

DISEÑO DE UNA LEVA DE DISCO PARA LA PRUEBA DE RESISTENCIA MECÁNICA DEL APARTADO 21 DE LA NORMA NMX-J-521/2-3-ANCE-2013

DESIGN OF A DISC CAM FOR MECHANICAL STRENGTH TEST OF SECTION 21 OF THE NMX-J-521/2-3-ANCE-2013 STANDARD

Juan Patricio Trejo Mendoza ^a, Alejandro Gálvez Mendoza ^a, y Jonathan Daniel Estrada Barrera ^a

^a Tecnológico Nacional de México/ITSOEH, División de Ingeniería Industrial, Paseo del Agrarismo 2000, Carr. Mixquiahuala - Tula km 2.5, Mixquiahuala de Juárez, C.P. 42700, Hidalgo, México. jtrepo@itsoeh.edu.mx

RESUMEN. Este trabajo describe el diseño y análisis de funcionalidad de una leva de disco para efectuar la prueba de resistencia mecánica de planchas eléctricas referida en el Apartado 21 de la norma NMX-J-521/2-3-ANCE-2013 Aparatos Electrodomésticos y Similares de Seguridad. El objetivo del diseño fue calcular la forma adecuada de la leva garantizando que se efectúen los desplazamientos requeridos en la prueba de resistencia, en donde en un ciclo de 3 segundos se eleve una plancha eléctrica funcionando en condiciones normales de operación y en posición horizontal a una altura de 40 milímetros dejándola caer libremente para impactarse contra una placa de 15 kg de masa y 15 mm de espesor, teniendo en consideración que la placa calefactora de la plancha debe descansar sobre la placa de acero el 15% del tiempo del ciclo. La prueba se efectúa repetitivamente hasta alcanzar los 1000 ciclos. El diseño de la leva se realizó bajo tres metodologías del diseño y análisis cinemático clásico de levas, la primera metodología construcción gráfica: para construir el diagrama de desplazamiento a escala, la segunda metodología: estudio del movimiento combinado del seguidor para construir la curva del movimiento y la tercera metodología diseño del perfil de leva, para definir la forma real del perfil de la leva a partir del diagrama de desplazamiento, esta última modelada y analizada con la función análisis de movimiento del software SolidWorks®. El resultado obtenido fue el diseño de la leva de disco garantizando el cumplimiento del requisito de la prueba descrita en el Apartado 21 de la norma NMX-J-521/2-3-ANCE-2013. La metodología implementada fue un referente para la aprobación de futuros diseños para levas en equipos de pruebas, brindando confiabilidad en su fabricación y funcionalidad.

Palabras clave: Análisis de movimiento, Diseño leva de disco, Pruebas de resistencia mecánica.

ABSTRACT. This work describes the design and functionality analysis of a disk cam to carry out the mechanical resistance test of electric irons referred to in Section 21 of the NMX-J-521 / 2-3-ANCE-2013 Standard for Household Appliances and Similar of Security. The objective of the design was to calculate the adequate shape of the cam, guaranteeing that the required displacements are made in the resistance test, where in a cycle of 3 seconds an electric iron is raised operating under normal operating conditions and in a horizontal position to a height of 40 millimeters, allowing it to fall freely to impact against a plate of mass 15 kg and 15 mm thick, taking into consideration that the heating plate of the plate must rest on the steel plate for 15% of the cycle time. The test is carried out repeatedly until reaching 1000 cycles. The design of the cam was carried out under three methodologies of the design and classical kinematic analysis of cams, the first graphical construction methodology: to construct the scale displacement diagram, the second methodology: study of the combined movement of the follower to construct the movement curve and the third methodology, design of the cam profile, to define the real shape of the cam profile from the displacement diagram, the latter modeled and analyzed with the motion analysis function of the SolidWorks® software. The result obtained was the design of the disc cam ensuring compliance with the test requirement described in Section 21 of the NMX-J-521 / 2-3-ANCE-2013 standard. The methodology implemented was a benchmark for the approval of future designs for cams in test equipment, providing reliability in its manufacture and functionality.

Key words: Functionality analysis, Cam design, CAD-CAE design.

INTRODUCCIÓN

Una leva es un elemento mecánico que transforma el movimiento circular (rotativo) en un movimiento alternativo (rectilíneo). Las levas de disco son parcialmente circulares, se pueden montar sobre un eje rotativo (árbol), y cuando se montan varias levas en el mismo eje a este se le denomina: árbol de levas. Para convertir el movimiento de una leva un seguidor (seguidor de leva) debe seguir la forma del perfil de

la leva (contorno) cuando esta gira. La programación del movimiento de una leva se realiza mediante el diseño del perfil. Los tipos movimientos que una leva puede transmitir son inusuales, irregulares, y difíciles de conseguir con otro tipo de elementos. Las levas son usadas frecuentemente por su bajo costo¹.

Las actuales tendencias de diseño proponen la implementación de nuevas metodologías más

creativas, rápidas y eficientes, en las cuales se busca con mayor prioridad evaluar con rapidez y de manera directa los diseños. Una metodología exitosa maximiza la calidad del diseño, minimiza los costos y reduce el tiempo invertido². Los métodos y técnicas recientes aprovechan totalmente el análisis asistido por computadora el cual permite predecir el funcionamiento y el desempeño garantizando el éxito de cualquier diseño antes de su producción. El diseño en ingeniería se define como el proceso de aplicación de varias técnicas y principios científicos con la finalidad de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con el detalle suficiente que permita su realización³. El análisis de funcionalidad del diseño es un proceso de evaluación que permite avalar que el diseño haga lo que se pretende que debe de hacer⁴.

