseñada teóricamente para que exista un despegue al llegar a una velocidad de 270 r.p.m. esto se puede observar en la gráfica dado que la curva de color azul propia de la leva polinomial 45678 baja de cero.

Figura 97

Despegue de la leva polinomial 45678



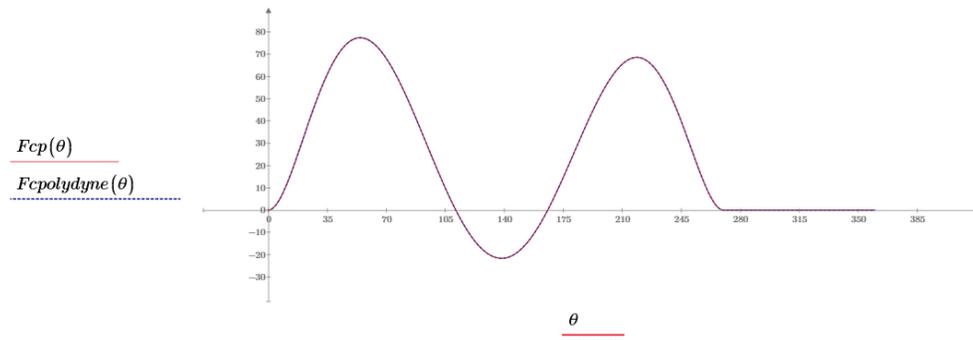
Nota: Fuerza de contacto de la leva polidínica práctica.

Al realizar el ensayo en el software VDAS propio del equipo TM1021 – cam analys machine main unit se obtuvo un despegue entre la leva y el seguidor a los 220 r.p.m. se lo puede observar en la curva de color amarilla donde una curva de color rojo que es la referencial no es igual existe un sobresalto.

Ensayos y pruebas de funcionamiento de la leva polidínica

Figura 98

Fuerza de contacto teórica de la leva polidínica



Nota: Fuerza de contacto de la leva polidínica.

La leva polidínica está diseñada teóricamente para que exista un despegue al llegar a una velocidad de 270 r.p.m. esto se puede observar en la figura dado que la curva de color azul propia de la leva polidínica baja de cero.

Figura 99

Despegue de la leva polidínica práctica

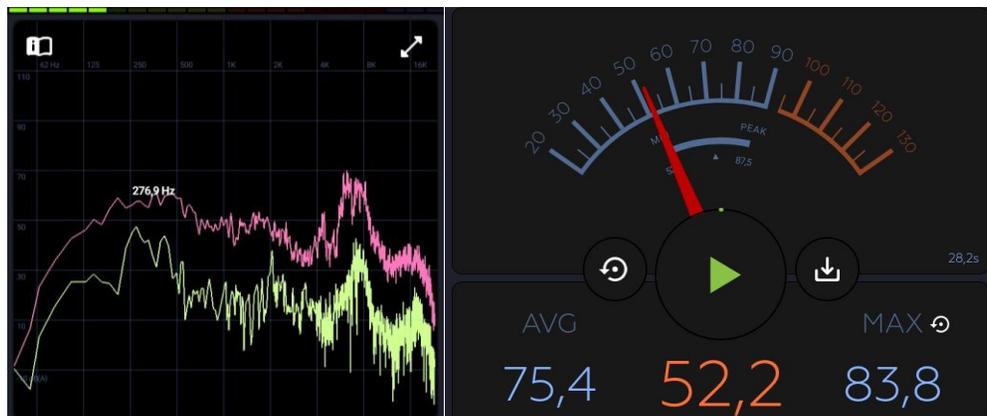


Nota: Fuerza de contacto de la leva polidínica práctica.

Al realizar el ensayo en el software VDAS propio del equipo TM1021 – cam analys machine main unit se obtuvo un despegue entre la leva y el seguidor a los 325 r.p.m. se lo puede observar en la curva de color amarilla donde una curva de color rojo que es la referencial no es igual existe un sobresalto.

Figura 100

Medidor de decibeles de la leva polidínica



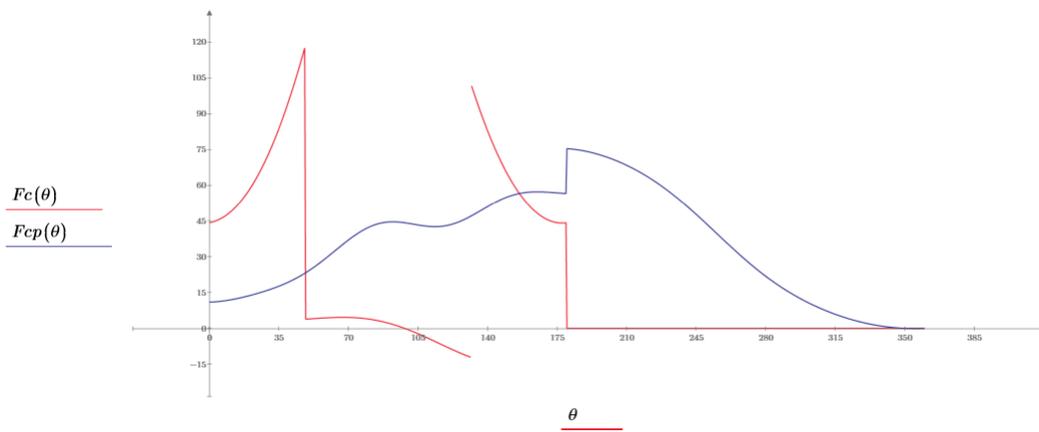
Nota: Medidor de decibeles de la leva polidínica.

Al realizar la medición de los decibeles de la leva polidínica realizada en el equipo TM1021 – cam analysis machine main unit se pudo observar que al llegar al punto de despegue de la leva igual a 325 r.p.m. el valor máximo de ruido es de 83,8 dB, lo cual entre en un rango aceptable recordando que la cantidad de ruido permitido que puede estar en contacto con el oído es en un rango de 85 a 90 dB.

Ensayos y pruebas de funcionamiento de la leva de Fourier

Figura 101

Fuerza de contacto teórica de la leva de Fourier

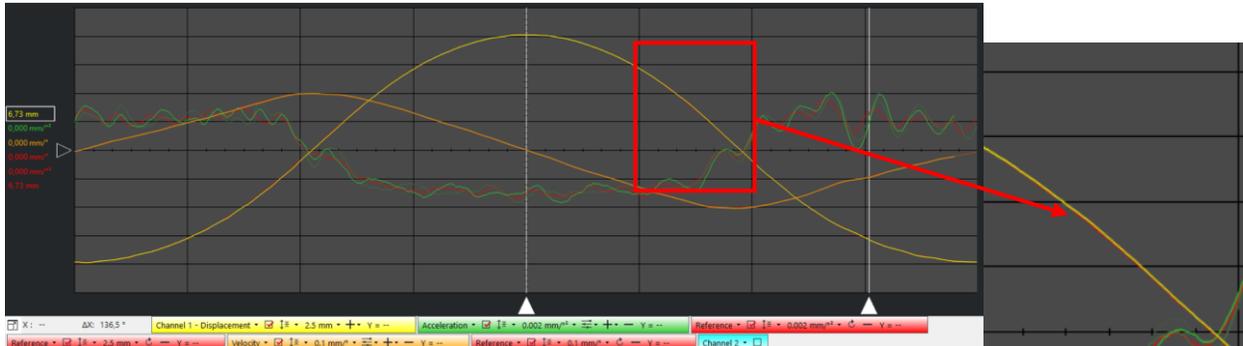


Nota: Fuerza de contacto de la leva de la serie de Fourier grado 13.

La leva de la serie de Fourier grado 13 está diseñada teóricamente para que exista un despegue al llegar a una velocidad de 270 r.p.m. como parámetro fijo para las otras levas fabricadas, pero en la figura se puede determinar que no existe despegue teórico a esa cantidad de revoluciones.

Figura 102

Despegue de la leva de la serie de Fourier grado 13 práctica



Nota: Fuerza de contacto de la leva de la serie de Fourier grado 13 práctica.

Al realizar el ensayo en el software VDAS propio del equipo TM1021 – cam analys machine main unit no se obtuvo un despegue entre la leva y el seguidor por más de haber llegado a los 290 r.p.m. sin embargo, la práctica se dejó de realizar debido a que existía demasiada vibración residual.

Figura 103

Medidor de decibeles de la leva de la serie de Fourier grado 13



Nota: Medidor de decibeles de la leva de la serie de Fourier grado 13, por los autores.

Al realizar la medición de los decibeles de la leva de la serie de Fourier grado 13 realizada en el equipo TM1021 – cam analysis machine main unit se pudo observar que al llegar al punto de despegue superior a 300 r.p.m. no se pudo tener un valor exacto dado que la vibración residual era muy alto, sin embargo, el valor máximo de ruido es de 86,7 dB, lo cual entre en un rango aceptable recordando que la cantidad de ruido permitido que puede estar en contacto con el oído es en un rango de 85 a 90 dB.

