



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño de un sistema leva
seguidor desmodrómico para
generar desplazamientos
lineales recíprocos

TESIS

Que para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A:

Luis Bautista Morelos

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Ricardo Yáñez-Valdez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Noviembre 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló en las instalaciones del Centro de Ingeniería Avanzada de la División de Ingeniería Mecánica e Industrial de la Facultad de Ingeniería de la UNAM bajo la dirección del Dr. Ricardo Yáñez-Valdez. Proyecto realizado gracias al programa UNAM-PE106017 “Diseño y construcción de un banco de prácticas para producir micro desplazamientos”.

Agradecimientos

A mis padres Amada y Luis Enrique, por todo el apoyo incondicional y sacrificios que hicieron para que pudiera cumplir esta meta tan importante, este logro también es de ustedes.

A mis tíos Gemma y Santos, por su apoyo en mis últimos años de estudiante y sus consejos.

A mi hermana Melissa por haber cursado esta etapa universitaria juntos y siempre apoyándonos.

A mis abuelos Rufina y Luis, por sus valiosos consejos y por siempre motivarme para seguir adelante.

A mis amigos y familia, por estar conmigo en las buenas y en las malas.

Al Dr. Ricardo Yañez, por su apoyo, guía y consejos valiosos durante el desarrollo de este trabajo, es un gran profesor.

A la DGAPA por los recursos otorgados mediante el proyecto UNAM-DGAPA-PAPIME E106017.

Contenido

INTRODUCCIÓN	6
1 ANTECEDENTES.	8
1.1 SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE MOVIMIENTO ROTACIONAL EN LINEAL.....	8
1.1.1 Sistema piñón y cremallera.....	8
1.1.2 Sistema manivela-biela.....	9
1.1.3 Sistema tornillo-tuerca.....	9
1.1.4 Sistema leva-seguidor.....	10
1.2 TIPOS DE LEVAS	12
1.2.1 Tipo de movimiento del seguidor.....	12
1.2.2 Tipo de leva.....	13
1.2.3 Tipo de seguidor.....	14
1.2.4 Tipo de cierre de junta.....	15
1.2.5 Levas desmodrómicas.....	16
1.3 SENSORES Y TRANSDUCTORES	19
1.3.1 Tipos de transductores y sensores.....	20
1.3.2 LVDT.....	20
1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	22
1.4.1 Hipótesis.....	22
1.4.2 Objetivo general.....	23
1.4.3 Objetivos particulares.....	23
2 MARCO TEÓRICO.	24
2.1 DIAGRAMAS S-V-A-J.....	24
2.1.1 Ley fundamental del diseño de levas.....	25
2.1.2 Curva cicloidal.....	25
2.1.3 Curva senomodificado.....	27
2.1.4 Curva polinomio 4-5-6-7.....	29
2.1.5 Curva Berzak D.....	29
2.2 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LEVA CILÍNDRICA RANURADA CON SEGUIDOR DE TRASLACIÓN.	30
2.2.1 Ángulo de presión.....	30
2.2.2 Determinación del tamaño de la leva con factor.....	33
2.2.3 Radio de curvatura.....	34
2.3 DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE UNA LEVA CILÍNDRICA CON SEGUIDOR DE TRASLACIÓN	35
3 DISEÑO DE LA LEVA CILÍNDRICA DESMODRÓMICA.	36
3.1 DISEÑO DE LA LEVA CILÍNDRICA	36
3.1.1 Selección de curva de desplazamiento.....	36
3.1.2 Definición del radio de la leva.....	38
3.1.3 Comprobación del perfil de la leva.....	40
3.1.4 Leva cilíndrica desmodrómica.....	40

4	DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS Y RESULTADOS.....	42
4.1	DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS.....	43
4.1.1	<i>Módulo Sistema Tradicional</i>	43
4.1.2	<i>Módulo Sistema de Medición</i>	44
4.1.3	<i>Módulo Sistema Leva-Seguidor</i>	46
4.1.4	<i>Manufactura de las piezas</i>	48
4.2	PRUEBA DE MOVIMIENTO DEL SISTEMA LEVA SEGUIDOR.....	50
5	CONCLUSIONES.....	51
6	REFERENCIAS.....	52
7	ANEXO	53

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. I PROCESO DE DISEÑO MECÁNICO.	7
FIG. 1.1 SISTEMA PIÑÓN Y CREMALLERA DE UNA DIRECCIÓN DE AUTOMÓVIL.	8
FIG. 1.2. SISTEMA MANIVELA-BIELA.	9
FIG. 1.3 ESQUEMA DE UN SISTEMA TORNILLO-TUERCA.	10
FIG. 1.4 SISTEMA TORNILLO-TUERCA CON BOLAS RECIRCULANTES.	10
FIG. 1.5 TORNILLOS CON LEVA PARA AJUSTE EN LA ALINEACIÓN DE UNA SUSPENSIÓN DE AUTOMÓVIL.	11
FIG. 1.6 DIFERENTES TIPOS DE LEVAS [8].	12
FIG. 1.7 MECANISMO DE LEVA-SEGUIDOR DE TRASLACIÓN[5].	13
FIG. 1.8 MECANISMO DE LEVA-SEGUIDOR OSCILANTE [5].	13
FIG. 1.9 LEVAS CILÍNDRICAS COMERCIALES.	14
FIG. 1.10 TIPOS DE SEGUIDORES [5].	15
FIG. 1.11 ESQUEMA DE UN SISTEMA LEVA-SEGUIDOR CON RESORTE [5].	15
FIG. 1.12 ESQUEMA DE LEVA CON CIERRE DE FORMA [5].	16
FIG. 1.13 ESQUEMA DE LEVAS CONJUGADAS [5].	17
FIG. 1.14 ESQUEMA DE UNA LEVA DE CIERRE POR FORMA DE ANCHURA CONSTANTE [8].	18
FIG. 1.15 ESQUEMA DE UNA LEVA CILÍNDRICA DE CARA RANURADA [9].	18
FIG. 1.16 ESQUEMA DISEÑO ALTERNO DE SEGUIDOR PARA LEVAS RANURADAS.	19
FIG. 1.17 COMPONENTES DE UN LVDT.	21
FIG. 1.18 SISTEMA TRADICIONAL TORNILLO-TUERCA.	22
FIG. 2.1 GRÁFICA DE LAS CURVAS POSICIÓN CICLOIDAL, VELOCIDAD, ACELERACIÓN Y JERK.	27
FIG. 2.2 GRÁFICA DE CONSTRUCCIÓN DE CURVA SENO MODIFICADO [8].	28
FIG. 2.3 ESQUEMA DEL ÁNGULO DE PRESIÓN EN LEVA CILÍNDRICA CON SEGUIDOR DE TRASLACIÓN.	31
FIG. 2.4 DEDUCCIÓN DEL ÁNGULO DE PRESIÓN EN LEVA CILÍNDRICA CON SEGUIDOR DE TRASLACIÓN.	32
FIG. 3.1 GRÁFICA COMPARATIVA CURVAS DE DESPLAZAMIENTO.	36
FIG. 3.2 GRÁFICA COMPARATIVA CURVAS DE VELOCIDAD.	37
FIG. 3.3 GRÁFICA COMPARATIVA DE CURVAS DE ACELERACIÓN.	37
FIG. 3.4 GRÁFICA COMPARATIVA DE CURVAS DE SOBRE ACELERACIÓN O JERK.	38
FIG. 3.5 ÁNGULO DE PRESIÓN DE LA LEVA CILÍNDRICA.	39
FIG. 3.6 RADIO DE CURVATURA PARA SEGUIDOR DE RADIO 5.25 [MM].	39
FIG. 3.7 COMPROBACIÓN DEL PERFIL DE LA LEVA.	40
FIG. 3.8 ADAPTACIÓN DEL SEGUIDOR DE DOBLE RODILLO A LEVA CILÍNDRICA.	41
FIG. 4.1 CROQUIS DE LOS MÓDULOS DEL BANCO DE PRUEBAS. VISTA SUPERIOR.	42
FIG. 4.2 SOPORTES DE LAS GUÍAS.	43
FIG. 4.3 SOPORTE DE LA TUERCA.	44
FIG. 4.4 TORNILLO SIN FIN Y ACTUADOR.	44
FIG. 4.5 SOPORTE DE CARCASA DEL LVDT.	45
FIG. 4.6 VÁSTAGO DEL LVDT.	45
FIG. 4.7 LEVA CILÍNDRICA RANURADA DESMODRÓMICA.	46
FIG. 4.8 CHUMACERAS DE LA LEVA.	46
FIG. 4.9 SOPORTE DEL MOTOR.	47
FIG. 4.10 SOPORTE DEL SEGUIDOR.	47
FIG. 4.11 EXPLOSIÓN DEL ENSAMBLE DEL SEGUIDOR EXCÉNTRICO.	48
FIG. 4.12 PLANTA BANCO DE PRUEBAS.	49
FIG. 4.13 ISOMETRICO BANCO DE PRUEBAS.	49
FIG. 4.14 CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS. VISTA PLANTA.	50

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 RESUMEN DE VALORES DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LA LEVA.	40
---	----

INTRODUCCIÓN

El diseño en ingeniería es un proceso iterativo para lograr satisfacer una necesidad o resolver un problema. El proceso de diseño requiere que el diseñador tenga buena comunicación, buena toma de decisiones; apoyándose en herramientas de la ingeniería como las matemáticas, estadística, computación, entre otras, que se combinan para poder obtener un producto confiable, funcional, seguro y que sea lo más fácil posible de fabricar. Al inicio del proceso de diseño se deben establecer objetivos y criterios, continuando de las etapas de síntesis, análisis, construcción, pruebas y evaluación.

En el diseño mecánico existen otras consideraciones que incluyen las dimensiones, tolerancias, unidades y cálculos [1]. El término diseño mecánico se refiere al diseño de diferentes tipos de sistemas en donde conviven la rama de la energía y la rama del movimiento [2].

El diseñador debe superar el “síndrome de papel en blanco”, que se refiere a no saber qué tipo de elementos de máquina se adaptan al producto que se está diseñando. En ocasiones se pueden adaptar poleas, cadenas, engranes, levas, etc., para satisfacer una necesidad. Para poder evitar este “síndrome”, existen muchos recursos en los que se puede apoyar el diseñador, entre los que se incluyen muchas fuentes de información y abundantes herramientas de diseño por computadora.

Para poder iniciar el proceso de diseño es necesario definir las funciones, especificaciones y requerimientos de diseño. En las funciones se debe indicar lo que se supone debe hacer el dispositivo de manera general; en los requerimientos se detallan en forma minuciosa y específica, es decir, cuantitativamente los parámetros que se quieren seguir (presión neumática, voltaje, capacidad, etc.) y los requerimientos son los aspectos cualitativos del dispositivo que pueden ser el color, tipo de ensamble, etc. [2].

En el diseño mecánico nunca debe perderse de vista la parte de la manufactura, debido a que puede diseñarse piezas que son muy complicadas de construir lo cual incrementa el costo del producto. Así como también se debe tener una idea muy clara de cómo se va a ensamblar y desensamblar para mantenimiento. Es por ello, que se debe incluir el diseño

para manufactura que hace más fácil la fabricación, proporcionando la mejor alternativa y el diseño para ensamble hace que el producto sea más fácil de ensamblar. Cuando se juntan los dos aspectos anteriores se le conoce como diseño para manufactura y ensamble. En [3], se exponen metodologías del diseño para manufactura y ensamble que permiten disminuir componentes, seleccionar el mejor método de manufactura y disminuir el tiempo de ensamble.

Metodología de diseño

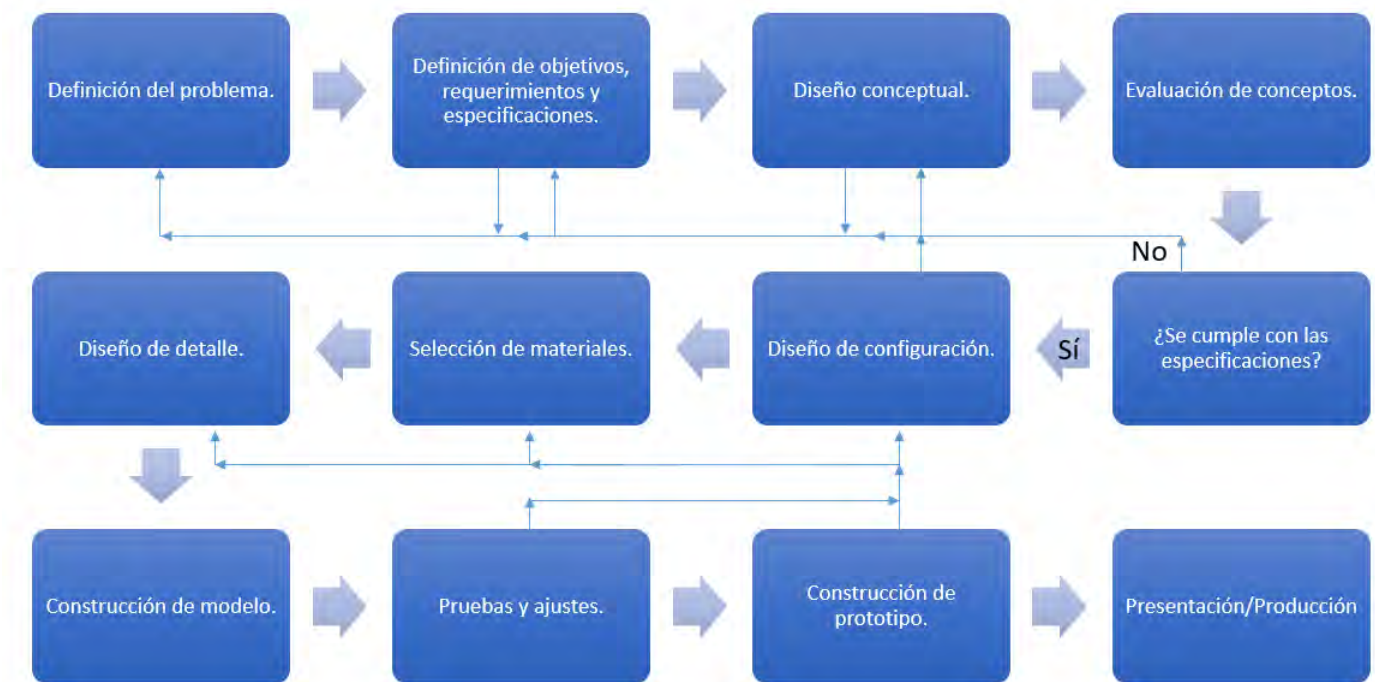


Fig. i Proceso de diseño mecánico.