Históricamente la evolución de las metodologías del diseño se remonta a la edad de bronce con los grabados en piedra en los Alpes Italianos alrededor del año 1500 a.C. en donde se muestra un dibujo técnico del acomodo de animales domesticados jalando un arado. En el año 450 a.C. los griegos inventaron las escuadras y el compás para desarrollar dibujos en perspectiva. Entre los siglos XIV y XVI se desarrolló un enfoque matemático al dibujo, siendo su base el uso de la simetría en los dibujos de perspectiva, los desarrolladores de la técnica fueron: Giotto, Duccio, Brunelleschi y Leonardo Da Vinci. A finales del siglo XVIII Gaspard Monge desarrollo la técnica de la geometría descriptiva base de los diseños tridimensionales utilizados en la actualidad. En 1970 aparece el Diseño Asistido por Computadora (CAD), desde entonces las computadoras han tenido un gran impacto en las metodologías utilizadas para el diseño desarrollándose el modelado digital tridimensional y el análisis de la funcionalidad de los diseños⁵. El concepto del Diseño Asistido por Computadora (CAD), ha venido cambiando conforme se dispone de software más moderno, los antiguos diseños en CAD eran representaciones bidimensionales, mientras los actuales diseños son modelos sólidos tridimensionales de los cuales se generan automáticamente vistas auxiliares, ortogonales, isométricas, proyectadas, de sección, de detalle, de rotula, alámbricas y a escala. También se pueden generar planos con cotas en las vistas, tolerancias,

anotaciones y listas de materiales. Los sistemas CAD actualmente se han convertido en un subconjunto de técnicas de la Ingeniería Asistida por Computadora (CAE), en donde un modelo sólido CAD es sometido a análisis de diseño y funcionalidad, refinamientos, análisis de propiedades como el tamaño, resistencia, volumen, centro de gravedad, también se pueden realizar análisis de mecanismos como pruebas de funcionamiento, propiedades mecánicas, movimientos y comportamientos físicos como el estudio de cargas, así mismo se incluyen análisis estéticos del diseño⁶.

Otra ventaja de los diseños realizados en CAD-CAE, es la de rápidamente generar codificaciones G-CODE con la programación de recorridos de herramientas de remoción de viruta gracias al módulo integrado de Manufactura Asistida por Computadora (CAM) en los software CAM, también se pueden obtener codificaciones G-CODE para la programación de objetos de fabricación en impresoras 3D, la técnica se conoce como Direct Manufacturing On Demand (Fabricación Directa). Muchos paquetes de software CAD-CAE impulsan la Cuarta Revolución Industrial Digital, Iniciada en el año 2011 y ofrecen estas nuevas formas avanzadas de diseño como lo son: CATIA®, INVENTOR® y SOLIDWORKS®⁷.

La norma mexicana NMX-J-521/2-3-ANCE-2013 Aparatos Electrodomésticos y Similares de Seguridad Parte 2-3: Requisitos Particulares para Planchas Eléctricas, vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de mayo de 2014, es referenciada en el capítulo 7 sección dos: Aparatos Electrodomésticos, para dar cumplimiento a las disposiciones aplicables con fines de seguridad en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SCFI-2014 Productos Eléctricos Especificaciones de Seguridad, que tiene como objetivo establecer las características y especificaciones de seguridad que deben cumplir los productos eléctricos que se importen o comercialicen en el territorio de los Estados Unidos Mexicanos⁸.

La norma mexicana NMX-J-521/2-3-ANCE-2013 establece en el Apartado 21:

“La plancha se opera bajo condiciones de funcionamiento normal a la potencia asignada y con excepción de las planchas inalámbricas, la temperatura de la placa calefactora se mantiene en estas condiciones a lo largo de la prueba. La plancha se suspende entonces de su agarradera con la placa calefactora en posición horizontal. Luego se deja caer de una altura de 40 mm a una placa de acero firmemente apoyada con un espesor de por lo menos 15 mm y una masa de por lo menos 15 kg. La prueba se realiza 1 000 veces a una velocidad que no exceda 20 caídas por minuto. La prueba se realiza de forma que la plancha descansa sobre la placa de acero durante aproximadamente el 15 % del tiempo. Después de la prueba, la plancha no debe sufrir daño alguno⁹.

Las levas de disco son los tipos de levas más comunes, se diseñan a partir de una circunferencia modificando la distancia radial del centro a lo largo de la circunferencia.

En este contexto, este trabajo presenta el diseño de una leva de disco para efectuar los diferentes desplazamientos requeridos en la prueba de resistencia mecánica de planchas eléctricas referida en el Apartado 21 de la norma NMX-J-521/2-3-ANCE-2013 Aparatos Electrodomésticos y Similares de Seguridad Parte 2-3: Requisitos Particulares para Planchas Eléctricas, utilizando las tres metodologías clásicas involucradas en el diseño de levas¹⁰:

1. Metodología para la construcción gráfica del diagrama de desplazamiento a escala.
2. Metodología del estudio de movimiento combinado para la construcción de la curva de movimiento. (Análisis cinemático del seguidor).
3. Diseño del perfil de leva con su seguidor de rodillo en línea.