Ensayos y pruebas de funcionamiento de la leva convexa tipo A

Figura 104

Fuerza de contacto de la leva convexa tipo A práctica



Nota: Fuerza de contacto de la leva convexa tipo A práctica.

Al realizar el ensayo de la leva tipo A en el software VDAS propio del equipo TM1021 – cam analysis machine main unit se obtuvo un despegue entre la leva y el seguidor al llegar a una velocidad de 160 r.p.m. lo cual se puede verificar dado que la curva de color amarilla posee otra curva de color rojo donde no son iguales, esto hace referencia a que comienza a existir despegue entre esta leva y el seguidor.

Figura 105

Medidor de decibeles de la leva convexa tipo A



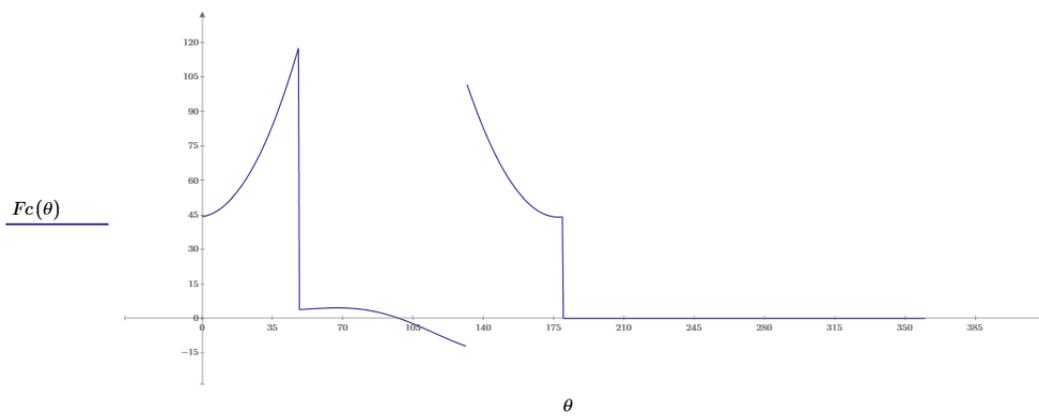
Nota: Medidor de decibeles de la leva convexa tipo A.

Al realizar la medición de los decibeles de la leva de la serie convexa tipo A realizada en el equipo TM1021 – cam analysis machine main unit se pudo observar que al llegar al punto de despegue igual a 160 r.p.m. el valor máximo de ruido es de 76,7 dB, lo cual entre en un rango aceptable recordando que la cantidad de ruido permitido que puede estar en contacto con el oído es en un rango de 85 a 90 dB.

Ensayos y pruebas de funcionamiento de la leva convexa tipo B

Figura 106

Fuerza de contacto teórica de la leva tipo B



Nota: Fuerza de contacto de la leva convexa tipo B.

Figura 107

Fuerza de contacto de la leva tipo B práctica



Nota: Fuerza de contacto de la leva convexa tipo A práctica.

Al realizar el ensayo de la leva tipo B en el software VDAS propio del equipo TM1021 – cam analysis machine main unit se obtuvo un despegue entre la leva y el seguidor al llegar a una velocidad de 225 r.p.m. lo cual se puede verificar dado que la curva de color amarillo posee otra curva de color rojo donde no son iguales, esto hace referencia a que comienza a existir despegue entre esta leva y el seguidor.

Figura 108

Medidor de decibeles de la leva tipo B



Nota: Medidor de decibeles de la leva convexa tipo B.

Al realizar la medición de los decibeles de la leva de la serie convexa tipo B realizada en el equipo TM1021 – cam analysis machine main unit se pudo observar que al llegar al punto de despegue

igual a 225 r.p.m. el valor máximo de ruido es de 79,4 dB, lo cual entre en un rango aceptable recordando que la cantidad de ruido permitido que puede estar en contacto con el oído es en un rango de 85 a 90 dB.

Ensayos y pruebas de funcionamiento de la leva tangencial

Figura 109

Fuerza de contacto de la leva tangencial práctica



Nota: Fuerza de contacto de la leva tangencial práctica.

Al realizar el ensayo de la leva tangencial en el software VDAS propio del equipo TM1021 – cam analysis machine main unit se obtuvo un despegue entre la leva y el seguidor al llegar a una velocidad de 146 r.p.m. lo cual se puede verificar dado que la curva de color amarillo posee otra curva de color rojo donde no son iguales, esto hace referencia a que comienza a existir despegue entre esta leva y el seguidor.

Figura 110

Medidor de decibeles de la leva tangencial



Nota: Medidor de decibeles de la leva tangencial.

Al realizar la medición de los decibeles de la leva tangencial realizada en el equipo TM1021 – cam analyis machine main unit se pudo observar que al llegar al punto de despegue igual a 146 r.p.m. el valor máximo de ruido es de 85,3 dB, lo cual entre en un rango aceptable recordando que la cantidad de ruido permitido que puede estar en contacto con el oído es en un rango de 85 a 90 dB.

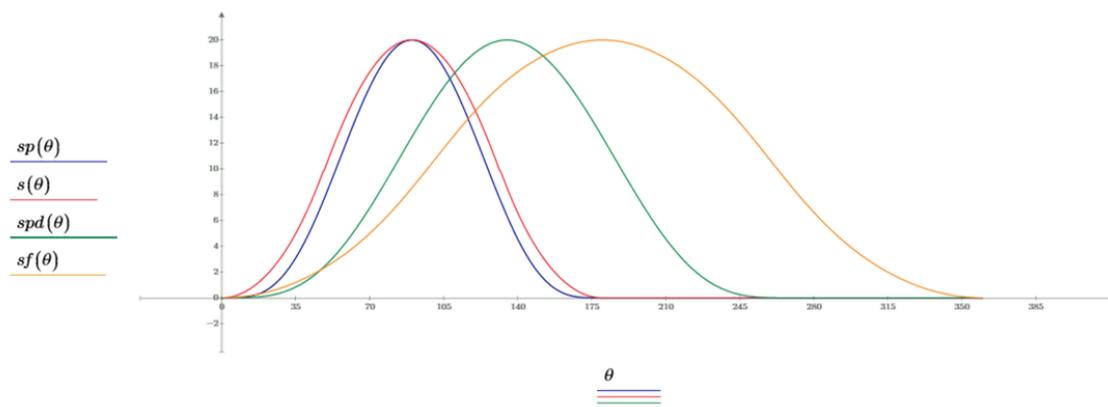
Capítulo Análisis de Resultados

Para el análisis de resultados se tomará en cuenta los resultados obtenidos en la leva polinomial 45678 y la leva polidínica, dado que la leva polidínica es un ajuste a la leva polinomial y es necesario obtener estas comparativas para determinar desenlaces entre ambas levas diseñadas, fabricadas y ensambladas en el equipo TM1021 – cam analys machine main unit, donde el análisis de la leva de la serie de Fourier se hará un análisis diferente dado que no tiene una leva fabricada para realizar su comparativa, recordando que la leva de la serie de Fourier según los cálculos demostrados en capítulos anteriores es la leva que mejor se adapta a los parámetro del equipo TM1021 – cam analys machine main unit y que cumple con todas las especificaciones y condiciones máximas de trabajo del equipo.

Gráficas de posición

Figura 111

Posición de la leva convexa tipo B, leva polinomial 45678, leva polidínica y leva de la serie de Fourier grado 13



Nota: Gráfica de la posición de la leva convexa tipo B, polinomial 45678, polidínica y de la serie de Fourier de grado 13 a lo largo de 360° con una amplitud máximo de 20.

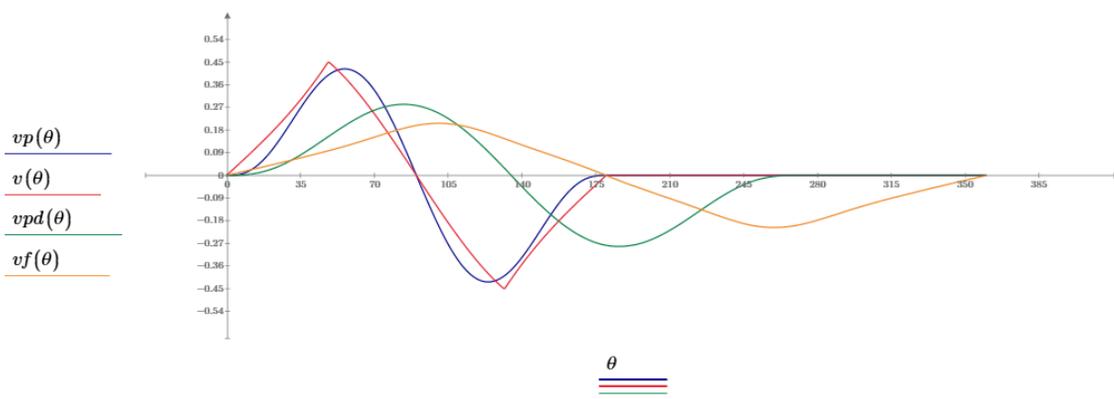
En la gráfica de posición de las levas con respecto al ángulo de desplazamiento, podemos observar cuatro gráficas, la de color rojo corresponde a la leva convexa tipo B, la de color azul es correspondiente a la leva polinomial 45678, la de color verde corresponde a la leva polidínica, mientras que la de color anaranjado es correspondiente a la leva de la serie de Fourier de grado 13, las 4 levas

tienen la misma amplitud, la diferencia que se tiene entre las cuatro gráficas es la longitud de la onda y la ubicación de la cresta en ciertos ángulos, la leva polinomial se trata de ajustar con respecto a la leva convexa tipo B, pero la leva polidínica y la leva de la serie de Fourier se mejoran dado que para llegar al punto más alto de la cresta de la onda necesitan un ángulo mayor a los 90 grados en comparación a lo que necesita la leva convexa y la leva polinomial, con estas características podemos decir que la leva polidínica y la leva de la serie de Fourier grado 13 son levas mejoradas.