Tal como se comentó al inicio, el proceso de diseño mecánico no es lineal, es decir, se pueden realizar iteraciones y dar pasos atrás para lograr cumplir con todos los requerimientos, calidad y seguridad que requiera el producto o dispositivo diseñado.

En este trabajo se aborda el diseño mecánico de un sistema leva-seguidor con el que se pretende generar movimientos lineales reciprocantes a partir de un movimiento rotatorio; aplicando el proceso de diseño previamente planteado y utilizando herramientas de diseño para la toma de decisiones. Los resultados mostraron que la propuesta de diseño tiene potencial para generar desplazamientos precisos.

Capítulo 1

1 ANTECEDENTES.

Un sistema mecánico es una combinación de elementos o componentes que actúan de manera conjunta para realizar una función definida, estos sistemas están conformados por (mecanismos, actuadores, eslabones, etc.). La función definida por el sistema no se podría realizar con un elemento de manera individual. Los mecanismos al mismo tiempo son un conjunto de elementos acoplados de una forma predeterminada para la transmisión de movimiento o carga por medio de un actuador.

1.1 Sistemas de conversión de movimiento rotacional en lineal.

Se pueden implementar diferentes tipos de sistemas para convertir movimiento rotacional en lineal, y viceversa. Algunos de ellos son reversibles lo cual es bueno en ciertas aplicaciones, pero en otras donde se requiere mantener una carga es posible hacerlo con frenos mecánicos y con otros sistemas.

1.1.1 Sistema piñón y cremallera.

Este sistema convierte el movimiento circular en lineal por medio de dos elementos dentados, el primer elemento es un piñón que gira sobre su propio eje; el segundo elemento es una cremallera la cual es barra dentada, la cremallera surge del concepto de un engrane que tiene un radio que se considera infinito y por lo tanto genera una involuta que es una línea recta.

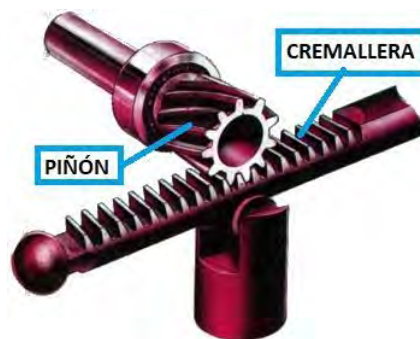


Fig. 1.1 Sistema piñón y cremallera de una dirección de automóvil.

Este sistema tiene un error de paso inherente a la cremallera, para corregirlo se deben aplicar cargas al sistema ya sea por sistemas de precarga mecánica, en el cual la precarga mecánica se alcanza mediante un empuje elástico (tipo muelle) de los dos piñones en sentido opuesto; o emplear sistemas de precarga eléctrica que consiste en colocar dos servomotores que alcanzan la precarga frenando un piñón en dirección contraria al otro [4].

El uso de este tipo de sistema con juego cero encarece de manera considerable el desarrollo del producto. Este sistema es empleado en gatos mecánicos, montacargas, ferrocarriles, entre otros.

1.1.2 Sistema manivela-biela

Este sistema consiste en un mecanismo de dos elementos mecánicos articulados entre sí, la manivela gira alrededor de su propio eje cuyo extremo este ensamblado mediante una junta a la biela, la cual es una barra rígida. Este mecanismo es de los más importantes y conocidos ya que se utiliza en motores de combustión interna, máquinas de vapor, máquinas de coser, herramientas mecánicas, etc.

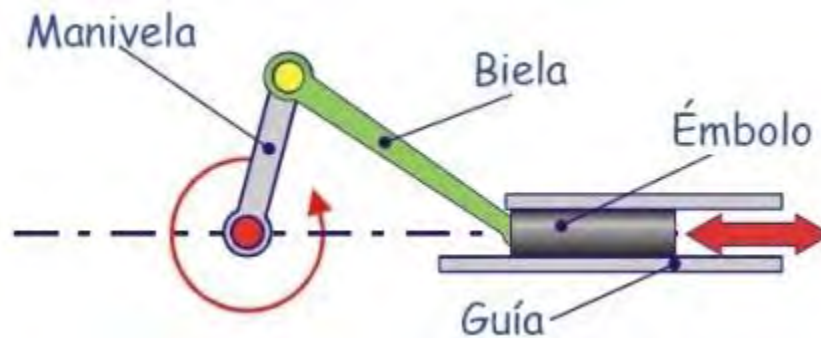


Fig. 1.2. Sistema manivela-biela.

1.1.3 Sistema tornillo-tuerca.

Estos sistemas además de servir como elemento de unión entre dos o más piezas, sirve para convertir movimiento rotacional a lineal, está compuesto por una tuerca alojada en un tornillo. Si se mantiene fija la tuerca el tornillo tiene un movimiento rectilíneo dentro de ella. Al contrario, si el tornillo se mantiene fijo, la tuerca tendrá un movimiento rectilíneo.

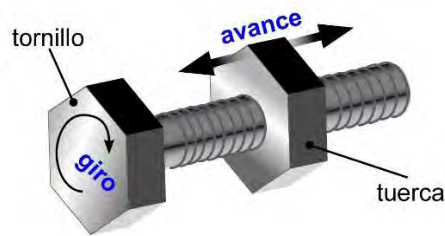


Fig. 1.3 Esquema de un sistema tornillo-tuerca.

Los sistemas tornillo-tuerca presentan errores de posición inherentes a las holguras del ensamble; para reducir el error es necesario aplicar una precarga externa al sistema, o bien incluir al sistema tuercas con roscas precargadas al tornillo con bolas recirculantes. Este sistema elimina el error de posición y tienen una buena precisión posicional [4], sin embargo, este tipo de sistema tiene un costo elevado.

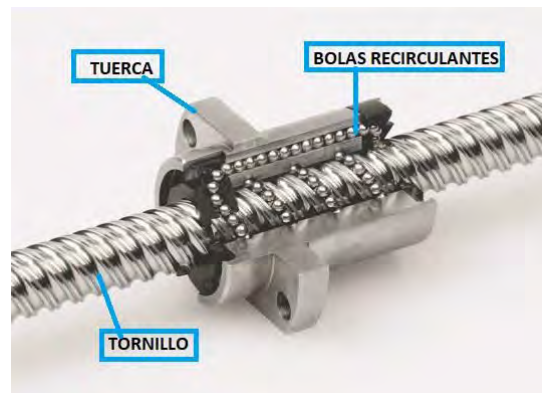


Fig. 1.4 Sistema tornillo-tuerca con bolas recirculantes.

1.1.4 Sistema leva-seguidor

Una leva se puede definir como un elemento de máquina capaz de propulsar a otro elemento llamado seguidor por contacto directo (semi-junta), para realizar una serie de movimientos determinados.

En [5], se define a un mecanismo leva seguir como un mecanismo de cuatro barras con eslabones de longitud variable, por lo cual, el mecanismo leva-seguidor es un generador de función flexible.

Las levas en general son elementos de máquinas muy versátiles que pueden generar una gran variedad de movimientos del seguidor como salidas del sistema, mediante la

generación de una función de movimiento aplicada a una superficie curva de la leva. En los mecanismos leva-seguidor se pueden programar detenciones del mecanismo sin apagar o detener el actuador del sistema, lo cual, cuando no se contaba con servomotores permitió el uso de los motores eléctricos en aplicaciones donde se requerían hacer pausas del sistema.

Los mecanismos leva-seguidor son de uso común y de gran importancia en maquinaria moderna, en los automóviles se pueden encontrar una variedad de sistemas leva seguidor, que accionan y alternan las válvulas de admisión y escape dicho sistema es mejor conocido como árbol de levas, así como también sistemas que aseguran una alineación correcta de la suspensión (ajuste del camber) [6], con el chasis permitiendo la aplicación de las más mínimas tolerancias. Otra aplicación de los sistemas levas seguidor es en las máquinas de coser para cambiar la función de la puntada; en destiladoras para accionar flotadores de los tanques; entre otras aplicaciones en máquinas de uso común.

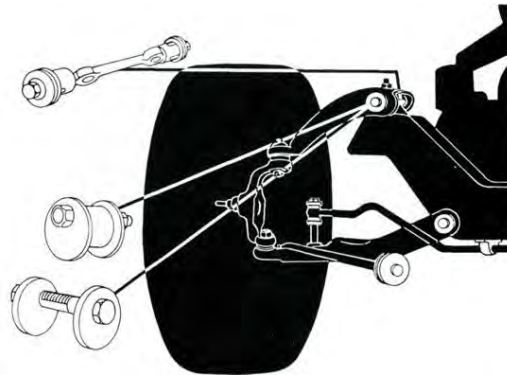


Fig. 1.5 Tornillos con leva para ajuste en la alineación de una suspensión de automóvil.

El extenso uso de las levas en la maquinaria moderna radica en que se puede sustituir un mecanismo de 4 barras por un sistema leva-seguidor en un espacio menor, así como también tienen buen desempeño en aplicaciones que demandan altas velocidades, dado que tienen la ventaja de precisión, fiabilidad y adaptabilidad para cumplir con los requisitos de movimientos complejos, como los mecanismos de manipulación y alimentación [7].



Fig. 1.6 Diferentes tipos de levas [8].

Debido al rápido desarrollo de maquinaria-herramienta de alta velocidad el uso de levas espaciales en particular ha crecido de igual manera, pero con funciones de movimiento más complejas.

1.2 Tipos de levas

La versatilidad de los mecanismos leva- seguidor, genera que cada leva debe diseñarse para cada exigencia específica, por lo que, existe una amplia variedad de formas y tipos de estos mecanismos, por lo cual, es necesario clasificarlos de acuerdo con varios criterios:

1.2.1 Tipo de movimiento del seguidor

El tipo de movimiento está dado por la aplicación deseada, el cual puede ser de traslación u oscilante.

Traslación: En este tipo el seguidor tiene un movimiento de traslación rectilínea.

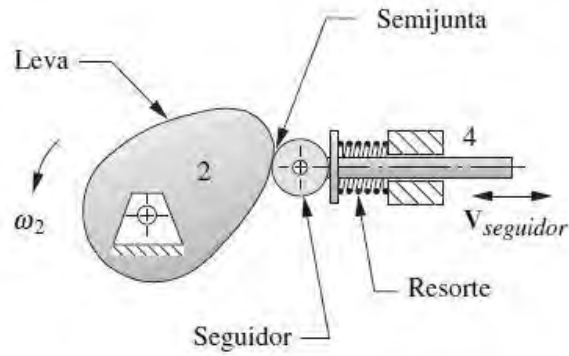


Fig. 1.7 Mecanismo de leva-seguidor de traslación[5].

Oscilatorio: En este tipo el movimiento del seguidor es de manera rotacional.

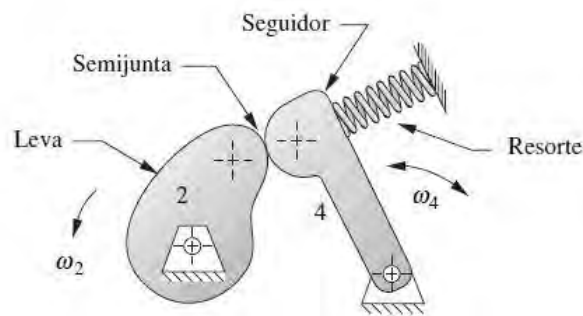


Fig. 1.8 Mecanismo de leva-seguidor oscilante [5].

1.2.2 Tipo de leva

Leva axial

Una leva es axial cuando el movimiento del seguidor es paralelo al eje de rotación de la leva, dentro de este tipo de levas se encuentran las levas cilíndricas y de globo.



Fig. 1.9 Levas cilíndricas comerciales.

Leva radial

Una leva es radial cuando el movimiento del seguidor es normal al eje de rotación de la leva, este tipo de leva también es llamada leva de plana o de placa.

1.2.3 Tipo de seguidor

Seguidor de rodillo

Este tipo de seguidor es el más común en la maquinaria, consiste en cojinetes de bolas o rodillos con detalles de montaje personalizados [9]. Este tipo de seguidor es el más costoso, sin embargo, tiene menor fricción ya que rueda y es fácil de reemplazar.

Seguidor de cara plana

En este tipo de seguidor en lugar de tener un rodillo se tiene una superficie plana que contacta con la leva. Este seguidor tiene un costo menor y llega a ser más pequeño que el de rodillo, por lo que también son de uso común, este tipo de seguidor se puede observar en un tren de válvulas automotrices [5].

Seguidor curvo

Este tipo de seguidor es similar al de cara plana, pero con la diferencia de tener una cierta curvatura en la cara del seguidor.

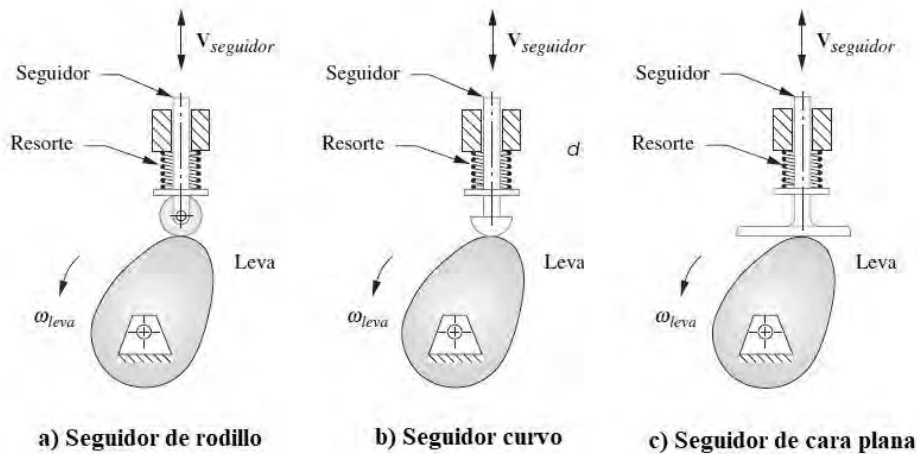


Fig. 1.10 Tipos de seguidores [5].

1.2.4 Tipo de cierre de junta.

Cierre por fuerza

En este tipo de leva se necesita un elemento por lo general es un resorte que aplique una fuerza externa a la junta para poder mantener el contacto entre la leva y el seguidor [5]. Cuando la fuerza generada por la leva supera a la fuerza del resorte genera fuerzas dinámicas negativas induciendo a que el seguidor realice un salto provocando choques perjudiciales para la leva. En [10], se plantea que el resorte del seguidor sea colocado de modo que precargue todos los pivotes en una dirección consistente para controlar el juego entre dientes en las juntas.