En la metodología tres se incorporaron las funciones actuales de los sistemas de diseños CAD-CAE, para el modelado tridimensional de la leva, el análisis de las propiedades físicas, el análisis de funcionalidad mediante la función de análisis de movimiento del software SolidWorks®.

El objetivo del trabajo fue diseñar la forma adecuada de la leva de disco y realizar el análisis de funcionalidad para garantizar que el seguidor de leva efectúe los desplazamientos requeridos en la prueba de resistencia mecánica para planchas eléctricas descrita en el Apartado 21 de la norma NMX-J-521/2-3-ANCE-2013.

METODOLOGÍA

Metodología 1. Construcción gráfica del diagrama de desplazamiento.

La primera metodología fue utilizada para el desarrollo y construcción gráfica del diagrama de desplazamiento, esta gráfica también es conocida como gráfica de desplazamiento angular, se realiza para visualizar el movimiento y la cinemática del seguidor, en ella, el eje vertical representa el desplazamiento lineal del seguidor en milímetros y el eje horizontal representa el tiempo en segundos o en ángulos.

Paso 1. Cálculo de la rapidez requerida de la leva:

a) Secuencia del movimiento:

1. Elevar a 40 milímetros.
2. Descender en caída libre - 40 milímetros.
3. Detención durante 15% del tiempo del ciclo.
4. Tiempo total del ciclo 20 caídas por minuto.

b) Cálculo del tiempo de un ciclo completo.

El tiempo total del ciclo fue determinado al considerar que la leva debe realizar 20 revoluciones completas en 1 minuto:

$$\frac{20 \text{ rev}}{1 \text{ min}} = 20 \text{ rpm}$$

$$\frac{20 \text{ rev}}{1 \text{ min}} \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = \frac{20 \text{ rev}}{60 \text{ s}}$$

Se deduce que el tiempo para completar un ciclo completo es de:

$$\left(\frac{20 \text{ rev}}{60 \text{ s}} \right) e \left(\frac{1 \text{ rev}}{i?} \right) = 3 \text{ s}$$

Por lo tanto un ciclo completo se debería efectuar en 3 segundos:

$$\frac{1 \text{ rev}}{3 \text{ seg}}$$

c) Cálculo de la velocidad angular de la leva.

Para calcular la rapidez requerida de la leva en función del tiempo necesario para completar un ciclo completo a velocidad constante, fue utilizada la siguiente ecuación matemática de la velocidad angular:

Ec.1

$$\omega_{leva} = \frac{d\theta}{\Delta t} = \frac{1 \text{ rev}}{\sum T_i}$$

Donde:

ω_{leva} = Velocidad angular de la leva.

$\sum T_i$ = Tiempo total del ciclo.

De la Ec.1

$$\omega_{leva} = \frac{1 \text{ rev}}{\sum T_i} = \frac{1 \text{ rev}}{3 \text{ s}} = 0.3333 \text{ rev/s}$$

Paso 2. Cálculo del giro de la leva para cada intervalo.

Para calcular el giro de la leva en cada intervalo primeramente se estimó el tiempo de cada intervalo con base en el tiempo para completar un ciclo completo de 3 segundos.

La rotación de leva durante un intervalo del movimiento del seguidor se calcula con la ecuación:

Ec.2

$$\beta = (\omega_{leva})(T_i)$$

Donde:

β = Intervalo de movimiento en (rev) o en (°)

a) Detención durante 15% del tiempo del ciclo:

La norma mexicana NMX-J-521/2-3-ANCE-2013 establece que la plancha debe descansar sobre la placa de acero durante aproximadamente el 15 % del tiempo. El dato del 15% del tiempo permite empezar a calcular el tiempo para cada intervalo,

dado que el ciclo completo se efectúa en 3 segundos se obtiene:

$$T_{15s} = T_3 = 15\% (3s) = 0.45 \text{ s}$$

De la Ec.2

$$\beta_3 = (\omega_{leva})(T_3) = (0.3333 \text{ rev/s})(0.45 \text{ s}) = 0.15 \text{ rev}$$

La rotación en grados del intervalo β_3 es de:

$$\beta_3 = 0.15 \text{ rev} \left(\frac{360^\circ}{1 \text{ rev}} \right) = 54^\circ$$

Nota: Se asignó β_3 por la posición de acuerdo a la secuencia del movimiento descrita en el Paso 1.

b) Descenso en caída libre - 40 milímetros.

La norma mexicana NMX-J-521/2-3-ANCE-2013 establece que la plancha debe dejar caer de una altura de 40 mm luego de estar suspendida de su agarradera con la placa calefactora en posición horizontal. Para calcular el tiempo de descenso de la plancha eléctrica se utilizó la fórmula de la ley de caída libre de los cuerpos¹¹.

Ec.3

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

Donde:

t = Tiempo de caída

h = altura en metros

g = Aceleración de la gravedad 9.80665 m/s²

De la Ec.3

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2(0.04 \text{ m})}{9.80665 \text{ m/s}^2}} = 0.0903 \text{ s}$$

Entonces:

$$T_2 = 0.0903 \text{ s}$$

De la Ec.2

$$\beta_2 = (\omega_{leva})(T_2) = (0.3333 \text{ rev/s})(0.0903 \text{ s}) = \beta_2 = 0.030 \text{ rev}$$

La rotación en grados del intervalo β_2 es de:

$$\beta_2 = 0.030 \text{ rev} \left(\frac{360^\circ}{1 \text{ rev}} \right) = 10.8^\circ$$

Nota: Se asignó β_2 por la posición de acuerdo a la secuencia del movimiento descrita en el Paso 1.

c) Ascenso a 40 milímetros.