Gráficas de velocidad

Figura 112

Velocidad de la leva convexa tipo B, leva polinomial 45678, leva polidínica y leva de la serie de Fourier grado 13



Nota: Gráfica de la velocidad de la leva convexa tipo B, polinomial 45678, polidínica y de la serie de Fourier de grado 13 a lo largo de 360°.

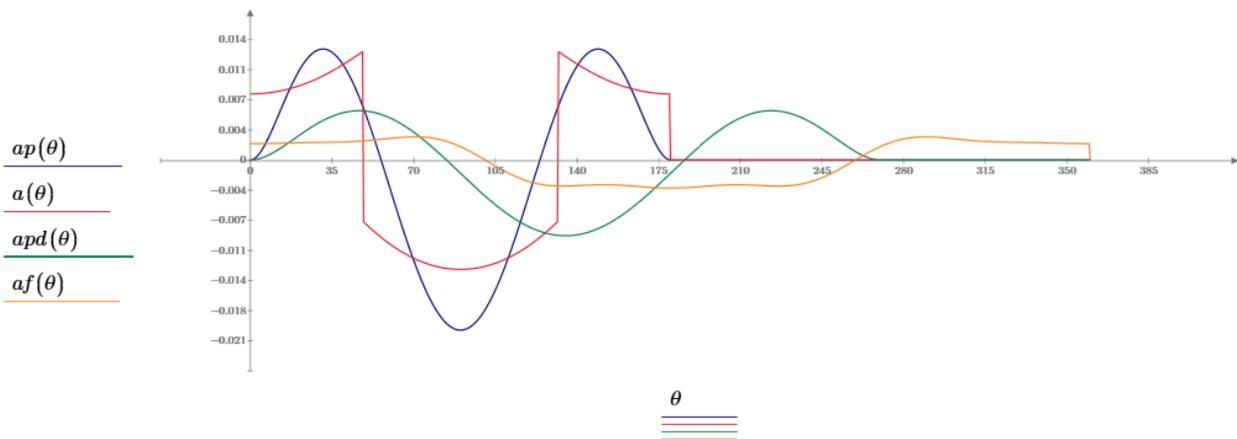
En la gráfica de velocidad de las levas con respecto al ángulo de desplazamiento, podemos observar cuatro gráficas, la de color rojo corresponde a la leva convexa tipo B, la de color azul es correspondiente a la leva polinomial 45678, la de color verde corresponde a la leva polidínica, mientras que la de color anaranjado es correspondiente a la leva de la serie de Fourier de grado 13, con respecto a esta comparativa de gráficos podemos afirmar que la leva de la serie de Fourier que se encuentra con color anaranjado no tiene una amplitud considerable con respecto a las otras levas, con esto se conseguirá un movimiento armónico en la realización de ensayos prácticos con las levas y el equipo

TM1021 – cam analysis machine main unit, la amplitud más alta para esta leva se dará aproximadamente en los 110 y 270 grados, con respecto a su desplazamiento.

Gráficas de aceleración

Figura 113

Aceleración de la leva convexa tipo B, leva polinomial 45678, leva polidínica y leva de la serie de Fourier grado 13



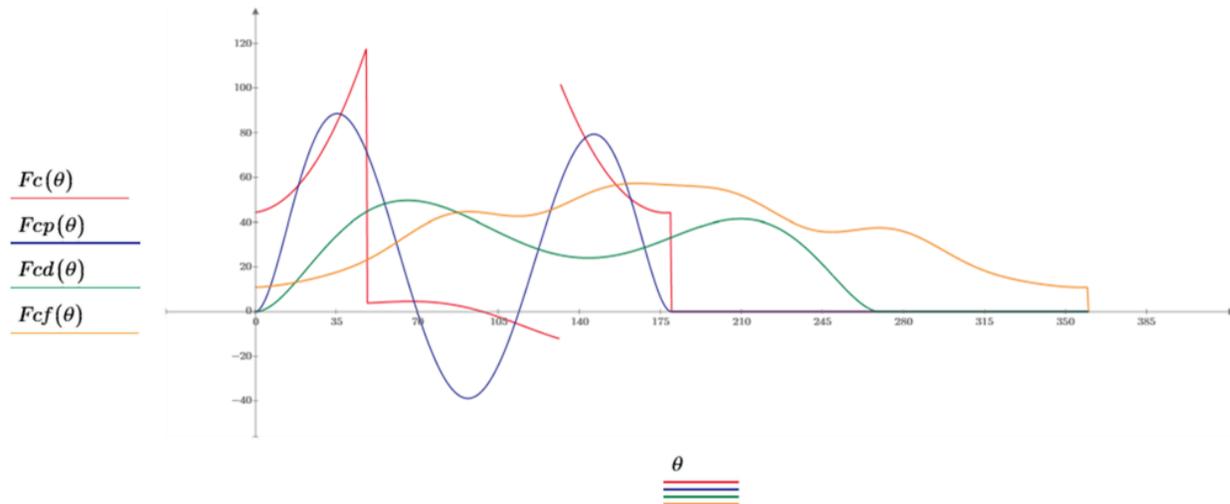
Nota: Gráfica de la aceleración de la leva convexa tipo B, polinomial 45678, polidínica y de la serie de Fourier de grado 13 a lo largo de 360° con un movimiento armónico.

En la gráfica de aceleración de las levas con respecto al ángulo de desplazamiento, podemos observar cuatro gráficas, la de color rojo corresponde a la leva convexa tipo B, la de color azul es correspondiente a la leva polinomial 45678, la de color verde corresponde a la leva polidínica, mientras que la de color anaranjado es correspondiente a la leva de la serie de Fourier de grado 13, con respecto a la gráfica de aceleración, la leva polidínica y la leva de la serie de Fourier tiene un movimiento más armónico, la amplitud de las mismas no son tan grandes en comparación con la leva convexa tipo B y la leva polinomial, esta disminución considerable de amplitud ayuda de buena manera para el despegue que se tiene entre la leva y el seguidor.

Gráficas de fuerza de contacto

Figura 114

Fuerza de contacto de la leva convexa tipo B, leva polinomial 45678, leva polidínica y leva de la serie de Fourier grado 13



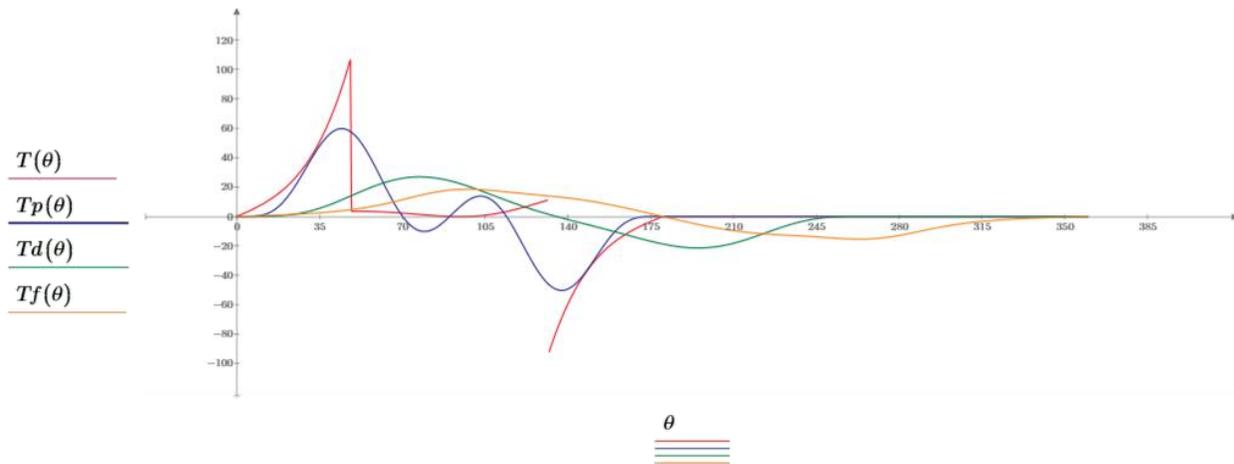
Nota: Gráfica de la fuerza de contacto de la leva convexa tipo B, polinomial 45678, polidínica y de la serie de Fourier de grado 13 a lo largo de 360° con un movimiento armónico.