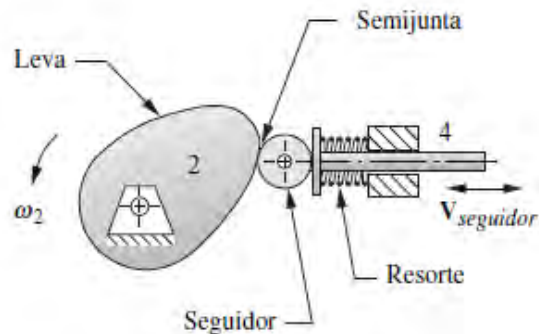


Fig. 1.11 Esquema de un sistema leva-seguidor con resorte [5].

Cierre por forma

Las levas de cierre por forma utilizan un cierre por forma que proporciona una restricción geométrica en la junta, sin tener que utilizar resortes o precargas al sistema. Al lograr eliminar el resorte o precarga, se genera que el modelo dinámico del sistema se reduzca a un solo elemento capaz de almacenar energía, disminuyendo así la resonancia del sistema y eliminando el salto del seguidor sin importar la velocidad del sistema.

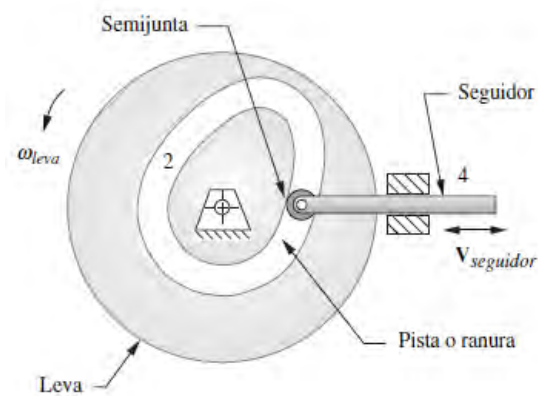


Fig. 1.12 Esquema de leva con cierre de forma [5].

1.2.5 Levas desmodrómicas

Dentro de la clasificación de levas de cierre por forma se encuentran las levas desmodrómicas, el término “desmodrómico” proviene del griego desmos (controlado o cautivo) y dromos (curso o trayecto).

Un mecanismo de leva desmodrómico utiliza un cierre geométrico por dos pares superiores de tal manera que ambos imponen la misma restricción cinemática lo cual garantiza que la pérdida de contacto en uno de los pares es impedida por el otro par [11].

Una aplicación que tiene este tipo de mecanismos de leva es para accionar los trenes de válvulas de motores de carreras que permiten mayores velocidades al eliminar el salto o flotación de las válvulas (seguidor).

Las levas desmodrómicas se pueden subdividir en 4 subtipos de levas:

Levas conjugadas

Estos tipos de levas presentan una restricción geométrica al utilizar dos levas en el mismo eje de rotación, esto hace que una leva genere un movimiento del seguidor en sentido contrario a la otra, y de esta manera el seguidor permanece en contacto con alguna de las levas en cualquier momento, proporcionando tanto fuerzas positivas como negativas.

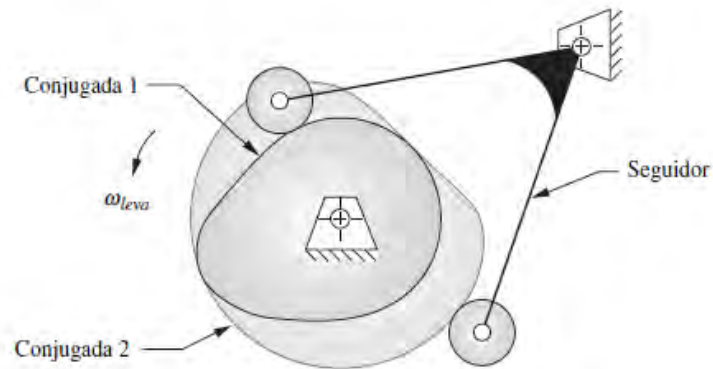


Fig. 1.13 Esquema de levas conjugadas [5].

Levas de anchura y diámetro constante.

Este tipo de levas también se les llama levas Yoke, en las levas de anchura constante el seguidor confina a la leva en su interior manteniendo una distancia constante en todo momento, este tipo de levas no son muy utilizadas, pero presentan una disminución del juego mecánico (conocido como backlash), por estar siempre en contacto con el seguidor. Las levas de diámetro constantes son levas planas que tienen una excentricidad y funciona de manera similar a la leva de anchura constante.

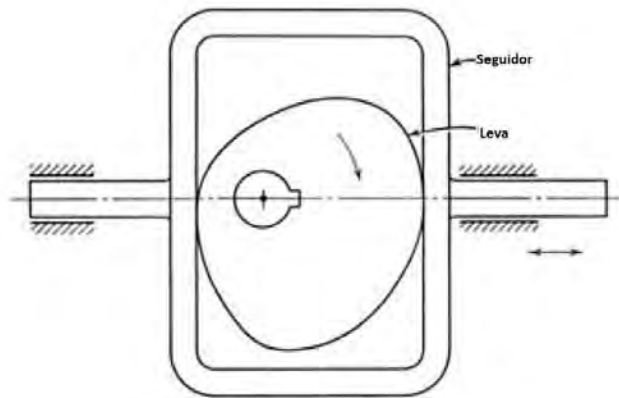


Fig. 1.14 Esquema de una leva de cierre por forma de anchura constante [8].

Leva ranurada

Una leva ranurada es otro tipo de leva de cierre por forma, las cuales capturan al seguidor en su ranura para empujarlo y jalarlo.

Las levas de cierre por forma son más caras debido a que son difíciles de maquinar, se deben rectificar dos superficies, al realizarles tratamiento térmico a las levas se debe hacer de nuevo una rectificación ya que presentan distorsión en la ranura.

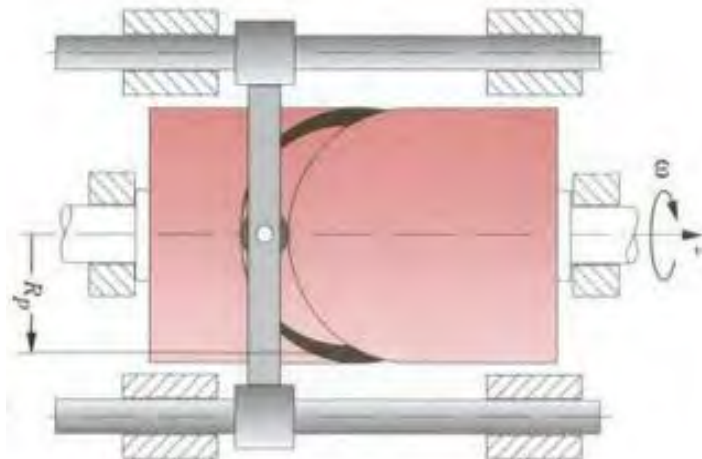


Fig. 1.15 Esquema de una leva cilíndrica de cara ranurada [9].

Debido al confinamiento del seguidor se utiliza el seguidor de rodillo en este tipo de levas, el rodillo debe presentar el juego mecánico necesario para que gire libremente sobre su eje, ese juego no produce una restricción real entre la leva al seguidor, ya que, el rodillo contactará alternadamente con cada lado de la ranura de la leva, cambiando eventualmente su sentido de rotación.

Una manera práctica de para eliminar el juego mecánico presente entre el rodillo y la ranura, consiste en colocar dos rodillos sobre el mismo eje del seguidor de manera que cada uno contacte con una superficie de la ranura, siendo los rodillos de distintas dimensiones, sin embargo, también se puede colocar dos rodillos excéntricos con el mismo diámetro.

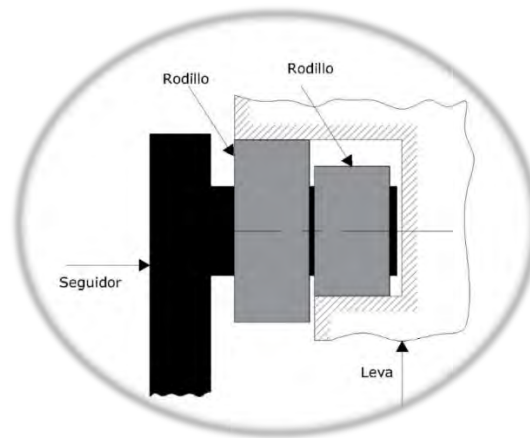


Fig. 1.16 Esquema diseño alternativo de seguidor para levas ranuradas.

1.3 Sensores y transductores

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar señales y responde a éstas con una señal eléctrica de salida. Es posible medir variables físicas al utilizar este sensor como un transductor. Un transductor es un dispositivo que convierte una señal de forma física en una señal correspondiente que tiene una forma física diferente. Se pueden utilizar para medir desplazamientos, presión, fuerza, caudal, etc.

Un transductor de posición puede medir la distancia entre un punto de referencia y la ubicación actual a la que se encuentra. Dicho punto de referencia puede ser una marca en el cuerpo del transductor de posición [12].

1.3.1 Tipos de transductores y sensores

Se puede clasificar a los transductores y sensores en dos tipos, dependiendo de la forma de la señal convertida:

Transductores digitales:

Este tipo de transductores producen una señal de salida digital en la forma de un conjunto de bits formando una serie de pulsaciones que pueden ser contadas y las señales digitales representan el valor de la variable física medida.

Transductores analógicos.

Los transductores analógicos proporcionan una señal analógica continua. Esta señal puede ser tomada como el valor de la variable física que se mide.

Entre los sensores de posición lineales destaca el transformador diferencial de variación lineal debido a su casi infinita resolución, poco razonamiento y alta repetibilidad.

1.3.2 LVDT

Un transformador lineal variable diferencial (LVDT, por sus siglas en inglés Linear Variable Differential Transformer) es un dispositivo electromagnético que produce una tensión proporcional al desplazamiento de un núcleo ferromagnético móvil [13]. Es utilizado para medir, controlar y monitorear el movimiento de algún dispositivo. Un LVDT presenta buena sensibilidad en las mediciones efectuadas con este dispositivo, tiene alta fiabilidad, buena resolución, repetitividad, resistencia elevada, fácil de instalar y se puede utilizar en posición vertical u horizontal, estos atributos hacen que el LVDT sea uno de los dispositivos más empleados en la industria. Los principales componentes de un LVDT se muestran en la Fig. 17.

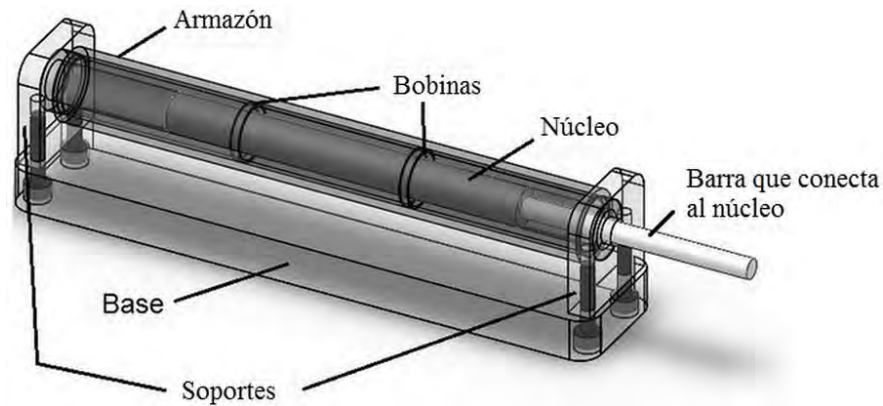


Fig. 1.17 Componentes de un LVDT.

Un transductor LVDT se compone de tres bobinas que se colocan a lo largo un tubo, se enrollan con alambre magnético de bajo calibre y se debe calcular el número de vueltas necesarias para controlar la tensión en el alambre. El núcleo es un redondo, hecho de una aleación Níquel-Hierro o ferrita sintética. Una carcasa externa hecha de un material con alta permeabilidad magnética protege al dispositivo de interferencias causadas por campos magnéticos externos. El vástago es la barra que se ensambla al núcleo, el cual debe ser de un material no ferromagnético. El modelo matemático del funcionamiento de un LVDT se puede consultar en [14].

1.4 Descripción del problema

Tradicionalmente, los sistemas de transmisión de desplazamiento lineal incluyen un arreglo tornillo-tuerca. A este tipo de sistemas se les asocia errores de posición asociados al juego mecánico, y son inherentes a las holguras y tolerancias del mismo ensamble. Para eliminar el juego mecánico se debe adaptar al sistema una precarga, o bien, incluir tornillos de bolas re-circulantes, sin embargo, incluir este tipo de tecnologías suele encarecer el desarrollo de un proyecto.

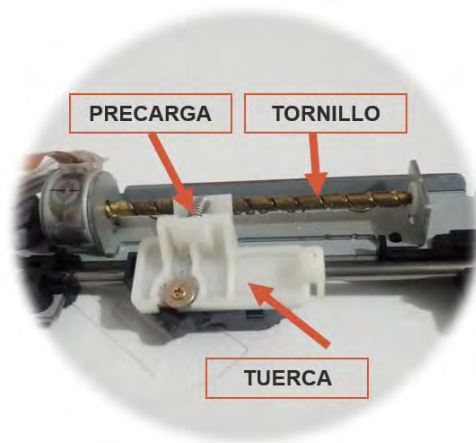


Fig. 1.18 Sistema tradicional tornillo-tuerca.

Se vislumbra que el sistema leva-seguidor de tipo cilíndrico es una buena alternativa para sustituir el sistema tradicional, debido a que una cualidad que presentan este tipo de sistemas es que su implementación reduce el error de posición del ensamble. Si a esto sumamos el concepto desmodrómico al diseño de la leva cilíndrica, entonces los resultados esperados deberían ser aún mejores.

1.4.1 Hipótesis

La implementación del cierre geométrico desmodrómico a una leva cilíndrica, genera desplazamientos lineales recíprocos con carreras iguales al generado por un sistema tradicional tornillo-tuerca.

1.4.2 Objetivo general

- Diseñar un sistema leva-seguidor de tipo espacial para producir desplazamientos lineales recíprocos y compararlo con un sistema tradicional tornillo-tuerca.

1.4.3 Objetivos particulares

- Diseñar un sistema de leva cilíndrica desmodrómico y su seguidor para generar un desplazamiento lineal recíproco con una carrera de 40 [mm].
- Diseñar y construir un banco de pruebas que incluya el sistema leva seguidor propuesto y un sistema tradicional tornillo-tuerca como sistema comparativo.
- Determinar las dimensiones principales requeridas para poder incluir en un trabajo a futuro un transductor de desplazamiento lineal, el cual, será especialmente diseñado para el banco de pruebas.
- Comparar los movimientos de los dos sistemas incluidos en el banco de pruebas.