La norma mexicana NMX-J-521/2-3-ANCE-2013 establece que la plancha debe dejar caer de una altura de 40 mm, por lo que es necesario realizar el ascenso hasta el punto establecido en la norma.

Debido a que dos de los tres valores de los intervalos de los giros de la leva y su respectivo tiempo, ya fueron calculados, el tercer intervalo es referente al ascenso a una altura de 40 milímetros es:

Ec.4

$$\sum T_T = T_1 + T_2 + T_3$$

Donde:

T_T = Tiempo total del ciclo

T_1 = Tiempo de ascenso a 40 milímetros

T_2 = Tiempo de descenso en caída libre

T_3 = Tiempo de detención durante 15% del ciclo

De la Ec.4

$$3s = T_1 + 0.0903s + 0.45s$$

Entonces:

$$T_1 = 2.4597s$$

De la Ec.2

$$\beta_1 = (\omega_{leva})(T_1) = (0.3333 \text{ rev/s})(2.4597s) = \beta_1 = 0.82 \text{ rev}$$

La rotación en grados del intervalo β_1 es de:

$$\beta_1 = 0.82 \text{ rev} \left(\frac{360^\circ}{1 \text{ rev}} \right) = 295.2^\circ$$

Nota: Se asignó β_1 por la posición de acuerdo a la secuencia del movimiento descrita en el Paso 1.

d) Detención a 40 milímetros.

Para asegurar que conforme a la norma mexicana NMX-J-521/2-3-ANCE-2013 que la plancha se deja caer de una altura de 40 mm, es necesario considerar una detención cuando el giro de leva ha transferido un desplazamiento lineal de 40 mm.

El ajuste en el cálculo resulta práctico para el diseño de la leva al establecer que el intervalo β_1 asuma un valor entero de 2 s, y el resto del tiempo del intervalo previamente calculado asuma el valor del tiempo de detención a una altura de 40 mm, así se reconsidera que:

Ec.5

$$\sum T_T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$$

Donde:

T_T = Tiempo total del ciclo

T_1 = Tiempo de ascenso a 40 milímetros

T_2 = Tiempo de descenso en caída libre

T_3 = Tiempo de detención durante 15% del ciclo

T_4 = Tiempo de detención a 40 milímetros

De la Ec.5

$$3s = 2s + 0.0903s + 0.45s + T_4$$

Entonces:

$$T_4 = 0.4597s$$

De la Ec.2

$$\beta_4 = (\omega_{leva})(T_4) = (0.3333 \text{ rev/s})(0.4597s) = \beta_4 = 0.15 \text{ rev}$$

La rotación en grados del intervalo β_4 es de:

$$\beta_4 = 0.15 \text{ rev} \left(\frac{360^\circ}{1 \text{ rev}} \right) = 54^\circ$$

e) Reajuste ascenso a 40 milímetros.

Al realizar el reajuste en el intervalo β_1 ahora los nuevos cálculos se expresan de la siguiente manera: Entonces:

$$T_1 = 2.0 \text{ s}$$

De la Ec.2

$$\beta_1 = (\omega_{leva})(T_1) = (0.3333 \text{ rev/s})(2.0 \text{ s}) = \beta_1 = 0.67 \text{ rev}$$

La rotación en grados del intervalo β_1 es de:

$$\beta_1 = 0.67 \text{ rev} \left(\frac{360^\circ}{1 \text{ rev}} \right) = 241.2^\circ$$

Paso 3. Diagrama de desplazamiento

Ya realizados los cálculos de los intervalos de la leva, se procedió a graficar el diagrama de desplazamiento, en donde está representado cada secuencia de movimiento, el grafico se le conoce también como diagrama de desplazamiento del seguidor, se construye graficando los datos del desplazamiento contra el tiempo y/o también graficando el desplazamiento contra el desplazamiento angular β .

El eje vertical indica el movimiento lineal del seguidor (mm), el eje horizontal indica el tiempo (s), o el desplazamiento angular (grados). Véase Figura 1.



Figura 1. Diagrama de desplazamiento base intervalos

El diagrama permitió visualizar el movimiento del seguidor de la leva, aun cuando la forma de la leva no se encontraba definida.

Metodología 2. Estudio del movimiento combinado del seguidor para construir la curva de movimiento.

La segunda metodología fue utilizada para realizar el estudio grafico del movimiento combinado del seguidor de leva, en la metodología anterior el movimiento del seguidor no se identificó plenamente. Un análisis más preciso demanda incorporar las características de los principios dinámicos en los periodos de ascenso y descenso con el fin de minimizar las vibraciones y esfuerzos. Dentro de la enorme variedad de los esquemas de movimiento se eligió un esquema que permitiera el movimiento de la leva con aceleraciones suaves.