En la gráfica de fuerza de contacto de las levas con respecto al ángulo de desplazamiento, podemos observar cuatro gráficas, la de color rojo corresponde a la leva convexa tipo B, la de color azul es correspondiente a la leva polinomial 45678, la de color verde corresponde a la leva polidínica, mientras que la de color anaranjado es correspondiente a la leva de la serie de Fourier de grado 13, la fuerza de contacto hace referencia a la fuerza que se aplica entre la leva y el seguidor, como es el comportamiento de la misma, con respecto a estas gráficas es muy notable que la gráfica de la leva polidínica y la leva de la serie de Fourier de grado 13 tienen un movimiento más armónico, donde esta fuerza de contacto con los parámetros establecidos desde los cero grados que empieza el movimiento de la leva, hasta los 360 grados donde termina el desplazamiento de la misma, para la leva de la serie de Fourier grado 13 no existe un despegue a esa velocidad teórica de 270 r.p.m.

Gráficas de par torsión

Figura 115

Par torsión de la leva convexa tipo B, leva polinomial 45678, leva polidínica y leva de la serie de Fourier grado 13



Nota: Gráfica del par torsión de la leva convexa tipo B, polinomial 45678, polidínica y de la serie de Fourier de grado 13 a lo largo de 360° .

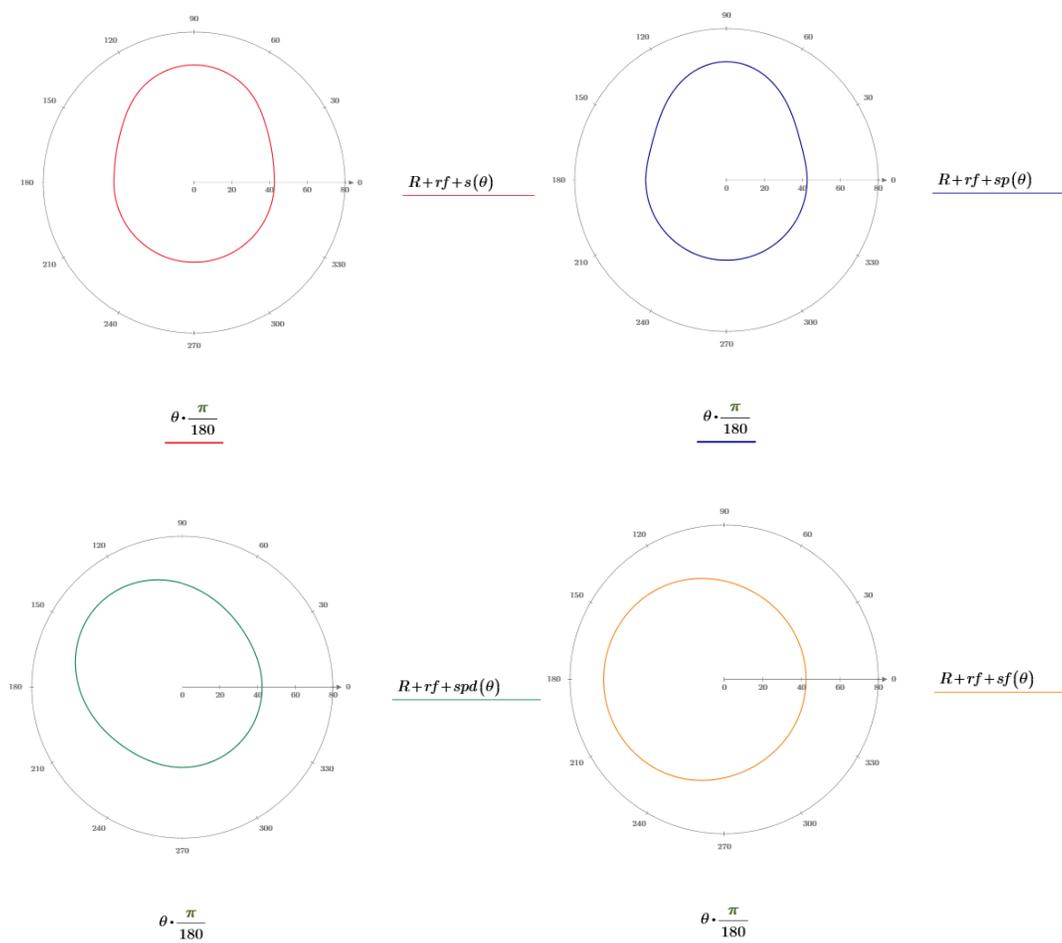
En la gráfica de par torsión de las levas con respecto al ángulo de desplazamiento, podemos observar cuatro gráficas, la de color rojo corresponde a la leva convexa tipo B, la de color azul es correspondiente a la leva polinomial 45678, la de color verde corresponde a la leva polidínica, mientras que la de color anaranjado es correspondiente a la leva de la serie de Fourier de grado 13, la finalidad de tener un par torsión adecuado es para reducir de manera considerable las vibraciones no deseadas para que no afecten el rendimiento y fiabilidad de las levas (MCCARTHY, 2019) sabiendo que la fuerza de contacto entre la leva polidínica y la leva de la serie de Fourier son mejores en comparación de las otras levas, se parte de este análisis para determinar con el par torsional cuál de las levas analizadas es mejor para el equipo TM1021 – cam analysis machine main unit considerando sus respectivos parámetros de funcionamiento, donde con esto se concluye que la leva de la serie de Fourier de grado 13 es la mejor entre las cuatro levas analizadas, donde se acoplaría sin ningún problema a cualquier variación del

equipo de levas desde su mínima cantidad de revoluciones hasta llegar a su máximo nivel de revoluciones funcionaría sin problemas, creando así una leva muy eficiente y fiable.

Gráficas de los perfiles de las levas

Figura 116

Perfiles de la leva convexa tipo B, leva polinomial 45678, leva polidínica y leva de las series de Fourier grado 13



Nota: Gráfica de los perfiles de la leva convexa tipo B, polinomial 45678, polidínica y de la serie de Fourier de grado 13.

En la gráfica de perfil de las levas con respecto al ángulo de desplazamiento, podemos observar cuatro gráficas, la de color rojo corresponde a la leva convexa tipo B, la de color azul es correspondiente

a la leva polinomial 45678, la de color verde corresponde a la leva polidínica, mientras que la de color anaranjado es correspondiente a la leva de la serie de Fourier de grado 13, se observan esquemas de como quedarán las levas a construir bajo los parámetros del equipo TM1021 – cam analyis machine main unit que se establecieron.

Comparativa y selección de la mejor leva

En la sección de apéndices “Apéndice B” se encuentra el formato donde se halla la comparativa de la leva convexa tipo A, convexa tipo B, tangencial, leva polinomial 45678, polidínica y la leva de la serie de Fourier grado 13 estableciendo y detallando cuál de las levas expuestas es la mejor por el rendimiento y baja vibración residual.

Capítulo Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Con los resultados analíticos realizados entre la leva polinomial 45678 y de la leva polidínica 46578 no se encontró ninguna diferencia en los perfiles de leva de las mismas, debido a la constante de rigidez alta que posee todo el sistema del equipo TM 1021.
- En relación a lo antes expuesto se realizó un nuevo diseño de leva polidínica 45678, donde se varía las condiciones de frontera, aumentando el ciclo de subida y de bajada, mejorando el desempeño de esta leva polidínica comparada con la leva polinomial ya establecida.
- De lo dicho se desprende que al ensayar y comparar las levas polinomiales 45678 y la leva polidínica 45678 de manera teórica, donde se encontró que la leva polidínica mejora sus características notablemente, donde la fuerza de contacto nos indica que el seguidor despegó de la leva polidínica a 320 r.p.m y en la leva polinomial despegó a 220 r.p.m.
- De acuerdo a lo estudiado en base a la teoría de levas se decidió realizar un diseño de leva con el método de las series de Fourier para evidenciar que el despegue del seguidor no se relaciona con la vibración residual del sistema, que son dos factores que se buscan mejorar en este sistema leva - seguidor. Obteniendo que la leva de la Serie de Fourier de grado 13 tiene su punto de despegue al alcanzar las 500 r.p.m, sin embargo, su vibración residual es muy alta.
- Tras el análisis realizado de las levas para que cumplan con las condiciones de resistencia mecánica, a la corrosión, buena soldabilidad, acabado superficial, tolerancia geométrica y tolerancia dimensional, se concluyó utilizar como material de fabricación para las levas el acero AISI 8620 y para el eje de la leva AISI 1018 que cumplen con las

condiciones planteadas y que son materiales que se pueden encontrar fácilmente en el mercado nacional. Para la manufactura de la leva se eligió el proceso de corte por electroerosión que tiene como acabado superficial N8 y como precisión del equipo varían entre 3 a 5 μm y para la manufactura del eje se estableció un proceso de torneado que tiene un acabado superficial N9 y una precisión de 0.02 [mm].