Capítulo 2

2 MARCO TEÓRICO.

2.1 Diagramas S-V-A-J

El primer paso que se debe realizar en el diseño de levas en general es definir el tipo de movimiento del seguidor mediante funciones matemáticas, dichas funciones se pueden obtener desde métodos gráficos donde son trazadas las curvas de desplazamiento “s”, su primera derivada, es decir, la velocidad “v”, la segunda derivada o aceleración “a” y finalmente la sobre aceleración o jerk “j”. La variable independiente que se utiliza comúnmente es el ángulo de rotación de la leva θ , aunque también se puede utilizar como variable al tiempo “t” con la relación de la velocidad angular:

$$\theta = w * t \quad (1)$$

Donde θ es el ángulo de giro de la leva, w es la velocidad angular y t es el tiempo. Se deben manejar durante las operaciones unidades en radianes.

Como se mencionó en el capítulo anterior una de las razones por la que las levas son tan utilizadas en la maquinaria moderna, es debido a que pueden generar una posición de reposo en la salida de movimiento del seguidor sin detener el actuador del sistema. Para ello es necesario que en el periodo deseado la velocidad, aceleración y por lo tanto la sobre aceleración o jerk tengan un valor de cero. Las detenciones son establecidas en cualquier periodo que se desee en los 360° de rotación de la leva, incluso se pueden tener múltiples detenciones. Para que las detenciones sean en el momento deseado es necesario contar con un diagrama de temporización para sincronizarse con cada ciclo de máquina, es decir, un giro completo del eje motriz maestro [9].

Los movimientos que puede realizar el seguidor además de la posición de reposo, son de subida y bajada. La subida es el periodo de transición en el que el seguidor pasa de estar en una posición $s = 0$, a un estado de movimiento donde $s > 0$, la bajada es el movimiento de retorno a la posición $s = 0$.

Es importante que, al momento de diseñar las funciones matemáticas, se eviten cambios bruscos en las curvas s-v-a-j, se deben preferir funciones suaves. Para evitar problemas de vibraciones producidas por las sobre aceleraciones generadas por el sistema. Se podría pensar que, para pasar de una posición a otra, basta con una función lineal, sin embargo, al tener una velocidad constante se crean discontinuidades en las fronteras de los periodos producidas por picos de aceleración y sobre aceleración infinitos, lo cual provoca que las fuerzas dinámicas sean muy grandes y generen esfuerzos elevados y por lo tanto la vida útil de la leva disminuye drásticamente, siendo una mala leva. Para evitar este problema en [9], se propone una regla sencilla para tener buenos resultados dinámicos llamada Ley fundamental del diseño de levas.

2.1.1 Ley fundamental del diseño de levas

La ley fundamental de diseño de levas aplica a cualquier tipo de leva, sin importar la velocidad y no es más que una recomendación para obtener resultados dinámicos aceptables. Las levas deben diseñarse bajo la siguiente restricción:

La función de la leva debe ser continua en la primera y segunda derivada de desplazamiento a través de todo el intervalo (360 grados) [9]. Como corolario se recomienda que la función de rapidez de aceleración (jerk) debe ser finita a través de todo el intervalo (360°).

Existen varios tipos de funciones que cumplen con la regla anterior como lo son: función armónica simple, funciones cicloidalas, funciones combinadas, polinomiales y funciones avanzadas.

2.1.2 Curva cicloidal

La función cicloidal se genera a partir de definir una función armónica simple para la aceleración e integrando hasta llegar a la función de posición:

$$a = A * \text{sen}(2\pi * \theta) \quad (2)$$

Donde A es la amplitud de onda y θ el ángulo de giro de la leva.

Se debe normalizar la variable independiente entre el periodo de cualquier segmento, dicho periodo es variable para cada segmento y es definido por β . Se divide de esta manera para que sea adimensional la expresión.

Entonces, al normalizar la ecuación 2 se tiene que:

$$a = A * \text{sen} \left(2\pi * \frac{\theta}{\beta} \right) \quad (3)$$

Para obtener la velocidad y posición es necesario integrar la ecuación 3, dos veces.

$$a = \frac{dv}{d\theta} = A * \text{sen} \left(2\pi * \frac{\theta}{\beta} \right)$$

$$\int dv = \int A * \text{sen} \left(2\pi * \frac{\theta}{\beta} \right) d\theta$$

$$v = -A * \frac{\beta}{2\pi} \cos \left(2\pi * \frac{\theta}{\beta} \right) + c1$$

Para encontrar la constante de integración $c1$ se utiliza la condición de frontera $v = 0$, cuando $\theta = 0$.

$$\therefore c1 = A * \frac{\beta}{2\pi}$$

$$v = -A * \frac{\beta}{2\pi} \cos \left(2\pi * \frac{\theta}{\beta} \right) + A * \frac{\beta}{2\pi} \quad (4)$$

La amplitud se determina con la posición de subida máxima del seguidor “h” en $s = h$, con $\theta = \beta$. Teniendo:

$$A = 2\pi \frac{h}{\beta^2} \quad (5)$$

Integrando nuevamente se obtiene la posición y al derivar la aceleración se obtiene la sobre aceleración. Por lo que las ecuaciones de movimiento cicloidal, velocidad, aceleración y jerk son:

$$s = h \left[\frac{\theta}{\beta} - \frac{1}{2\pi} * \text{sen} \left(2\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \right] [\text{Longitud}] \quad (6)$$

$$v = \frac{h}{\beta} \left[1 - \cos \left(2\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \right] \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}} \right] \quad (7)$$

$$a = 2\pi \frac{h}{\beta^2} * \text{sen} \left(2\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}^2} \right] \quad (8)$$

$$j = 4\pi^4 * \frac{h}{\beta^3} * \cos \left(2\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}^3} \right] \quad (9)$$

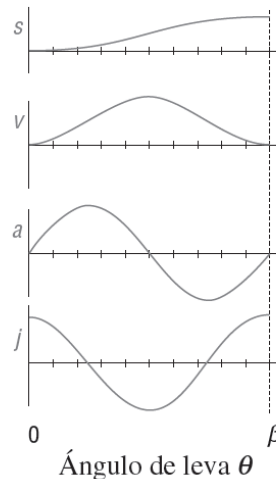


Fig. 2.1 Grafica de las curvas posición cicloidal, velocidad, aceleración y jerk.

Esta curva presenta en sus funciones de velocidad y aceleración continuidad en todo el intervalo y tienen un valor de cero en las fronteras con detenciones. Además, la función de sobre aceleración es finita en las fronteras, haciendo a esta curva aceptable cuando se necesita detenciones.

2.1.3 Curva senomodificado

Esta curva se construye al combinar dos funciones sinusoidales con diferente frecuencia. A partir de la curva cicloidal se obtiene la primera curva, se divide en un cuarto al principio y se realiza el ensamble con la segunda curva senoidal.

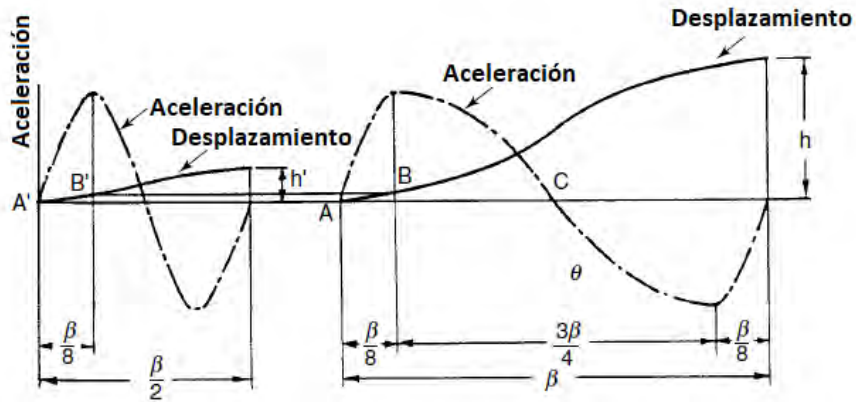


Fig. 2.2 Gráfica de construcción de curva seno modificado [8].

Las ecuaciones del movimiento, velocidad, aceleración y jerk del seno modificado son las siguientes:

Para el segmento $0 \leq \theta \leq \beta/8$

$$s = h \left[0.43990085 \frac{\theta}{\beta} - 0.0350062 \operatorname{sen} \left(4\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \right] [\text{Longitud}] \quad (10)$$

$$v = 0.43990085 \frac{h}{\beta} \left[1 - \cos \left(4\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \right] \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}} \right] \quad (11)$$

$$a = 5.5279571 \frac{h}{\beta^2} \operatorname{sen} \left(4\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}^2} \right] \quad (12)$$

$$j = 69.4663577 \frac{h}{\beta^3} \cos \left(4\pi \frac{\theta}{\beta} \right) \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}^3} \right] \quad (13)$$

Para el segmento $\beta/8 \leq \theta \leq 7\beta/8$

$$s = h \left[0.28004957 + 0.43990085 \frac{\theta}{\beta} - 0.031505577 \cos \left(\frac{4\pi}{3} \frac{\theta}{\beta} - \frac{\pi}{6} \right) \right] [\text{Longitud}] \quad (14)$$

$$v = 0.43990085 \frac{h}{\beta} \left[1 + 3 \operatorname{sen} \left(\frac{4\pi}{3} \frac{\theta}{\beta} - \frac{\pi}{6} \right) \right] \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}} \right] \quad (15)$$

$$a = 5.5279571 \frac{h}{\beta^2} \cos \left(\frac{4\pi}{3} \frac{\theta}{\beta} - \frac{\pi}{6} \right) \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}^2} \right] \quad (16)$$

$$j = -23.1553 \frac{h}{\beta^3} \operatorname{sen} \left(\frac{4\pi}{3} \frac{\theta}{\beta} - \frac{\pi}{6} \right) \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}^3} \right] \quad (17)$$

Para el segmento $7\beta/8 \leq \theta \leq \beta$

$$s = h \left[0.56009915 + 0.43990085 \frac{\theta}{\beta} - 0.0350062 \operatorname{sen} \left[2\pi \left(2 \frac{\theta}{\beta} - 1 \right) \right] \right] [\text{Longitud}] \quad (18)$$

$$v = 0.43990085 \frac{h}{\beta} \left[1 - \cos \left[2\pi \left(2 \frac{\theta}{\beta} - 1 \right) \right] \right] \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}} \right] \quad (19)$$

$$a = 5.5279571 \frac{h}{\beta^2} \operatorname{sen} \left[2\pi \left(2 \frac{\theta}{\beta} - 1 \right) \right] \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}^2} \right] \quad (20)$$

$$j = 69.4663577 \frac{h}{\beta^3} \cos \left[2\pi \left(2 \frac{\theta}{\beta} - 1 \right) \right] \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}^3} \right] \quad (21)$$

2.1.4 Curva polinomio 4-5-6-7

Las curvas polinomiales son muy versátiles en el diseño de levas, ya que se puede adaptar a cualquier tipo de leva. Su construcción se realiza a partir de un polinomio de 7mo grado cuyos coeficientes son determinados por las condiciones de frontera del diagrama de desplazamiento.

Las ecuaciones de desplazamiento, velocidad, aceleración y jerk del polinomio 4-5-6-7 son:

$$s = h \left[35 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 - 84 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 + 70 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^6 - 20 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^7 \right] [\text{Longitud}] \quad (22)$$

$$v = h \left[140 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 420 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 420 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 - 140 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^6 \right] \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}} \right] \quad (23)$$

$$a = h \left[420 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 - 1680 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 + 2100 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 - 840 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 \right] \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}^2} \right] \quad (24)$$

$$j = h \left[840 \frac{\theta}{\beta} - 5040 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 + 8400 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 4200 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 \right] \left[\frac{\text{Longitud}}{\text{rad}^3} \right] \quad (25)$$

2.1.5 Curva Berzak D

La curva Berzak D es un polinomio de grado 7, que incluye consideraciones adicionales en las condiciones de frontera, esta curva presenta picos bajos de velocidad y aceleración por lo que tiene buenas propiedades dinámicas [8].

Las ecuaciones de la curva Berzak D son:

$$s = h \left[12.1 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 25.5 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 24.9 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 - 14.7 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^6 + 4.2 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^7 \right] [Longitud] \quad (26)$$

$$v = h \left[36.3 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 - 102 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 + 124.5 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 - 88.2 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 + 29.4 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^6 \right] \left[\frac{Longitud}{rad} \right] \quad (27)$$

$$a = h \left[72.6 \frac{\theta}{\beta} - 306 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 + 498 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 441 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 + 176.4 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^5 \right] \left[\frac{Longitud}{rad^2} \right] \quad (28)$$

$$j = h \left[72.6 - 612 \frac{\theta}{\beta} + 1494 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^2 - 1764 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^3 - 882 \left(\frac{\theta}{\beta} \right)^4 \right] \left[\frac{Longitud}{rad^3} \right] \quad (29)$$

2.2 Determinación del tamaño de leva cilíndrica ranurada con seguidor de traslación.

Hasta el momento se habían tocado los temas de manera general, los diagramas S-V-A-J son aplicables a cualquier tipo de leva, sin embargo, a partir de este subcapítulo se abordará el diseño de levas cilíndricas ranuradas con seguidor de traslación.

Una vez seleccionada la curva de desplazamiento que cumple con los requerimientos particulares de la leva, y habiendo trazado el diagrama S-V-A-J, es necesario determinar el tamaño de la leva. Para determinar el tamaño de la leva se necesita calcular tres parámetros: el ángulo de presión, el factor de curva y el radio de curvatura.

2.2.1 Ángulo de presión

El ángulo de presión es uno de los criterios más importante en el diseño de levas de cualquier tipo, uno de los parámetros más importantes que nos entrega el ángulo de presión son las cargas distribuidas en el seguidor, por lo que se debe tener especial cuidado en el valor máximo de ángulo de presión ya que con dicho valor se determina el tamaño de la leva, el par torsionante, cargas y vida útil de la leva [8].

En las levas cilíndricas con seguidor de traslación el ángulo de presión es directamente proporcional a la tangente de la función de elevación y se calcula puntualmente en cada posición de giro θ de la leva.

En la figura 2.3 se muestra una leva cilíndrica ranurada con seguidor de traslación y el comportamiento de su ángulo de presión. El radio del cilindro de la leva se llama radio primitivo R_p , el cual es medido desde el eje de giro de la leva.