Paso 1. Cálculo del desplazamiento del seguidor:

Para calcular el desplazamiento del seguidor se consideró el cálculo cinemático de leva para movimiento con velocidad constante, este tipo de movimiento se caracteriza por desplazamientos en línea recta por tener una velocidad uniforme. Los cálculos de las características dinámicas de los desplazamientos de ascenso y descenso se obtuvieron con las siguientes ecuaciones:

Ec.5 (Desplazamiento de ascenso)

$$\Delta \mathcal{R}_i = \mathcal{H}_0 + \frac{\mathcal{H}_i t_i}{\lambda_i}$$

Ec.6 (Desplazamiento de descenso)

$$\Delta \mathcal{R}_i = \Delta \mathcal{R}_i = \mathcal{H}_j - \mathcal{H}_j \left(1 - \frac{t_f - t_j}{\lambda_j} \right)$$

Donde:

$\Delta \mathcal{R}$ = Desplazamiento instantaneo en el tiempo t

\mathcal{H} = Desplazamiento total ascenso y descenso

λ = Periodo total en tiempo ascenso o descenso

t = Intervalo de tiempo ascenso o descenso

a) Desplazamiento en ascenso 40 mm.

El desplazamiento de ascenso parte de una altura $H_0 = 0$ mm hacia una altura $H_1 = 40$ mm, está definido por el intervalo β_1 , el periodo total en segundos es de $T_1 = 2.0$ s, (datos calculados en la metodología 1.

Construcción grafica del diagrama de desplazamiento en el inciso e) reajuste ascenso a 40 milímetros). A continuación se muestran unos cálculos a manera de explicación del concentrado de los datos obtenidos:

De la Ec.5 (Desplazamiento de ascenso)

Para cuando $t_f = 0$

$$\Delta R_i = \mathcal{H}_o + \frac{\mathcal{H}_i t_i}{r_i} = 0 \text{ mm} + \frac{40 \text{ mm} (0 \text{ s})}{2.0 \text{ s}} = 0 \text{ mm}$$

Para cuando $t_i = 0.5$

$$\Delta R_i = \mathcal{H}_o + \frac{\mathcal{H}_i t_i}{r_i} = 0 \text{ mm} + \frac{40 \text{ mm} (0.5 \text{ s})}{2.0 \text{ s}} = 10 \text{ mm}$$

Para cuando $t_i = 1.5$

$$\Delta R_i = \mathcal{H}_o + \frac{\mathcal{H}_i t_i}{r_i} = 0 \text{ mm} + \frac{40 \text{ mm} (1.50 \text{ s})}{2.0 \text{ s}} = 30 \text{ mm}$$

Para cuando $t_i = 2.0$

$$\Delta R_i = \mathcal{H}_o + \frac{\mathcal{H}_i t_i}{r_i} = 0 \text{ mm} + \frac{40 \text{ mm} (2.0 \text{ s})}{2.0 \text{ s}} = 40 \text{ mm}$$

b) Desplazamiento en descenso -40 mm.

El desplazamiento en descenso desde una altura $H_2 = 40$ mm está definido por el intervalo β_2 , el periodo total en segundos es de $T_2 = 0.0903$ s, (datos calculados en la metodología 1. Construcción grafica del diagrama de desplazamiento en el inciso b) descenso en caída libre -40 milímetros). Se parte de conocer que cuando se concluye la detención a 40 milímetros del intervalo β_4 , el tiempo transcurrido del ciclo es $t_j = 2.4597$ s, y si a este tiempo se le suma el tiempo $T_j = 0.0903$ s tiempo requerido para el descenso definido por el intervalo β_2 , el tiempo transcurrido del ciclo para completar el descenso será de $t_i = 2.55$ s. A continuación se muestran unos cálculos a manera de explicación del concentrado de los datos obtenidos:

De la Ec.6 (Desplazamiento en descenso)

Para cuando $t_j = 2.52$

$$\begin{aligned} \Delta R_i &= \mathcal{H}_j - \mathcal{H}_j \left(1 - \frac{t_f - t_j}{f_j}\right) \\ &= 40 - 40 \left(1 - \frac{2.55 - 2.52}{0.0903}\right) \\ &= 13.29 \text{ mm} \end{aligned}$$

Para cuando $t_j = 2.54$

$$\begin{aligned} \Delta R_i &= \mathcal{H}_j - \mathcal{H}_j \left(1 - \frac{t_f - t_j}{f_j}\right) \\ &= 40 - 40 \left(1 - \frac{2.55 - 2.54}{0.0903}\right) \\ &= 4.43 \text{ mm} \end{aligned}$$

Para cuando $t_j = 2.55$

$$\begin{aligned} \Delta R_i &= \mathcal{H}_j - \mathcal{H}_j \left(1 - \frac{t_f - t_j}{f_j}\right) \\ &= 40 - 40 \left(1 - \frac{2.55 - 2.55}{0.0903}\right) = 0 \text{ mm} \end{aligned}$$

c) Detención 15% del ciclo en 0 mm.

El intervalo β_3 de detención mantiene una altura $H_3 = 0$ mm durante un periodo total de $T_3 = 0.45$ s, datos calculados en la metodología 1. Construcción grafica del diagrama de desplazamiento en el inciso a) Detención durante 15% del tiempo del ciclo. En donde ΔR_i no tiene desplazamiento en el tiempo t_k y se mantiene constante, por lo tanto:

Para cuando el tiempo está entre: $2.55 \leq t_k \leq 3.00$

$$\Delta R_i = 0 \text{ mm}$$

d) Detención a 40 mm.