- Con las condiciones teóricas referenciales de las levas, se procedió a la realización práctica para la comparativa entre las levas polinomiales 45678 y la leva polidínica 45678, donde la gráfica de posición que nos presenta el equipo TM 1021 nos indica que el seguidor despegó de la leva polidínica a 325 r.p.m y en la leva polinomial despegó a 200 r.p.m.
- No se pudo determinar prácticamente la velocidad a la cual el seguidor despegó de la leva de la Fourier grado 13 por la alta vibración generada por el equipo y transmitida a la mesa de trabajo.
- La leva convexa tipo A, convexa tipo B y leva tangencial no cumplen con la ley de las levas donde hace mención que la gráfica de aceleración debe ser continua en todo momento, lo que pasa por lo contrario con la leva polinomial 45678, polidínica y la leva de la serie de Fourier, donde su gráfica de aceleración se mantiene constantes.
- Realizando la comparativa entre las levas convexa tipo A, convexa tipo B, tangencial, polinomial 45678, polidínica y de la serie de Fourier, se ha podido determinar que la mejor leva entre las mencionadas es la leva polidínica dado que tiene una poca vibración residual y su capacidad máxima antes del punto de despegue es de 325 r.p.m
- De esto se desprende que el control del despegue se encuentra relacionada directamente con la aceleración del seguidor dada por la leva, es decir, si se aumenta la

duración del flanco de subida de la leva se obtendrá que baje la aceleración y por consiguiente resistirá más el despegue.

- Para terminar, es importante decir que realizando la validación metrológica de las levas construidas no existe algún tipo de error dimensional comparado con los perfiles de levas obtenidos teóricamente.

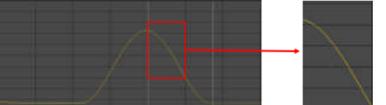
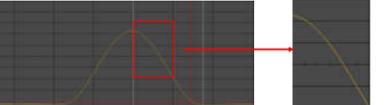
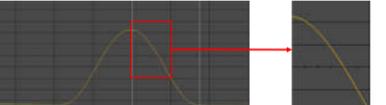
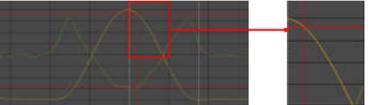
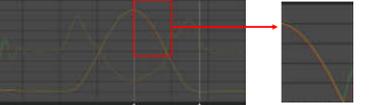
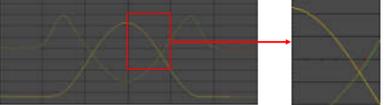
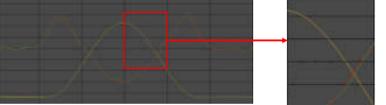
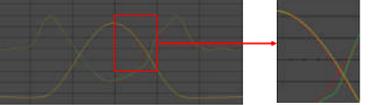
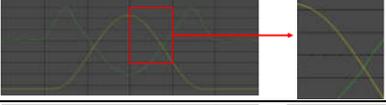
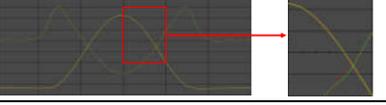
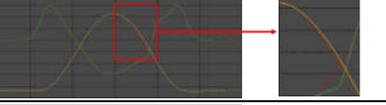
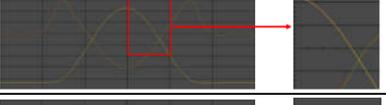
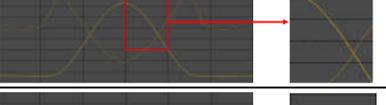
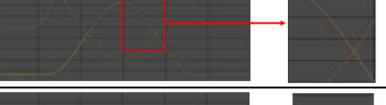
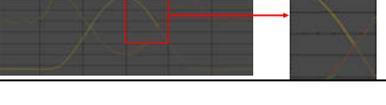
Recomendaciones

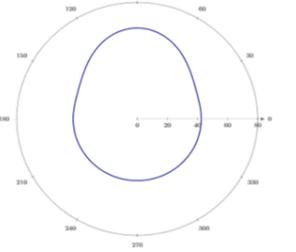
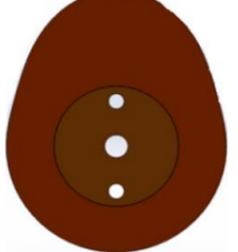
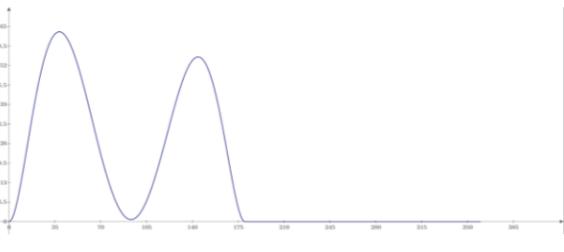
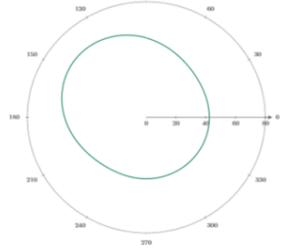
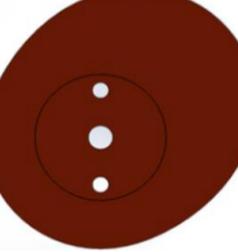
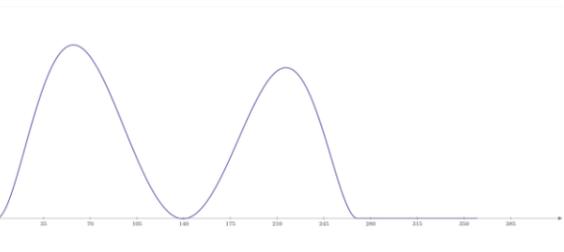
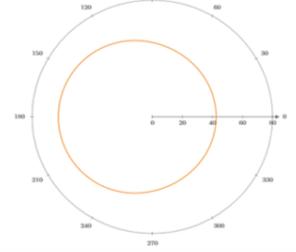
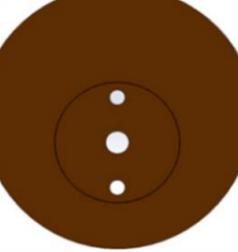
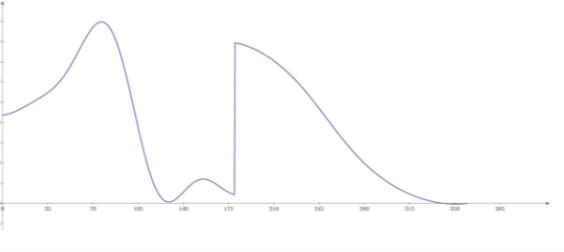
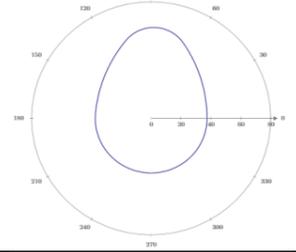
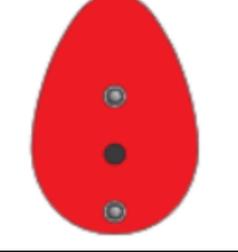
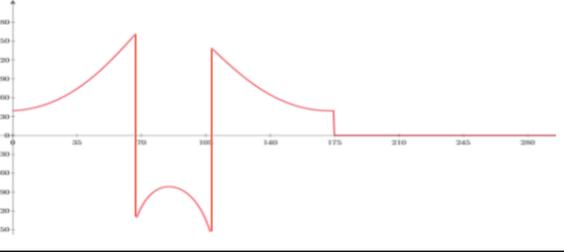
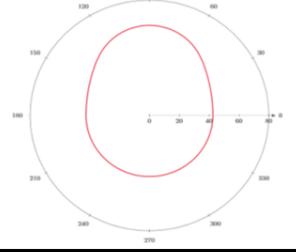
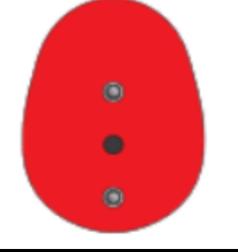
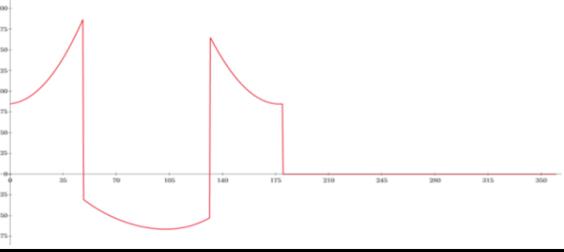
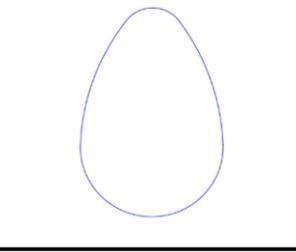
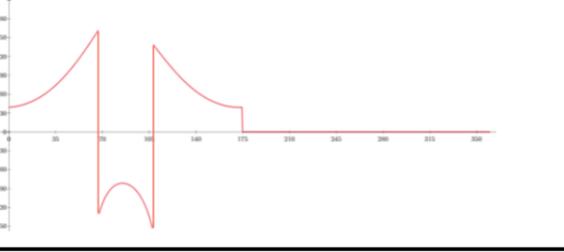
- Antes de realizar los ensayos con las levas fabricadas, la leva polinomial 45678, polidínica y la leva de la serie de Fourier grado 13, se recomienda lubricar el vástago y el perfil de la leva para que no exista un desgaste prematuro de los elementos mecánicos que constituyen el equipo TM 1021.
- Para la fabricación de las levas, se debe cumplir por lo menos las dos leyes fundamentales de las levas, la primera que corresponde a que el ángulo de presión de cada leva debe ser menor a los 30° y la segunda que hace mención a que la gráfica de aceleración versus desplazamiento angular que debe ser continua.
- Es importante entender que los parámetros que más influyen en un sistema leva – seguidor son: la constante del resorte y la precarga que se le dé, la constante de rigidez del vástago y la masa total del sistema.
- Trabajar en mejorar el soporte donde se mantiene actualmente el equipo de ensayos de levas TM1021 – cam analysis machine main unit para posteriormente poder realizar las prácticas de laboratorio de una manera más segura para los estudiantes, docentes y también evitar que los componentes y sensores del equipo de levas sufran algún tipo de desperfecto o des calibración.