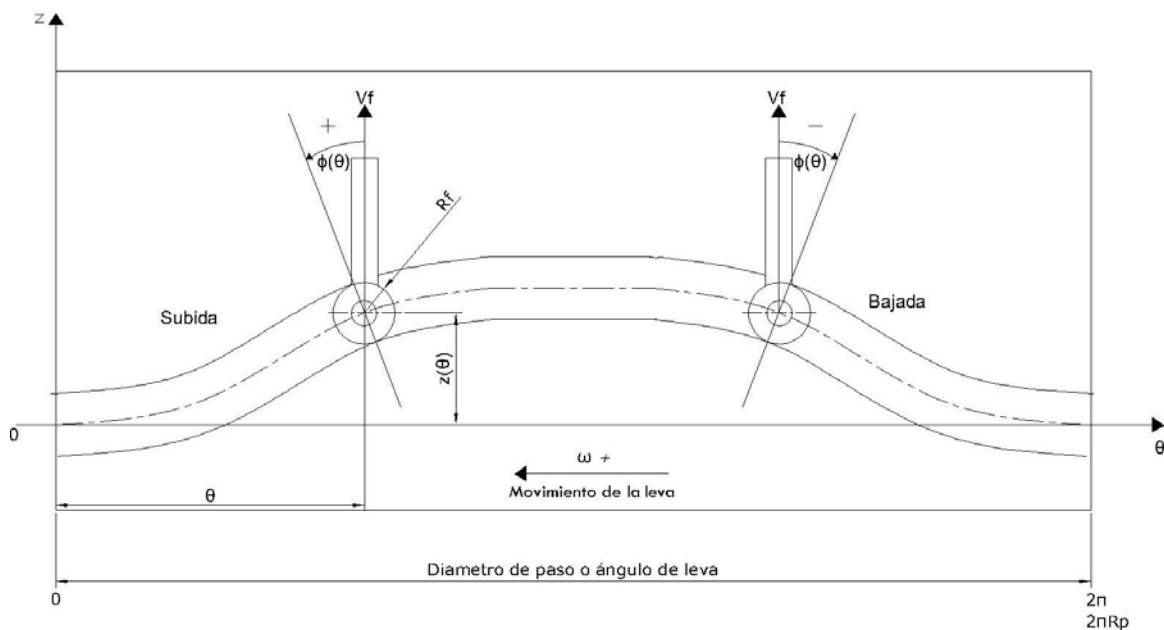


Fig. 2.3 Esquema del ángulo de presión en leva cilíndrica con seguidor de traslación.

El ángulo de presión se define como el ángulo formado entre la recta normal a la curva de desplazamiento y la dirección de movimiento del seguidor. Se observa en la figura anterior como el ángulo de presión cambia de signo en la bajada por la dirección de movimiento de la leva.

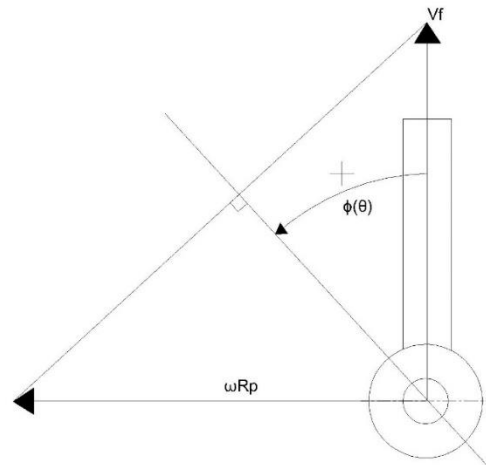


Fig. 2.4 Deducción del ángulo de presión en leva cilíndrica con seguidor de traslación.

Para determinar la normal a la curva es necesario tener la tangencia de la curva de desplazamiento en cada punto, dado que, en este paso ya se debe contar con los diagramas S-V-A-J, ya se tienen calculadas las tangencias a la curva de desplazamiento con la velocidad del seguidor. Al formarse un triángulo rectángulo entre la velocidad lineal del seguidor y la velocidad lineal de la leva, se puede obtener el ángulo de presión:

$$\tan(\phi) = \frac{Vf}{\omega R_p}$$

Al despejar Phi, la expresión para calcular el ángulo de presión de una leva cilíndrica con seguidor de traslación [9] es la siguiente:

$$\phi(\theta) = \tan^{-1} \left[\frac{V(\theta)}{\omega R_p} \right] \quad (30)$$

Donde $V(\theta)$ es la velocidad del seguidor en unidades [longitud/seg], ω es la velocidad angular de la leva en [rad/seg], y R_p es el radio primitivo en unidades de [longitud].

Norton [9], recomienda que no se desfase el seguidor, ya que el centro del seguidor está posicionado en el eje de la leva; tener el seguidor desplazado implicaría complicaciones en la manufactura de la leva.

El ángulo de presión se debe minimizar tanto como sea posible. En [8], se propone 30° como valor límite arbitrario para cualquier tipo de seguidor. Esto ayuda a disminuir el desgaste de la superficie de la leva y tiene un mejor comportamiento dinámico.

Se pueden prevenir altos valores del ángulo de presión si se toma el radio interno de la leva cilíndrica, es decir, del centro de giro de la leva a la cara interior del rodillo del seguidor, para que de esta manera todos los puntos dentro de la superficie de contacto del rodillo con la leva tengan un valor por debajo del máximo permitido.

2.2.2 Determinación del tamaño de la leva con factor

Para poder definir el tamaño de una leva cilíndrica, el diseñador lo puede proponer con base en la aplicación que se le provea, ya que en los problemas de diseño surgen parámetros dimensionales que no pueden ser variados. Sin embargo, se puede obtener un valor para el radio primitivo R_p por medio de un factor f que contiene la información de la curva y el valor máximo del ángulo de presión. Una manera práctica de calcular el radio primitivo R_p es por medio de la siguiente expresión [15]:

$$R_p = \frac{fh}{\beta} \quad (31)$$

Donde f es un factor geométrico que depende de cada tipo de curva de desplazamiento, h elevación máxima del seguidor y β es el intervalo de elevación o de bajada.

El valor máximo del ángulo de presión se encuentra en el punto de inflexión de la curva de desplazamiento, como las curvas de desplazamiento son simétricas (excepto la curva doble armónica) el punto de inflexión se encuentra en $\beta/2$, donde también se encuentra el valor máximo de velocidad. Con base en lo anterior se obtiene el factor geométrico al sustituir R_p de la ecuación 30 en la ecuación 31, por lo tanto, se tiene que:

$$f = \frac{\beta V_{f\text{máx}}}{\omega h \tan(\phi_{\text{máx}})} \quad (32)$$

2.2.3 Radio de curvatura

El radio de curvatura es otro parámetro importante en el diseño de levas. El cálculo del radio de curvatura garantiza que el seguidor no se va a atascar, no va a haber saltos de seguidor provocado por la función de desplazamiento y se evita que el seguidor pierda el contacto con la leva en alguna posición. El radio de curva es el radio de una circunferencia tangente a la curva de desplazamiento. Al igual que en el cálculo del ángulo de presión el radio de curvatura debe calcularse de manera puntual por lo que se puede generar una función matemática del radio de curvatura.

Para el cálculo del radio de curvatura de una leva cilíndrica con seguidor de rodillo de traslación, se utiliza el radio de curvatura de la función de desplazamiento s , ya que al envolver el diagrama en el cilindro de la leva no hay distorsión en la curva.

La expresión para calcular el radio de curvatura es [9]:

$$\rho = \frac{-\left\{1 + \left[\frac{V(\theta)}{\omega R_p}\right]^2\right\}^{\frac{3}{2}}}{\frac{A(\theta)}{\omega^2 R_p^2}} \quad (33)$$

Donde $V(\theta)$ es la velocidad del seguidor en unidades [longitud/seg], ω es la velocidad angular de la leva en [rad/seg], R_p es el radio primitivo en unidades de [longitud] y $A(\theta)$ es la aceleración del seguidor en [longitud/seg²].

Cuando en el diagrama “s” se tiene una detención, el radio de curvatura tiende al infinito debido a que la aceleración es cero, normalmente la gráfica del radio de curvatura está definida por parábolas separadas por una asíntota vertical infinita.

Norton [9], propone que el valor absoluto del radio mínimo de curvatura sea de al menos 1.5 a 3 veces mayor que el radio del seguidor. En caso de no cumplir se debe cambiar el tamaño del seguidor, se pueden realizar varias iteraciones para lograr tener el valor del radio del seguidor aceptable de acuerdo con el ángulo de presión y el radio de curvatura calculados.

2.3 Determinación del perfil de una leva cilíndrica con seguidor de traslación

Con base en el ángulo de presión y el radio de curvatura es posible determinar el perfil de la leva, el cual, se puede obtener de manera gráfica o analítica. Para las levas cilíndricas, solo se necesita envolver el diagrama de desplazamiento alrededor del cilindro de radio (R_p) determinado, dado que no presenta distorsión en el diagrama de desplazamiento. Es preferible utilizar las coordenadas cilíndricas para determinar el perfil de leva, debido a que la coordenada z toma los valores de la función de desplazamiento. También gracias al uso de coordenadas cilíndricas se facilita su manufactura y el desarrollo matemático [16].

El sistema de coordenadas cilíndricas se define por:

$$R(\theta) = R_p \quad (34)$$

$$\lambda(\theta) = \theta \quad (35)$$

$$z(\theta) = s(\theta) \quad (36)$$

Para determinar las ecuaciones de las coordenadas de la superficie de la leva, se vuelve analizar la Fig. 2.4, y dado que el ángulo de presión se define a partir de la normal a la curva de desplazamiento y con ello se garantizan los dos puntos de contacto de la superficie con el radio primitivo calculado previamente se tiene que:

$$z_{1,2}(\theta) = z(\theta) \pm \operatorname{sgn}(\omega) R_f \cos[\phi(\theta, R_p)] \quad (37)$$

$$\delta_{1,2}(\theta) = \lambda(\theta) \mp \operatorname{sgn}(\omega) \frac{R_f}{R_p} \operatorname{sen}[\phi(\theta, R_p)] \quad (38)$$

Donde la función signo $\operatorname{sgn}(\omega)$ se utiliza para generar de manera correcta las subidas y bajadas, utilizando el signo del ángulo de presión, independientemente del sentido de rotación de la leva.

Capítulo 3

3 DISEÑO DE LA LEVA CILÍNDRICA DESMODRÓMICA.

3.1 Diseño de la leva cilíndrica

Al tener definido los elementos o sistemas que conforman el banco de pruebas se realizó primero el diseño de la leva cilíndrica ranurada con seguidor de traslación.

3.1.1 Selección de curva de desplazamiento

Para la selección de la curva de desplazamiento que mejor se adaptaba a las necesidades de las levas se graficaron los diagramas S-V-A-J de cada una de las funciones en el programa de álgebra computacional Mathematica.

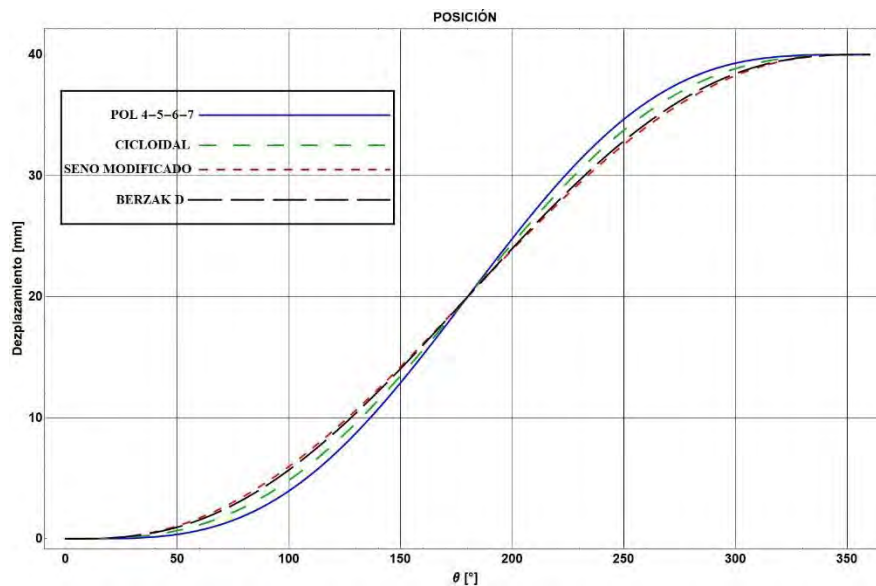


Fig. 3.1 Gráfica comparativa curvas de desplazamiento.

Las gráficas de las curvas de desplazamiento son muy similares como se observa en la figura anterior, sin embargo, tienen un mejor comportamiento las curvas de Berzak D y la Seno Modificado.

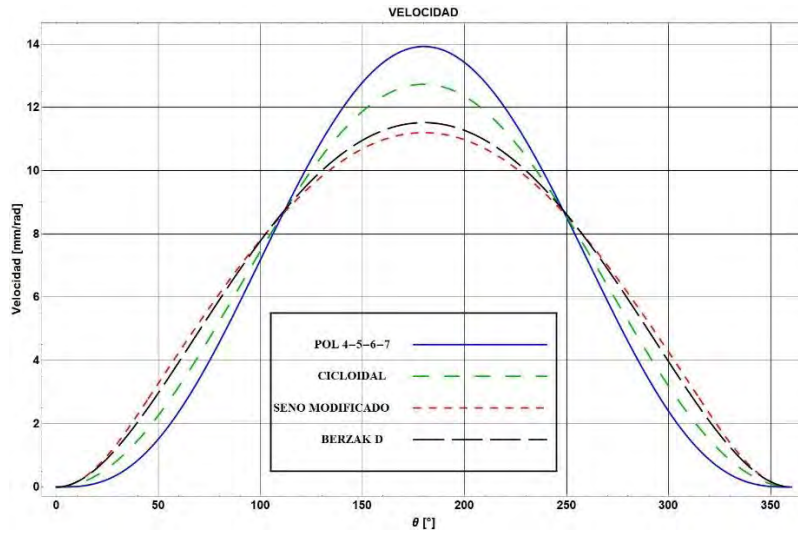


Fig. 3.2 Gráfica comparativa curvas de velocidad.

En la gráfica de velocidad se observa que la curva polinomio 4-5-6-7 presenta el mayor pico de velocidad, el sistema leva seguidor desmodrómico no funcionará a altas velocidades por lo que Berzak D y Seno modificado son mejores opciones.