El intervalo β_4 de detención mantiene una altura $H_4 = 40$ mm durante un periodo total de $T_4 = 0.4597$ s, (datos calculados en la metodología 1. Construcción grafica del diagrama de desplazamiento en el inciso d) Detención a 40 mm. En donde ΔR_i no tiene desplazamiento en el tiempo t_m y se mantiene constante, por lo tanto:

Para cuando el tiempo está entre: $2.0 \leq t_m \leq 2.4597$

$$\Delta R_i = 40 \text{ mm}$$

Paso 2. Tabulación de los desplazamientos:

Para mejor observación de las características dinámicas de los desplazamientos de ascenso y descenso y la tabulación de los cálculos, se introdujeron las siguientes ecuaciones: Ec. 5 y Ec. 6 a una hoja de cálculo. Véase Tabla 1

Tabla 1. Tabulación desplazamientos del seguidor de leva

No.	Tiempo	Ángulo de la leva (°)	Desplazamiento del seguidor
1	0.000	0	0.00
2	0.125	15	2.50
3	0.250	30	5.00
4	0.375	45	7.50
5	0.500	60	10.00
6	0.625	75	12.50
7	0.750	90	15.00
8	0.875	105	17.50
9	1.000	120	20.00
10	1.125	135	22.50
11	1.250	150	25.00
12	1.375	165	27.50
13	1.500	180	30.00
14	1.625	195	32.50
15	1.750	210	35.00
16	1.875	225	37.50
17	2.000	240	40.00
18	2.125	255	40.00
19	2.250	270	40.00
20	2.375	285	40.00
21	2.459	295	40.00
22	2.500	300	22.15
23	2.520	302	13.29
24	2.540	305	4.43
25	2.550	306	0.00
26	2.625	315	0.00
27	2.750	330	0.00
28	2.875	345	0.00
30	3.000	360	0.00

Paso 3. Curva del movimiento del seguidor.

Los cálculos de la Tabla 1, se graficaron para obtener la curva del movimiento detallado del seguidor. Véase Figura 2.

Metodología 3. Diseño del perfil de leva.

La tercera metodología fue utilizada para realizar el diseño real del perfil de leva, la forma real de leva está definida por su tamaño, así como la forma y tamaño de su seguidor. El tipo de seguidor que se empleó en el mecanismo de leva para efectuar los diferentes desplazamientos requeridos en la prueba

de resistencia mecánica de planchas eléctricas referida en el Apartado 21 de la norma NMX-J-

521/2-3-ANCE-2013 Parte 2-3, fue del tipo: Seguidor de rodillo en línea. Un seguidor de rodillo en línea siempre está alineado al centro de rotación de la leva, tiene movimientos en línea recta, el rodillo siempre mantiene contacto con la leva y se desliza sobre su contorno de perfil.



Figura 2. Curva del movimiento del seguidor de leva

Paso 1. Procedimiento general:

Para construir el perfil se utilizó el siguiente procedimiento general:

1. Dibujar el círculo base.
2. Trazar el radio del seguidor en posición 0° y con tangencia con el círculo base.
3. Dibujar el círculo primario. El círculo primario es concéntrico al círculo base y tiene de radio el centro del círculo base y el centro del círculo del seguidor de rodillo.
4. Trazar líneas radiales constructivas de referencia conforme a los grados del giro de leva calculados en la metodología 1 en el paso 2, identificados también en el diagrama de desplazamiento.
5. Transferir los desplazamientos ΔR de la curva del movimiento del seguidor, calculados en la metodología 1, en el paso 3: Diagrama de desplazamiento y en la metodología 2, en el paso 2: Tabulación de los desplazamientos, a las líneas radiales, medir a partir del círculo primario.
6. Dibujar con varios diámetros del contorno del rodillo tomando como base el centro de los desplazamientos y la intersección de las líneas radiales establecidas en los dos pasos anteriores.

7. Trazar una curva tangente tomando como base los contornos dibujados del rodillo en el paso anterior, esta curva es el perfil de leva resultante.

Paso 2. Diseño del perfil de leva:

Para construir el perfil de leva se utilizaron las funciones y los beneficios del Diseño Asistido por Computadora (CAD), provistos por el software de diseño asistido SOLIDWORKS®. Desarrollo de la empresa de soluciones: Dassault Systemes. La Figura 3, muestra la aplicación del procedimiento general descrito en el paso 1 de la metodología.

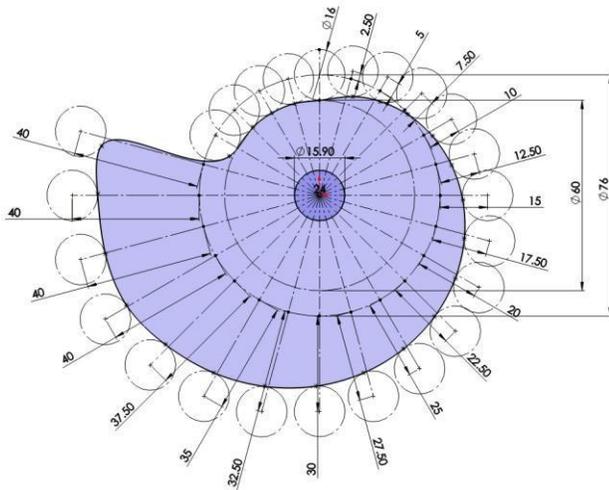


Figura 3. Diseño perfil de leva con seguidor de rodillo en línea en el software de diseño CAD-CAE SolidWorks®.