Bibliografía

- Ambekar, A. (2007). *Mechanism Design Analysis and Synthesis 1* . 1–300.
- Carlos Miranda, J. (2003). *Mecanismos Notas de clase*.
- Erdman, A., & Sandor, G. (1998). *Diseño de Mecanismos Análisis y Síntesis - Erdman - Sandor - 3ra Ed.* 1–662.
- JJ, W. (2013). *Un mecanismo de leva seguidor de dedo típico para un motor de alto rendimiento.* 1–207.
<https://doi.org/10.1007/9781447145646>
- JJ. Williams. (2013). *Un mecanismo de leva seguidor de dedo típico para un motor de alto rendimiento.*
<https://doi.org/10.1007/9781447145646>
- José F. Olmedo S., & Jaime F. Echeverría Y. (2018). *Libro*.
- MCCARTHY, MICHAEL. (2019). *KINEMATIC SYNTHESIS OF MECHANISMS: a project based approach*. MDA.
- McConville, J. (2015). *Introduction to Mechanical System Simulation Using Adams*.
- Myszka, D. H. (2012a). *Máquinas y mecanismos*. Pearson Educación.
- Myszka, D. H. (2012b). *Máquinas y mecanismos*. Pearson Educación.
- Norton, R. L. (2009). *Cam design and manufacturing handbook*. Industrial Press.
- Olmedo, J., & Echeverría, J. (2018). *MÁQUINAS Y MECANISMOS*. 1–406.
- Rider, M. (2015). *DESIGN AND ANALYSIS OF MECHANISMS*.
- Sánchez, F., & Burstein, E. (2009). *ANÁLISIS, DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA LEVA INDUSTRIAL MEDIANTE TÉCNICAS AVANZADAS DE MANUFACTURA*.
- Slater, Neil. (2011). *Mechanisms and mechanical devices sourcebook*. McGraw-Hill.
- To, C. W. S. (2017). *Synthesis Lectures on Mechanical Engineering Synthesis Lectures on Mechanical Engineering Introduction to Kinematics and Dynamics of Machinery*.
<http://store.morganclaypool.com>

Apéndice

 UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS "ESPE" CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA - TRABAJO DE TITULACIÓN ANÁLISIS DE LA LEVA CONVEXA TIPO B		 CÓDIGO: CL-001 REFERENCIA: TTCL-001 VERSIÓN: 15/06/2023						
				ENSAYOS				
ORD	160 r.p.m	180 r.p.m	200 r.p.m	220 r.p.m	250 r.p.m	270 r.p.m	CARGA	PRECARGA
1							0 [kg]	0 [kg]
2							0,4 [kg]	0 [kg]
3							0,8 [kg]	0 [kg]
4							1,2 [kg]	0 [kg]
5							1,6 [kg]	0 [kg]
6							2,0 [kg]	0 [kg]

ORD	DENOMINACIÓN	PERFIL TEÓRICA	MODELO EN 3D	FUERZA DE CONTACTO TEÓRICA	MEDICIÓN DE DECIBELES		PUNTO DE DESPEGUE	
					MÍNIMO	MÁXIMO	TEÓRICA	PRÁCTICO
1	LEVA POLINOMIAL 45678				74,6 [dB]	82,7 [dB]	218 r.p.m	200 r.p.m
2	LEVA POLIDÍNICA				75.4 [dB]	83.8 [dB]	238 r.p.m	325 r.p.m
3	LEVA DE LA SERIE DE FOURIER GRADO 13				79.2 [dB]	86.7 [dB]	530 r.p.m	> 400 r.p.m
4	LEVA CONVEXA TIPO A				67.1 [dB]	76.7 [dB]	160 r.p.m	160 r.p.m
5	LEVA CONVEXA TIPO B				73.2 [dB]	79.4 [dB]	225 r.p.m	225 r.p.m
6	LEVA TANGENCIAL				76.8 [dB]	85.3 [dB]	146 r.p.m	146 r.p.m

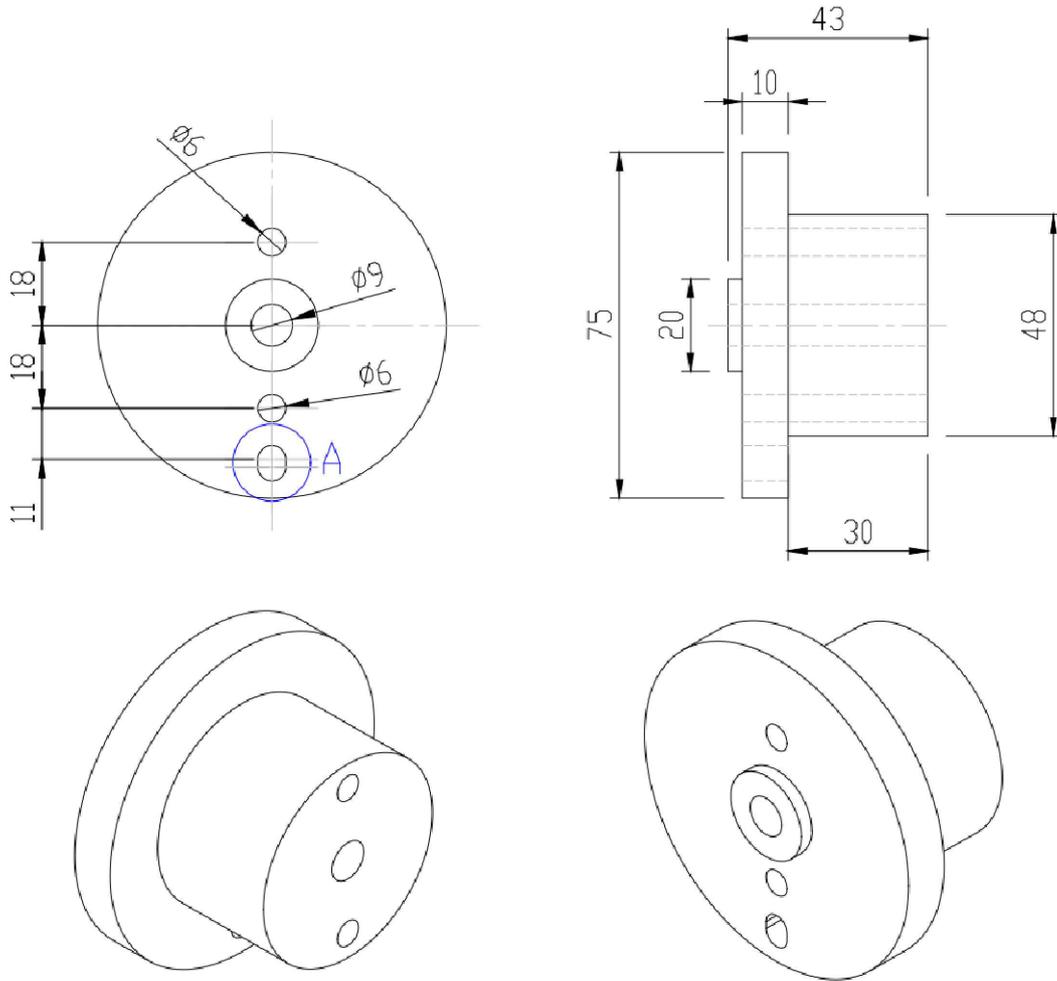
Apéndice C. Ensayos en el laboratorio de mecanismos

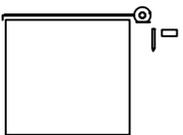
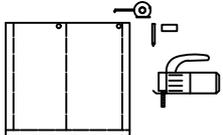
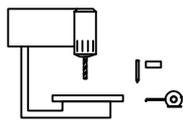
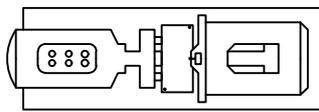
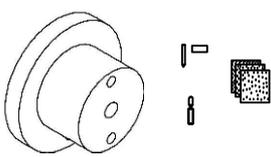


Una vez construido las levas polinomial 45678, polidínica 45678 y la leva de la serie de Fourier, se procedió a realizar los respectivos ensayos a los diferentes alumnos de las carreras de ingeniería mecánica e ingeniería mecatrónica para hacerles partícipes de la explicación práctica y teórica de las ventajas y futuras aplicaciones que se obtendrá con el diseño y construcción de las levas que hacen mención a nuestro trabajo de UIC.