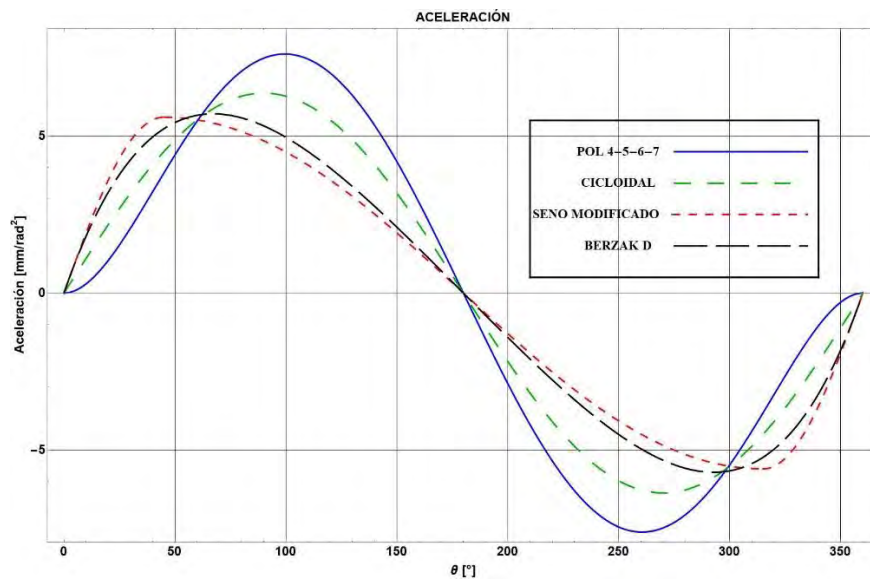


Fig. 3.3 Gráfica comparativa de curvas de aceleración.

La gráfica de aceleración muestra que por tener un pico de velocidad elevado el polinomio 4-5-6-7 presenta de igual manera el mayor pico de aceleración.

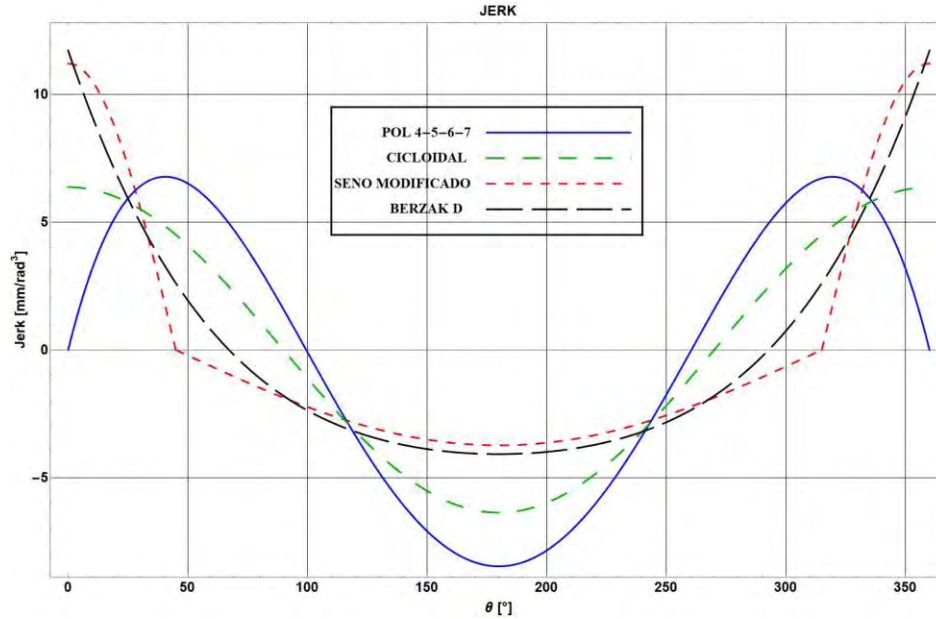


Fig. 3.4 Gráfica comparativa de curvas de sobre aceleración o jerk.

En la gráfica de las curvas jerk se observa que tiene un mejor comportamiento el polinomio 4-5-6-7, sin embargo, la curva cicloidal, seno modificado y Berzak D presentan un jerk más suave y finito en las fronteras lo cual, las hace aceptables.

Con base en el análisis anterior la curva Berzak D, se eligió por su curva suave de desplazamiento y por su baja velocidad que permite tener mejores propiedades dinámicas.

3.1.2 Definición del radio de la leva

Una vez definida la curva a utilizar se realizó el cálculo del ángulo de presión con la ecuación 30 y se muestra el resultado.

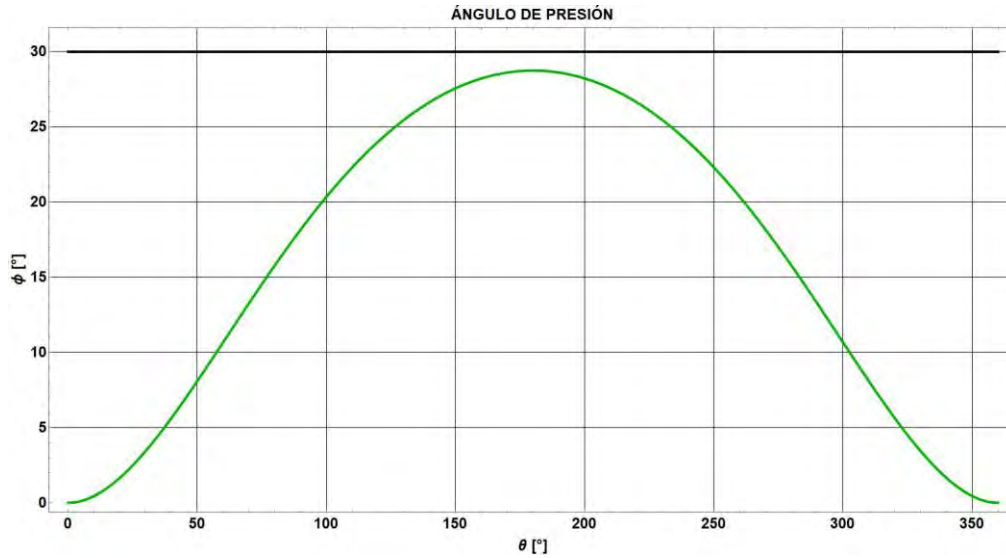


Fig. 3.5 Ángulo de presión de la leva cilíndrica.

En la gráfica del ángulo de presión se trazó un límite de 30° para asegurar que los valores del ángulo de presión estuvieran en un rango aceptable. El radio primitivo que se determinó gracias al ángulo de presión fue de:

$$R_p = 30 \text{ [mm]}$$

Posteriormente se calculó el radio de curvatura con un radio del seguidor de 5.25 [mm] con la ecuación 33, teniendo el siguiente resultado:

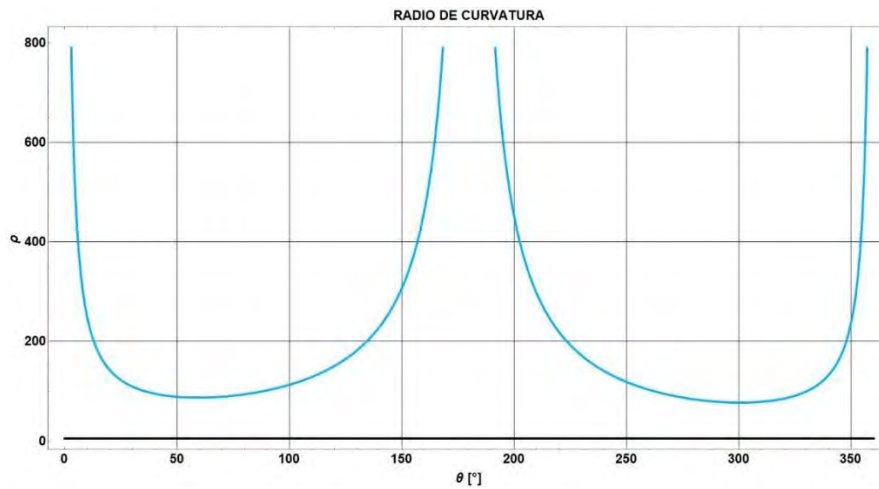


Fig. 3.6 Radio de curvatura para seguidor de radio 5.25 [mm]

Se puede observar que el radio del seguidor es el adecuado ya que, el radio de curvatura es mucho mayor a 3 veces el radio del seguidor.

3.1.3 Comprobación del perfil de la leva

Al obtener el radio de curvatura se generó el perfil de la leva donde se comprobó que no hubiese interferencia con el rodillo del seguidor como se muestra a continuación:

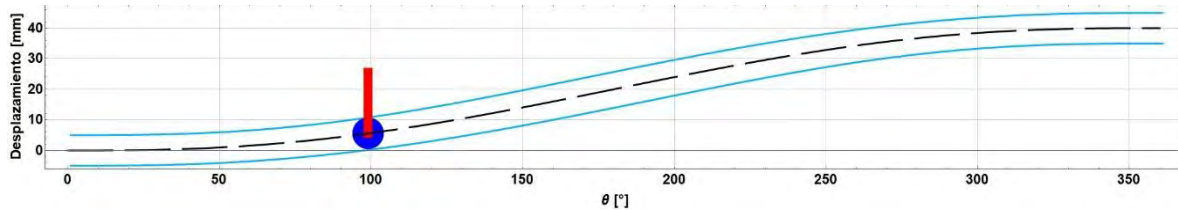


Fig. 3.7 Comprobación del perfil de la leva.

La gráfica anterior muestra la comprobación del perfil de la leva cilíndrica ranurada, la siguiente tabla muestra un resumen de los valores calculados.

Θ [°]	h [mm]	v [mm/s]	a [mm/s ²]	ϕ [°]	ρ
0	0	0.000	0.000	0.000	∞
90	4.417	43.294	210.222	18.166	101.54
180	20.000	72.373	0.000	28.745	∞
270	35.583	43.294	-210.222	18.166	91.54002
360	40.000	0.000	0.000	0.000	∞

TABLA 1 RESUMEN DE VALORES DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LA LEVA.

3.1.4 Leva cilíndrica desmodrómica

Hasta este momento, la leva cilíndrica aún no tiene el atributo desmodrómico. El atributo desmodrómico se produce al aplicar la propuesta del diseño práctico del seguidor para levas ranuradas planas al seguidor de la leva cilíndrica ranurada.

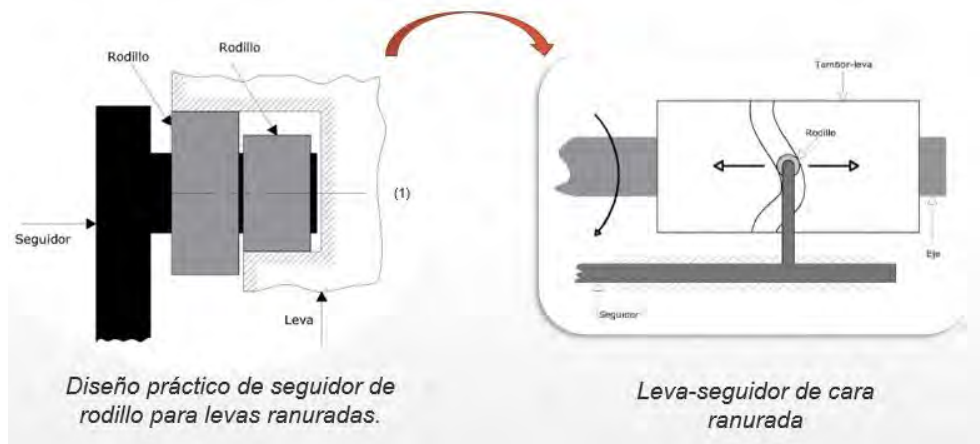


Fig. 3.8 Adaptación del seguidor de doble rodillo a leva cilíndrica.

Se diseñó un seguidor con dos rodillos de mismo diámetro excéntricos para mantener el contacto con la cara de la ranura en todo el recorrido de la leva. Así como cada uno de los componentes del banco de pruebas con excepción de la tornillería.

Capítulo 4

4 DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS Y RESULTADOS.

Para tener la certeza de que el diseño del sistema leva seguidor y compararlo con un sistema tradicional tornillo tuerca es necesario diseñar y construir un banco de pruebas. El banco de pruebas consta de tres módulos principales:

Módulo Sistema Tradicional: este módulo consiste en un tornillo sinfín acoplado a una tuerca especial, este sistema se puede encontrar en los lectores de DVD, lo que constituye un sistema de tornillo tuerca común y corriente.

Módulo de Medición: alojará a un LVDT diseñado especialmente para el banco de pruebas. Un LVDT.

Módulo Sistema Leva-seguidor: alojara la leva cilíndrica y su seguidor de traslación junto con su actuador que serán diseñados para el banco de pruebas.

Al tener definidos los módulos del banco de pruebas se lograron generar distintos conceptos para cada módulo.

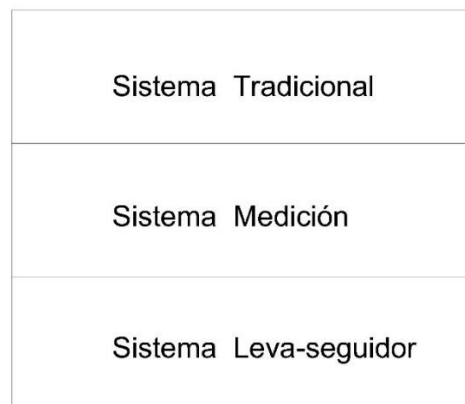


Fig. 4.1 Croquis de los módulos del banco de pruebas. Vista superior.

4.1 Diseño del banco de pruebas

Después de evaluar los conceptos generados con la definición de los módulos, se realizó el diseño de configuración y finalmente el diseño en detalle del banco de pruebas.

El banco de pruebas se esbozó con la ayuda de un software modelador de sólidos, se utilizaron herramientas para toma de decisiones para definir materiales, elementos comerciales y tipo de manufactura para las distintas piezas que integran cada módulo del banco de pruebas.

4.1.1 Módulo Sistema Tradicional

El módulo del sistema tradicional consta de un tornillo sin fin, una tuerca, 2 barras de aluminio redondas de 8 mm de diámetro que sirven como guías y un motor a pasos recuperados de un lector de DVD. Se diseñaron los soportes de las barras de aluminio y un soporte para la tuerca, estas piezas fueron diseñadas con la ayuda de herramientas del diseño para ensamble, por lo cual, las piezas se ensamblan a presión y con ensamble “snap fit”.