Para el croquizado fue necesario dividir a razón de cada 15° cada uno de los desplazamientos angulares hasta completar los 360°, este paso permitió posicionar estratégicamente las líneas radiales constructivas de referencia conforme a los grados del giro más fácil el diseño del perfil de la leva. Los datos se encuentran en la metodología 2, Tabla 1. Tabulación desplazamientos del seguidor de leva.

El círculo base es el que tiene 60 mm de diámetro, su dimensión fue definida luego de realizar varias pruebas en el software de diseño analizando el recorrido óptimo sobre el perfil de la leva del rodillo del seguidor. El círculo primario es el que tiene 76 mm de diámetro, y fue definido por el radio del rodillo del seguidor. El diámetro del rodillo del seguidor corresponde a un rodillo estándar tipo 625zz (5 mm

de rodada x 16 mm de diámetro externo x 5 mm de diámetro interno).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la metodología 3. Diseño del perfil de leva, se incorporaron las funciones actuales de los sistemas de diseños CAD-CAE para el modelado tridimensional de la leva, el análisis de las propiedades físicas y el análisis de funcionalidad mediante la función de análisis de movimiento del software SolidWorks®.

Análisis de las propiedades físicas de la leva.

A partir del croquizado del perfil de leva se utilizó la operación: *extruir-saliente/base* a una profundidad de 12.7 mm, otorgando el modelado sólido de la leva.

La asignación del material: Acero AISI 1020 permitió con la función: *calcular-propiedades-físicas*, obtener la masa de la leva: 788.10 gramos, su densidad: 0.01 g/mm³, su volumen: 99,759.95 mm³ y área de superficie: 20,693.94 mm². Todas estas propiedades físicas permiten tomar decisiones diversas como determinar la capacidad de motorreductor necesario para el accionamiento de la leva. Véase Figura 4.

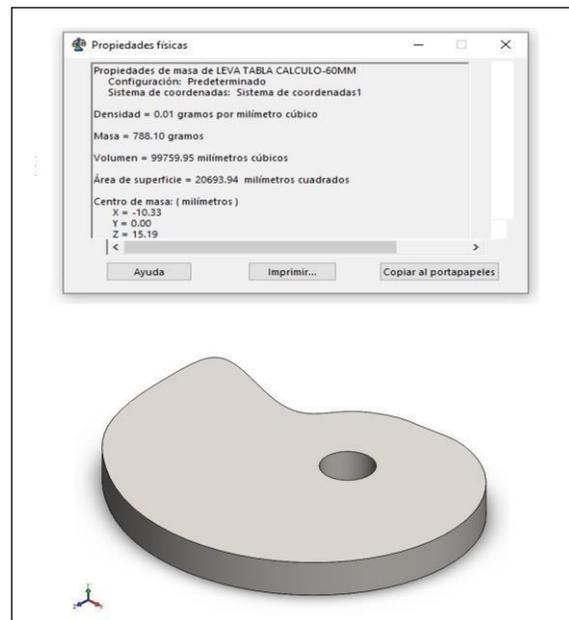


Figura 4. Modelado sólido y propiedades físicas de la leva

Análisis de funcionalidad de la leva de disco

El complemento: SOLIDWORKS Motion, una de las prestaciones CAE de SolidWorks®, permitió realizar el estudio de movimiento de la leva al ser sometida al análisis de funcionalidad. Para la prueba primeramente se desarrolló un ensamblaje que incorporo a la leva, el seguidor de rodillo especificado en el paso 2 de la metodología 3 y una base de montaje. El estudio de movimiento permitió observar el funcionamiento de la leva y generar las gráficas: diagrama de desplazamiento, la gráfica de la velocidad lineal y la gráfica de aceleración lineal del seguidor, en un ciclo de 3 segundos, y asignando un motor virtual de 20 rpm. Véase Figura 5.