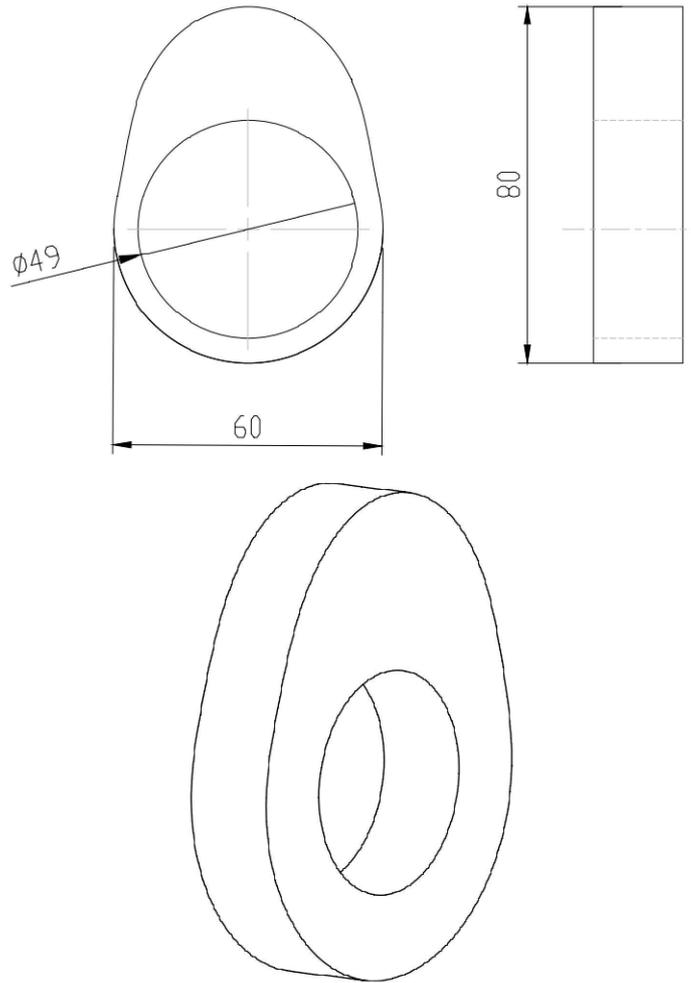


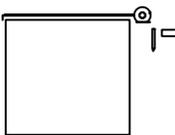
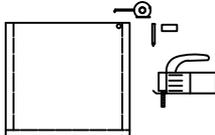
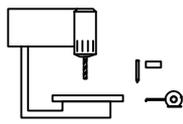
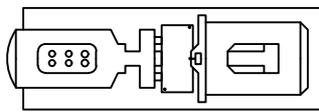
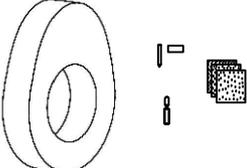
Tolerancia	Material	Dim. Brutas	Cantidad	Denominación	Referencia	
± 1 mm	Acero AISI 1018	80 X 230 X 45 mm	3	Base para las levas	BL-001-003	Hoja 1 de 4



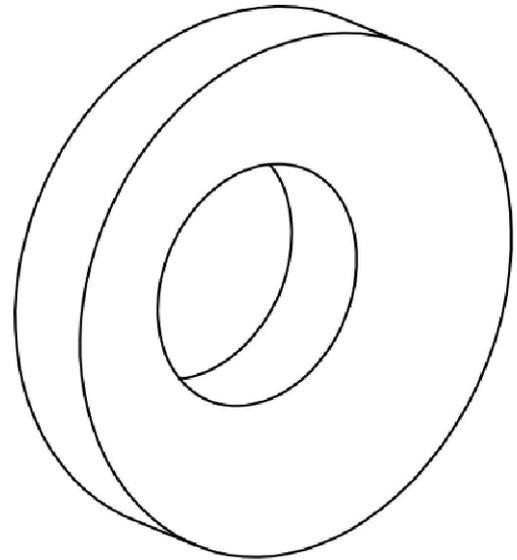
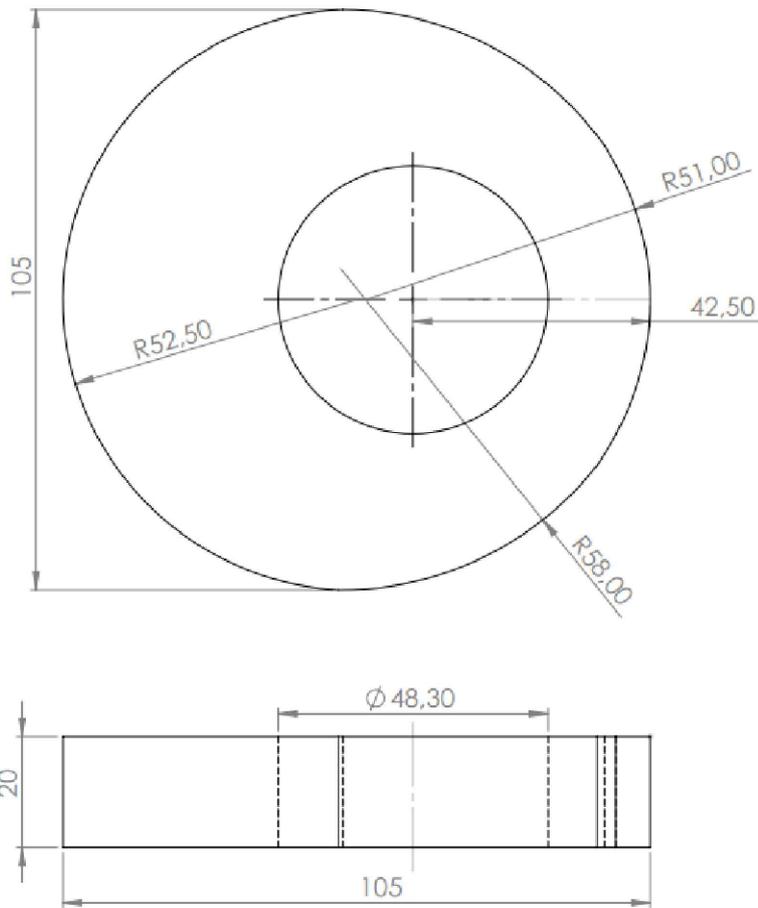
N°	DESCRIPCIÓN	ESQUEMAS	HERRAMIENTAS	Vc mm/min	n rpm	S mm/rev	Tiempo min
1	Verificar las dimensiones de la plancha de acero con el flexómetro y posteriormente trazar las medidas de acuerdo al plano.		- Flexómetro - Lápiz 2B - Borrador blanco	---	---	---	2
2	Trazar en la plancha de acero las dimensiones de acuerdo al plano y señalar tres puntos para perforar.		- Flexómetro - Lápiz 2B - Borrador blanco - Granete	---	---	---	8
3	Teniendo los puntos de referencia se procede a realizar una perforación con una broca de 1/8" por donde debe pasar el hilo para su corte.		- Taladro de columna - Lápiz - Pie de rey - Broca de 1/8"	---	800	---	12
4	Colocar la placa en la mesa de trabajo y posteriormente iniciar el proceso de electroerosión, pasando el hilo por los agujeros.		- Prensa - Máquina de electrohilo	---	400	---	180
5	Una vez realizado el corte por electrohilo se procede a realizar acabados, quitar rebabas con una lima y limpiar las imperfecciones.		- Franela - Limas de grano medio - Lijas N°150	---	---	---	40