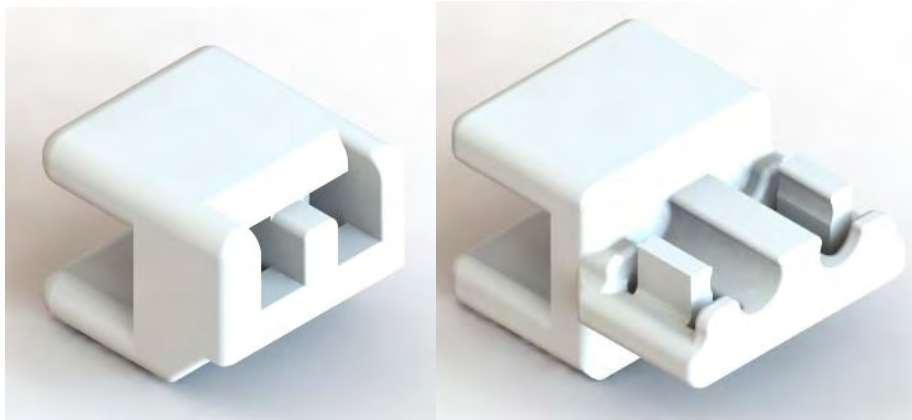


Fig. 4.2 Soportes de las guías.

En la figura 4.2, se muestran vistas isométricas de los dos soportes de las guías. Un soporte tiene dos agujeros cuadrados en los que se colocan las guías de aluminio. En el otro soporte las guías se sujetan mediante un ensamble “snap fit”. Ambos soportes se ensamblan a la placa base del banco de pruebas mediante un ensamble por ajuste a presión.

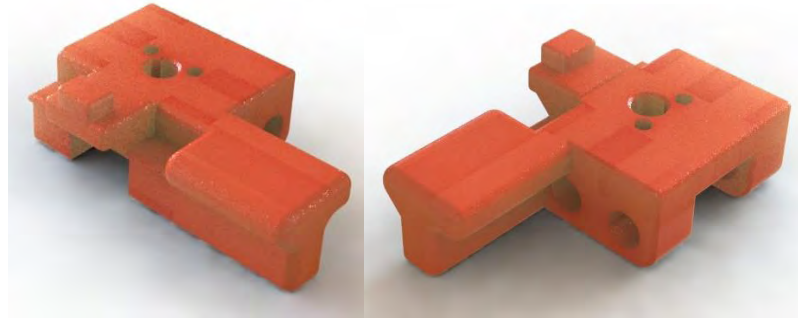


Fig. 4.3 Soporte de la tuerca.

La figura 4.3 muestra la vista isométrica del soporte de la tuerca. Esta pieza se diseñó para poder alojar a la tuerca y se ajustó a la geometría de la tuerca. Cuenta con dos agujeros por los que se introducen las guías.



Fig. 4.4 Tornillo sin fin y actuador.

4.1.2 Módulo Sistema de Medición

El sistema de medición consta de un LVDT especialmente diseñado para el banco de pruebas, los soportes de la carcasa del LVDT y un vástago que se ensambla al núcleo del LVDT.

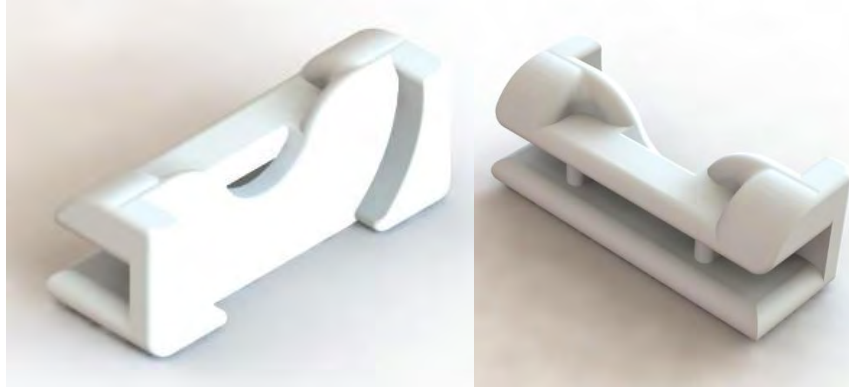


Fig. 4.5 Soporte de carcasa del LVDT.

El soporte de la carcasa del LVDT se muestra en la figura 4.5, tiene un ensamble a presión con la base y se coloca la carcasa de igual manera a presión.

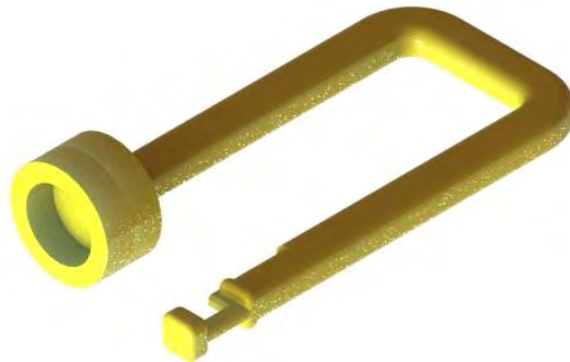


Fig. 4.6 Vástago del LVDT.

El vástago (Fig. 4.6) se puede ajustar al soporte de la tuerca y también al soporte del seguidor, teniendo así la posibilidad de poder medir los desplazamientos de ambos sistemas con el mismo LVDT, lo cual redujo el tamaño del banco de pruebas.

La especificación del LVDT es la siguiente:

Carrera mínima: 40 [mm]

Diámetro máximo carcasa: 40[mm]

Diámetro de Núcleo: 12 [mm]

4.1.3 Módulo Sistema Leva-Seguidor

El módulo del sistema leva-seguidor desmodrómico está compuesto de la leva cilíndrica desmodrómica, el seguidor junto con sus rodamientos y anillos de sujeción, dos chumaceras con sus rodamientos, un cople flexible y un motor a pasos con su base.



Fig. 4.7 Leva cilíndrica ranurada desmodrómica.

La leva cilíndrica ranurada desmodrómica (Fig. 4.7) se diseñó con base en las medidas obtenidas en el capítulo 3 y con la adaptación del seguidor desmodrómico. El valor obtenido del radio primitivo se utilizó para el rodillo más adentro de la ranura para garantizar así un ángulo de presión aceptable para ambos rodillos del seguidor.

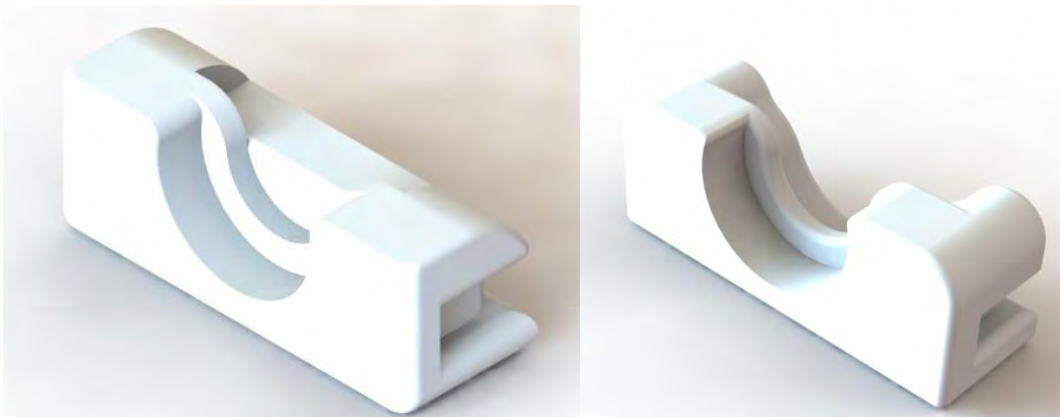


Fig. 4.8 Chumaceras de la leva.

Las chumaceras de la leva (Fig.4.8) se diseñaron en dos tipos: una chumacera del lado motriz que cuenta con una abertura por la cual pasa el eje de la leva y se adapta al cople flexible; la otra chumacera solo cuenta con el espacio para introducir el rodamiento, ambas se ensamblan a presión a la placa base. Los rodamientos seleccionados son comerciales de 8 [mm] de diámetro interior.

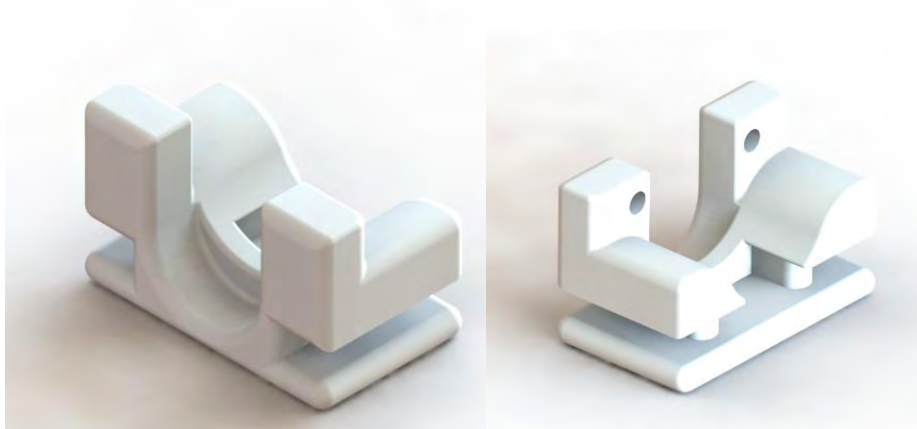


Fig. 4.9 Soporte del motor.

Se diseñó un soporte para el motor a pasos bipolar 28byj-48 (Fig. 4.9), el motor se encaja en el soporte y se asegura con un par de tornillos. El ensamble del soporte al igual que el resto de los soportes se ensambla a presión en la placa base.



Fig. 4.10 Soporte del seguidor.

El soporte del seguidor (Fig. 4.10) está diseñado para sujetar al seguidor y se asegura por medio de una pequeña cuña. El soporte del seguidor además de alojar al seguidor cuenta con una muesca en la cual se puede adaptar el brazo-pivote del LVDT y de esta manera poder medir los desplazamientos del sistema.



Fig. 4.11 Explosión del ensamble del seguidor excéntrico.

En la Fig. 4.11 se muestra el ensamble del seguidor excéntrico junto con 2 rodamientos que sirven como rodillos de 3 [mm] de diámetro interior y dos anillos de sujeción tipo E.

Los soportes de las guías del seguidor se diseñaron para alojar a los redondos de aluminio que funcionan como guías mediante un ensamble “snap fit”. El diseño es del mismo tipo que en los soportes de las guías de la tuerca. La placa base es de MDF de 6 [mm] cortado con láser.

4.1.4 Manufactura de las piezas

Para la manufactura de las piezas diseñadas se consideraron aspectos económicos, disponibilidad de los materiales y método de manufactura. La manufactura de una leva cilíndrica ranurada se puede realizar mediante uso de una herramienta de maquinado CNC de 4 ejes, utilizando un cortador con el mismo tamaño que la circunferencia que envuelve a los rodillos del seguidor incluyendo la excentricidad [17]. La fabricación de las levas cilíndrica se complica dependiendo de la técnica y el tipo de herramienta. Para la manufactura de la leva se optó por técnicas de prototipado rápido en plástico ABS debido a su geometría compleja. Así mismo el resto de las piezas fueron fabricados en plástico ABS debido a su reducido tamaño. Mediante el uso de

herramientas utilizadas en el diseño para ensamble se logró un ensamble “snap fit” en la mayor parte de las piezas, se redujeron el número de piezas y se ensamblan de manera lineal. Las medidas de la placa base son 185[mm]x196[mm].

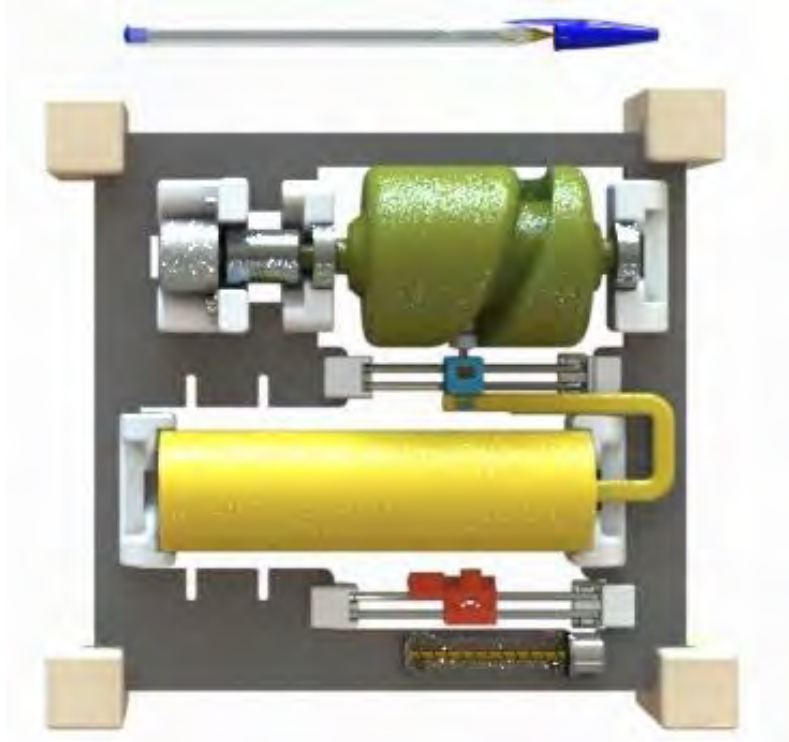


Fig. 4.12 Planta banco de pruebas.

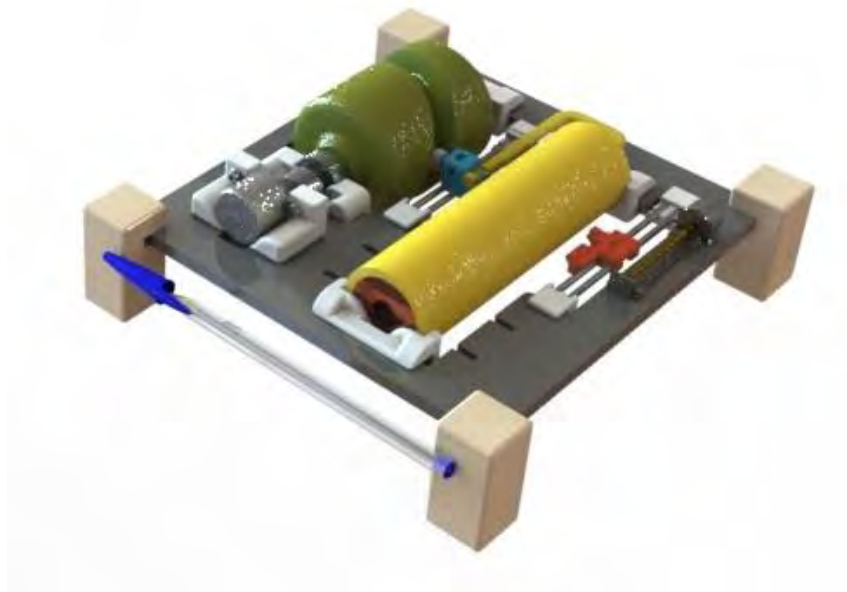


Fig. 4.13 Isometrico banco de pruebas.