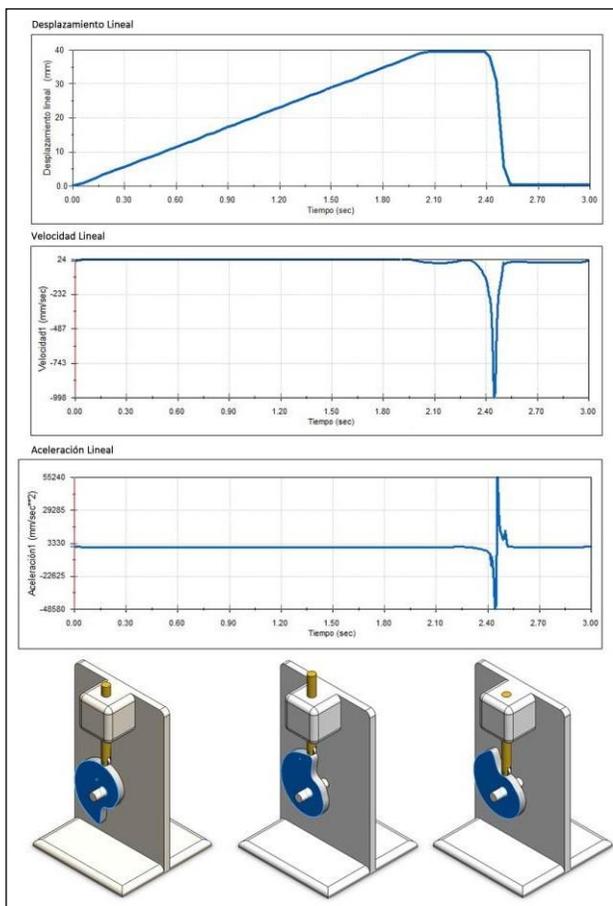


Figura 5. Análisis de funcionalidad de la leva de disco

Se pudo observar en el estudio de movimiento que la gráfica del diagrama de desplazamiento es muy idéntica a la gráfica de la curva de seguimiento del seguidor obtenida en el paso 3 de la metodología 2. Aclarando que en el estudio de movimiento CAD-CAE se utilizó una resolución de 200 tramas por

segundo logrando una definición que por el método analítico es prácticamente imposible.

Se observó en la gráfica de velocidad lineal como el movimiento cinemático del seguidor de la leva se desplaza a velocidad constante hasta el intervalo de desplazamiento en descenso en el cual la velocidad aumenta a velocidad máxima está en función de los conceptos físicos de caída libre una vez terminado el descenso la velocidad vuelve a desacelerar hasta volver a ser constante.

En la gráfica de aceleración lineal del seguidor, se observó también un movimiento cinemático del seguidor a aceleración constante de igual manera hasta el intervalo de desplazamiento en descenso en el cual la aceleración aumenta a un máximo y disminuye hasta estabilizarse nuevamente.

Por último se observaron en el mecanismo modelado del ensamblaje, los intervalos programados en la leva y la posición del seguidor en los cuatro movimientos particulares: ascenso, detención, descenso y detención, de acuerdo a los desplazamientos requeridos en la prueba de resistencia mecánica de planchas eléctricas referida en el Apartado 21 de la norma NMX-J-521/2-3-ANCE-2013 Parte 2-3,

Discusión: Para calcular el desplazamiento del seguidor se consideró el cálculo cinemático de leva para movimiento con velocidad constante, este tipo de movimiento se caracteriza por desplazamientos en línea recta por tener una velocidad uniforme. Existen otros tipos de cálculos cinemáticos que incluyen a la aceleración de forma constante y desaceleración de forma constante, el cálculo del desplazamiento armónico el cual reduce la inercia en los perfiles de leva cuando estos son muy cambiantes, existen los esquemas de movimiento combinado, los cuales pudieron haberse considerado oportunos en el desarrollo de este trabajo al observar los gráficos de aceleración y de velocidad lineal¹⁰.

CONCLUSIONES

Las tres metodologías desarrolladas analíticamente permiten de manera confiable realizar el cálculo, diseño y programación del movimiento de una leva de disco. Las herramientas CAD-CAE del estudio de movimiento en modo virtual de simulación permiten

la observación a detalle de las características cinemáticas y comportamientos dinámicos de los desplazamientos de ascenso y descenso, así mismo permiten corroborar y realizar un análisis y comparaciones de las curvas de desplazamiento y del movimiento detallado del seguidor obtenidas previamente con la tabulación de los cálculos en la metodología del estudio grafico del movimiento combinado del seguidor de leva.

AGRADECIMIENTOS Y/O RECONOCIMIENTOS

A la empresa: Laboratorio JABA S.A. de C.V., por confiar en los profesores investigadores de la División de Ingeniería Industrial y al Instituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo (ITSOEH) por ser la fuente de financiamiento de estas investigaciones.

REFERENCIAS

1. Universidad de Cantabria (2006). Introducción a las Levas. Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica. Cantabria, Santander. España.
2. Ulrich, K. & Eppinger, S. (2013). Diseño y Desarrollo de Productos. México: Mc. Graw-Hill. ISBN: 978-607-15-0944-4.
3. Norton, R. (2011). Diseño de Máquinas un Enfoque Integrado. Cuarta Edición. México: Pearson Educación. ISBN: 978-607-32-0589-4.
4. Bertoline, G., Wiebe, E., & Miller, Craig. (1999). Dibujo en Ingeniería y Comunicación Gráfica. México: Mc. Graw Hill. ISBN: 9701019474.
5. Booker, P. (1979). History of Engineering Drawing. Londres: Northgate Pub. Co. ISBN: 0852984243.
6. Dessoault Systemes SolidWorks Corp. (2010). Sesiones Prácticas SolidWorks Simulation. Obtenido de https://www.solidworks.es/sw/images/content/Training/SIM_2010_HOTD_ESP.pdf
7. Schwab, K. (2016). The Four Industrial Revolución. Switzerland: Work Economic Forum. ISBN-13:097-1-944835-01-9.
8. Norma Oficial Mexicana, NOM-003-SCFI-2014. Productos Eléctricos - Especificaciones de Seguridad. Diario Oficial de la Federación.
9. Norma Mexicana, NMX-J-521/2-3-ANCE-2013. Requisitos Particulares para Planchas Eléctricas. Diario Oficial de la Federación.
10. Myszka, D. (2008). Diseño de Máquinas y Mecanismos. Cuarta Edición. México. Pearson Educación. ISBN: 978-607-3
11. Gieck, K. (2016). Manual de Fórmulas Técnicas. México: Alfaomega Grupo Editor. ISBN: 978-6076227541