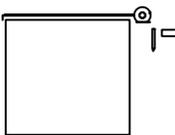
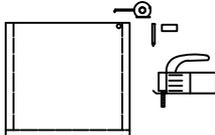
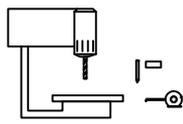
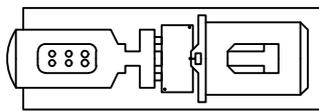
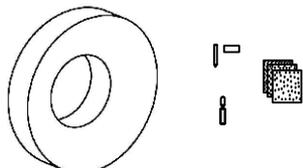
Tolerancia	Material	Dim. Brutas	Cantidad	Denominación	Referencia	Hoja 2 de 4
± 1 mm	Acero AISI 1018	90 X 70 X 20 mm	1	Leva polinomial 45678	L - 45678	



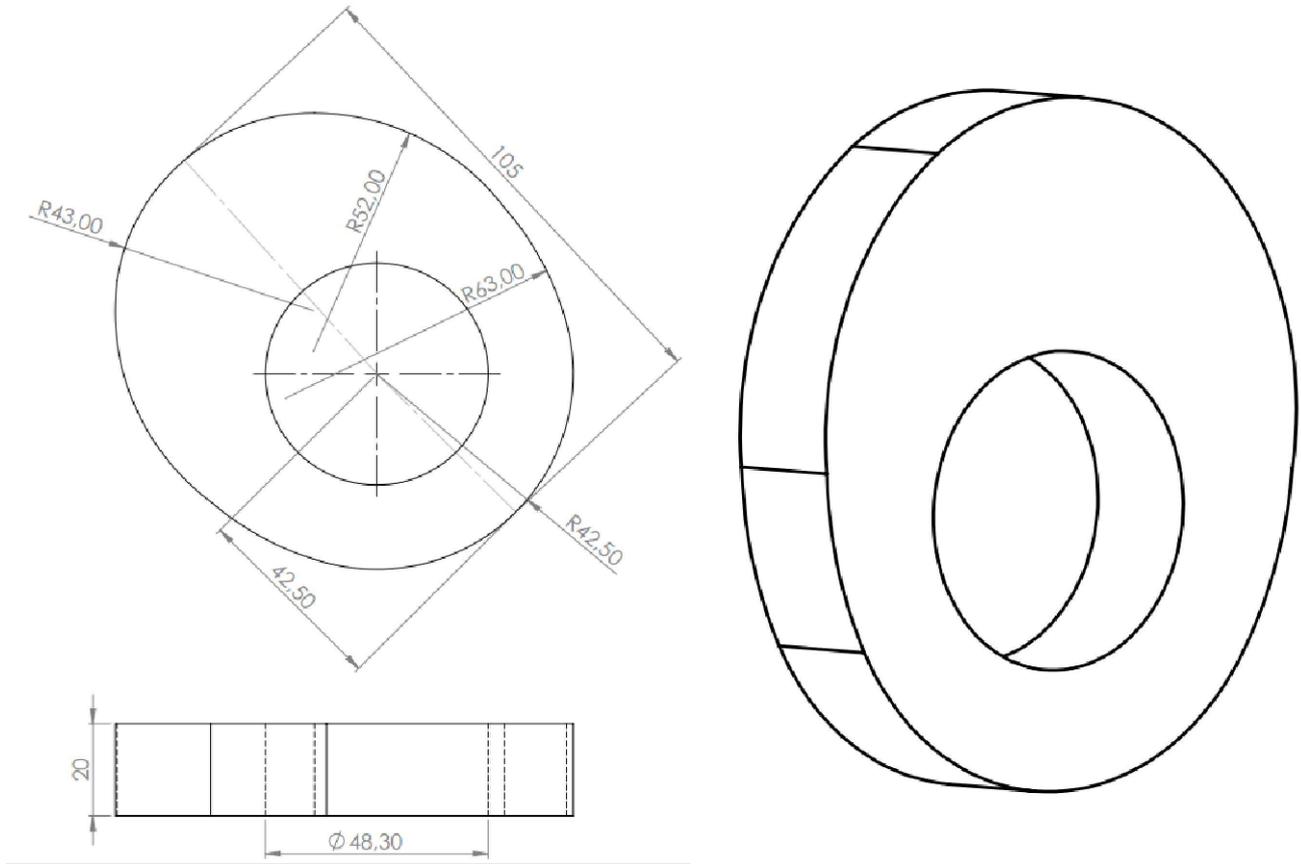
N°	DESCRIPCIÓN	ESQUEMAS	HERRAMIENTAS	Vc mm/min	n rpm	S mm/rev	Tiempo min
1	Verificar las dimensiones de la placa de acero con el flexómetro y posteriormente trazar las medidas de acuerdo al plano.		- Flexómetro - Lápiz 2B - Borrador blanco	---	---	---	2
2	Trazar en la placa de acero las dimensiones de acuerdo al plano y señalar tres puntos para perforar.		- Flexómetro - Lápiz 2B - Borrador blanco - Granete	---	---	---	5
3	Teniendo los puntos de referencia se procede a realizar una perforación con una broca de 1/8" por donde debe pasar el hilo para su corte.		- Taladro de columna - Lápiz - Pie de rey - Broca de 1/8"	---	800	---	8
4	Colocar la placa en la mesa de trabajo y posteriormente iniciar el proceso de electroerosión, pasando el hilo por los agujeros.		- Prensa - Máquina de electrohilo	---	400	---	60
5	Una vez realizado el corte por electrohilo se procede a realizar acabados, quitar rebabas con una lima y limpiar las imperfecciones.		- Franela - Limas de grano medio - Lijas N°150	---	---	---	30

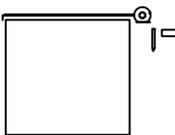
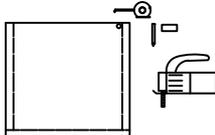
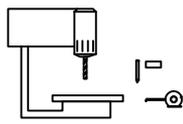
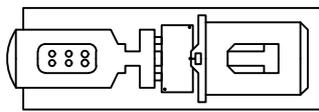
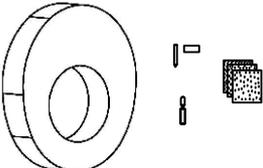
Tolerancia	Material	Dim. Brutas	Cantidad	Denominación	Referencia	Hoja 4 de 4
± 1 mm	Acero AISI 1018	110 X 110 X 20 mm	1	Leva de la serie de Fourier - 13	LF - 13	



N°	DESCRIPCIÓN	ESQUEMAS	HERRAMIENTAS	Vc mm/min	n rpm	S mm/rev	Tiempo min
1	Verificar las dimensiones de la placa de acero con el flexómetro y posteriormente trazar las medidas de acuerdo al plano.		- Flexómetro - Lápiz 2B - Borrador blanco	---	---	---	2
2	Trazar en la placa de acero las dimensiones de acuerdo al plano y señalar tres puntos para perforar.		- Flexómetro - Lápiz 2B - Borrador blanco - Granete	---	---	---	5
3	Teniendo los puntos de referencia se procede a realizar una perforación con una broca de 1/8" por donde debe pasar el hilo para su corte.		- Taladro de columna - Lápiz - Pie de rey - Broca de 1/8"	---	800	---	8
4	Colocar la placa en la mesa de trabajo y posteriormente iniciar el proceso de electroerosión, pasando el hilo por los agujeros.		- Prensa - Máquina de electrohilo	---	400	---	100
5	Una vez realizado el corte por electrohilo se procede a realizar acabados, quitar rebabas con una lima y limpiar las imperfecciones.		- Franela - Limas de grano medio - Lijas N°150	---	---	---	30

Tolerancia	Material	Dim. Brutas	Cantidad	Denominación	Referencia	Hoja 3 de 4
± 1 mm	Acero AISI 1018	110 X 130 X 20 mm	1	Leva polidínica	LP - 45678	



N°	DESCRIPCIÓN	ESQUEMAS	HERRAMIENTAS	Vc mm/min	n rpm	S mm/rev	Tiempo min
1	Verificar las dimensiones de la placa de acero con el flexómetro y posteriormente trazar las medidas de acuerdo al plano.		- Flexómetro - Lápiz 2B - Borrador blanco	---	---	---	2
2	Trazar en la placa de acero las dimensiones de acuerdo al plano y señalar tres puntos para perforar.		- Flexómetro - Lápiz 2B - Borrador blanco - Granete	---	---	---	5
3	Teniendo los puntos de referencia se procede a realizar una perforación con una broca de 1/8" por donde debe pasar el hilo para su corte.		- Taladro de columna - Lápiz - Pie de rey - Broca de 1/8"	---	800	---	8
4	Colocar la placa en la mesa de trabajo y posteriormente iniciar el proceso de electroerosión, pasando el hilo por los agujeros.		- Prensa - Máquina de electrohilo	---	400	---	80
5	Una vez realizado el corte por electrohilo se procede a realizar acabados, quitar rebabas con una lima y limpiar las imperfecciones.		- Franela - Limas de grano medio - Lijas N°150	---	---	---	30