4.2 Prueba de movimiento del sistema leva seguidor

En la etapa de construcción del modelo se optó por colocarle unas patas de apoyo de madera, al finalizar la construcción del banco de pruebas se realizaron pruebas de movimiento del sistema leva seguidor. Para ello se utilizó un controlador que ya incluye el motor a pasos y con la herramienta Arduino se puso en marcha el sistema. La carrera de 40 [mm] se logra con una vuelta completa de la leva, el retroceso se logra sin que pierdan el contacto los rodillos del seguidor con la leva, lo cual genera un movimiento suave. La prueba se realizó a una velocidad angular de 2 [rad/s]. Se probó el ensamble del vástago con el soporte del seguidor teniendo un buen ensamble por ajuste a presión.

Se realizó una segunda prueba duplicando la velocidad y con un movimiento recíprocante a los 180° de giro del motor para garantizar que en todo el recorrido no se pierde el contacto entre los rodillos y la cara de la leva.

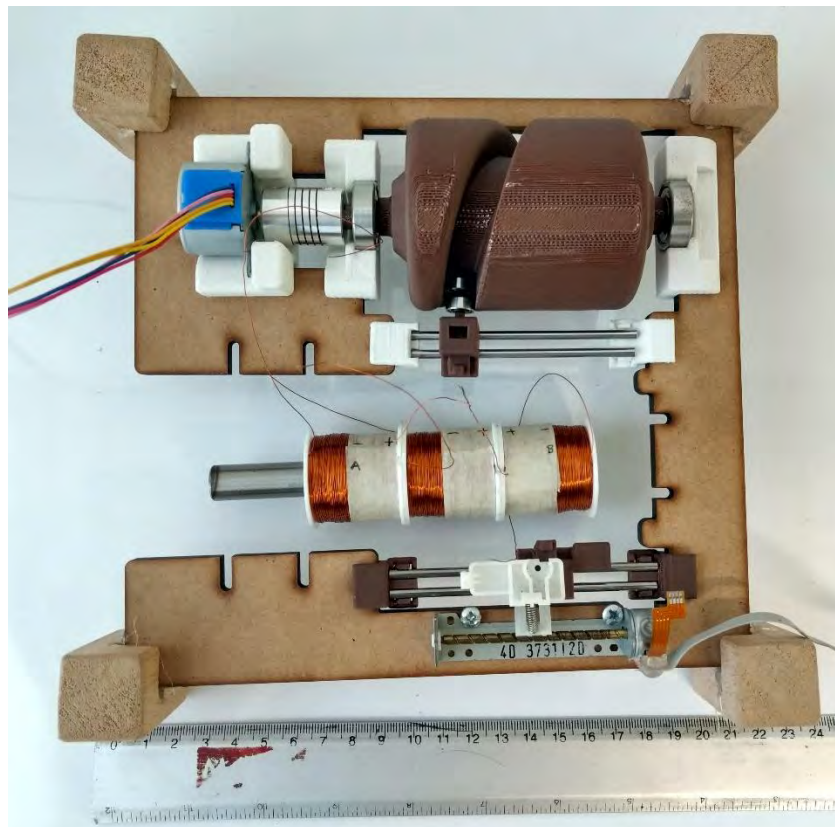


Fig. 4.14 Construcción del banco de pruebas. Vista planta.

5 CONCLUSIONES.

En el presente escrito se logró implementar el cierre geométrico desmodrómico a una leva cilíndrica ranurada generando desplazamientos lineales recíprocos con una carrera de 40 mm. Al tener dos rodillos excéntricos en el seguidor se logró mantener el contacto con ambas caras de la ranura de la leva. Los rodillos lograron girar libremente y con sentido contrario.

Se diseñó y construyó un prototipo funcional que logra cumplir con los movimientos recíprocos y tipos de ensamble. Cabe mencionar que el tipo de ensamble “snap fit” aplicado a la mayoría de las piezas funciona bien y cumple con su función de facilitar el ensamble del banco de pruebas.

Se logró determinar las dimensiones principales requeridas para poder incluir en un trabajo a futuro un transductor lineal, con lo cual, en cuanto se tenga el LVDT será posible ensamblarlo fácilmente mediante “snap fit”. Si fuera necesario crecer el LVDT se podría fácilmente adaptar al banco de pruebas gracias a que se diseñaron módulos independientes conectados únicamente por el vástago.

Para la generación del perfil de la leva con seguidor de doble rodillos excéntricos se debe realizar un ejercicio geométrico para poder determinar correctamente el ancho de la ranura de la leva para garantizar que no se atasquen los rodillos.

Gracias a que el banco de pruebas se diseñó por módulos, es fácil realizar alguna modificación de tamaño para el módulo de medición. Se generaron los planos de detalle y conjunto del banco de prueba para que sirva de referencia para la siguiente etapa del proyecto.

Trabajo Futuro

Será hasta la implementación del LVDT en el banco de pruebas que se construyó, que se podrán realizar las mediciones de los desplazamientos de ambos sistemas, y así poder comprobar si el uso de una leva cilíndrica desmodrómica para generar desplazamientos lineales reduce o elimina el juego mecánico en comparación con el sistema tradicional tornillo tuerca. Por lo que se plantea el siguiente trabajo futuro:

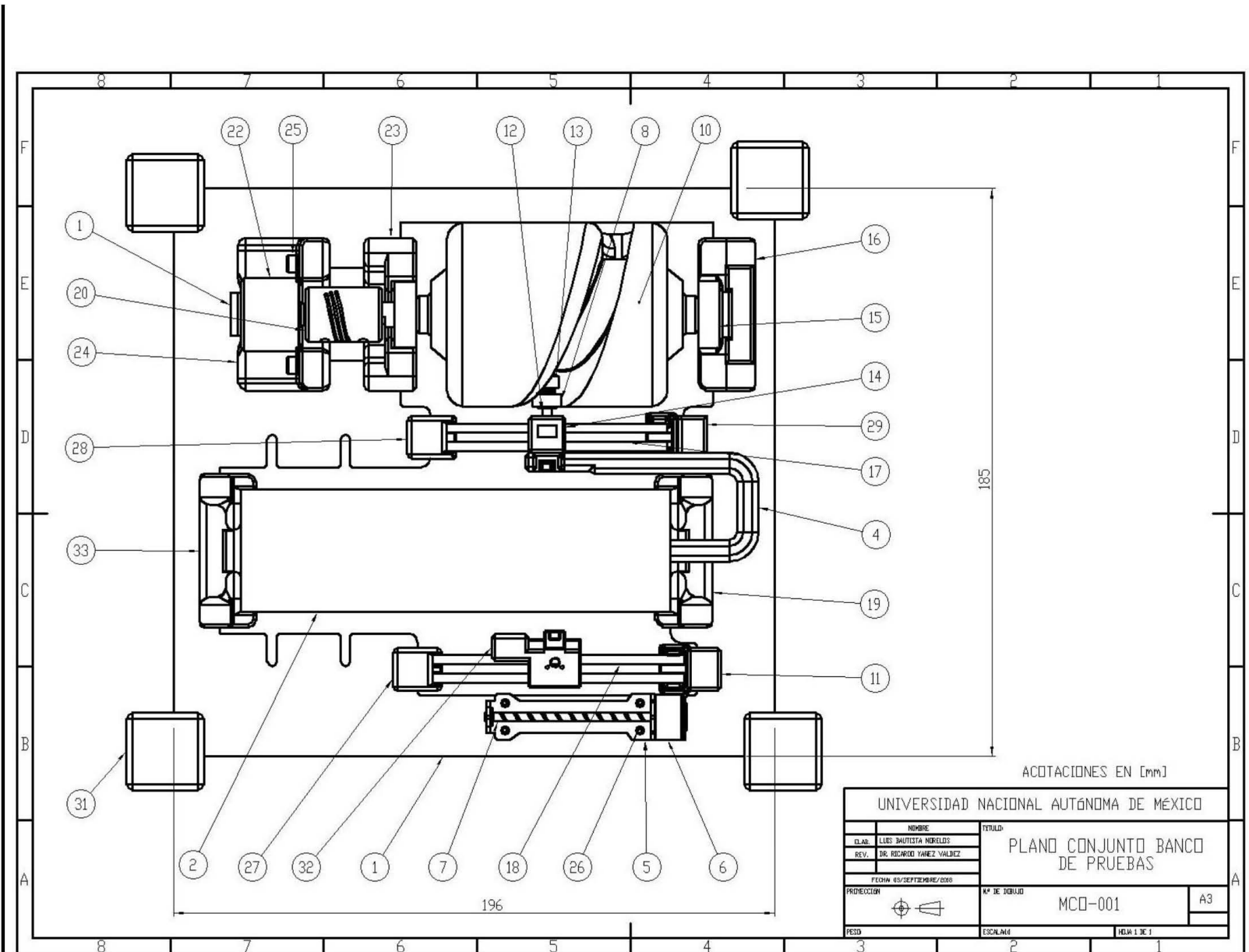
- Realización de pruebas de movimiento de los sistemas.
- Adaptación de los sistemas electrónicos al banco de prueba y, finalmente,
- Realización de mediciones de posición de ambos sistemas.

6 REFERENCIAS

- [1] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, Octava Edición ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2008.
- [2] R. Yañez-Valdez, *Manual de diseño de elementos de máquinas (notas de clase)*, 2018.
- [3] G. Boothroyd, *Product Design for Manufacture and Assembly USA*: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [4] Interempresas.net. (2004, 14/Diciembre/2017). *Accionamientos de ejes piñón cremallera con juego cero*. Available: <http://www.interempresas.net/Medicion/Articulos/8336-Accionamientos-de-ejes-pinon-cremallera-con-juego-cero.html> "Última vez que se revisó esta fuente 14/Dic/2017".
- [5] R. L. Norton, *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*, 4ta ed. México: McGraw-Hill, 2009.
- [6] T. D. Gillespie, *Fundamentals of vehicle dynamics.*: Society of Automotive Engineers., 1994.
- [7] J. Chen and Y. Xin, "Practical Method of Conical Cam Outline Expansion," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 24, pp. 127-132, 2011.
- [8] H. A. Rothbart, *Cam Design Handbook*: McGraw-Hill, 2004.
- [9] R. L. Norton, *Cam Design and Manufacturing Handbook*. New York: Industrial Press, 2009.
- [10] M. P. Koster, *Vibrations of cam mechanisms*. London: MacMillan Press Ltd., 1974.
- [11] E. E. Zayas Figueras, *Aportación al estudio de levas desmodrómicas*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2001.
- [12] R. Yañez-Valdez, R. Alva-Gallegos, A. Caballero-Ruiz, and L. Ruiz-Huerta, "Selection of soft Magnetic core Materials used on an LVDR Prototype. ," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 10, pp. 195-205, 2012.
- [13] J. L. Martínez, *Diseño de un transductor de posición lineal para su aplicación en la caracterización de micromáquinas herramienta*. : Universidad Autónoma Metropolitana, 2013.
- [14] H. L. Trietley, *Instrument transducers an introduction to their performance and design*, 2nd ed. ed., 1975.
- [15] H. A. Rothbart, *Cams, Design, Dynamics and Accuracy*. New York: J. Wiley, 1956.
- [16] D. M. Tsay and B. J. Lin, "Profile determination of planar and spatial cams with cylindrical roller-followers.," *Journal or Mechanical Engineering Science*, vol. 210, pp. 565-575, 1996.
- [17] Y. L. JP. Hung, "Wide rollerguide machining by four-axis machine tools for cylindrical cams," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, pp. 923-932, 2012.

7 ANEXO

Plano de conjunto del banco de pruebas.



Lista de materiales.

MCA PZA.	CANT.	DESCRIPCION	MATERIAL
1	1	PLACA BASE	PLASTICO ABS
2	1	CARCASA LVDT	POR DEFINIR
3	3	EMBOBINADOS LVDT	POR DEFINIR
4	1	VASTAGO LVDT	PLASTICO ABS
5	1	PLACA DEL TORNILLO SIN FIN	ALUMINIO
6	1	MOTOR A PASOS TORNILLO SIN FIN	VARIOS
7	1	TORNILLO SIN FIN P. 4.5	LATON
8	2	RODAMIENTO 3x9.5x4.5mm	ALUMINIO
9	1	NUCLEO LVDT	POR DEFINIR
10	1	LEVA CILINDRICA	PLASTICO ABS
11	1	SOPORTE DE GUIA DE TUERCA TIPO 1	PLASTICO ABS
12	1	SEGUIDOR	PLASTICO ABS
13	2	ANILLO DE RETENCIÓN TIPO E DIAM. 3 mm	ACERO
14	1	SOPORTE DEL SEGUIDOR	PLASTICO ABS
15	2	RODAMIENTO 608zz 8x22x7mm	ALUMINIO
16	1	CHUMACERA LEVA	PLASTICO ABS
17	2	REDONDO DIAM. 8mm x 75 mm L.	ALUMINIO
18	2	REDONDO DIAM. 8mm x 85 mm L.	ALUMINIO
19	1	SOPORTE CARCASA LVDT	PLASTICO ABS
20	1	COPE FLEXIBLE DE 5mm a 8 mm DIAM.	ALUMINIO
21	1	EJE DE MOTOR A PASOS LEVA	PLASTICO ABS
22	1	MOTOR A PASOS BIPOLAR 28byj-48	VARIOS
23	1	CHUMACERA LEVA LADO MOTOR	PLASTICO ABS
24	1	SOPORTE DE MOTOR DE LA LEVA	PLASTICO ABS
25	2	TORNILLO TIPO SOCKET M3x0.5 x 5mm L.	ACERO
26	4	TORNILLO TIPO SOCKET M1.6x0.35 x 2.5mm L.	ACERO
27	1	SOPORTE DE GUIA DE TUERCA TIPO 2	PLASTICO ABS
28	1	SOPORTE DE GUIA DEL SEGUIDOR TIPO 1	PLASTICO ABS
29	1	SOPORTE DE GUIA DEL SEGUIDOR TIPO 2	PLASTICO ABS
30	1	PRISIONERO DEL SEGUIDOR	MDF
31	4	ESQUINERO	MADERA
32	1	SOPORTE DE LA TUERCA	PLASTICO ABS
33	1	SOPORTE CARCASA LVDT T2	PLASTICO ABS