

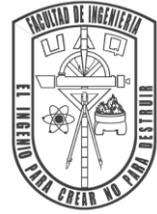
2022

Parametrización de una Celda de Carga para la Medición de Histéresis en
Interruptores Automotrices: Descripción Teórica y Caso de Estudio

I.I. Sergio Serrano Ayala



Universidad Autónoma de Querétaro



Facultad de Ingeniería

Tesis

Parametrización de una Celda de Carga para la Medición de Histéresis en
Interruptores Automotrices: Descripción Teórica y Caso de Estudio

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestro en:
Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta:

I. I. Sergio Serrano Ayala

Dirigido por:

MI Edwin Geovanny Vergara Ayala

Querétaro, Qro. a 15 de diciembre de 2022



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Parametrización de una Celda de Carga para la
Medición de Histéresis en Interruptores Automotrices:
Descripción Teórica y Caso de Estudio

por

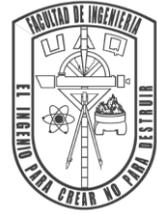
Sergio Serrano Ayala

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAN-302371



Universidad Autónoma de Querétaro



Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Tesis

Parametrización de una Celda de Carga para la Medición de Histéresis en Interruptores Automotrices: Descripción Teórica y Caso de Estudio

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestro en:
Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta:

I. I. Sergio Serrano Ayala

Dirigido por:

MI Edwin Geovanny Vergara Ayala

Sinodal presidente: MI Edwin Geovanny Vergara Ayala

Sinodal secretario: MI Javier García Pérez

Sinodal vocal: MAP José Agustín Martínez Rodríguez

Suplente: Dra. Magdalena Mendoza Sánchez

Suplente: Dr. Suresh Thenozhi

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Querétaro, Querétaro México

Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Queretaro quien me ha brindado la oportunidad de pertenecer en este posgrado para seguir creciendo profesionalmente.

A Bitron de México S.A de C.V. por el apoyo durante mis estudios y también por permitirme desarrollar esta tesis con el soporte de sus instalaciones.

Índice

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 1 |
| Abstract | 2 |
| 1. Introducción..... | 3 |
| 2. Antecedentes..... | 5 |
| 2.1.1. Histéresis..... | 5 |
| 2.1.2. Efecto háptico | 7 |
| 2.1.3. Snap ratio | 8 |
| 2.1.4. Celda de carga..... | 9 |
| 2.1.5. Diseño de experimentos..... | 10 |
| 2.1.6. Pruebas de normalidad..... | 11 |
| 2.1.7. Fundamentación teórica..... | 12 |
| 3. Planteamiento del problema y justificación..... | 14 |
| 4. Hipótesis | 18 |
| 5. Objetivos..... | 19 |
| 5.1. Objetivo General | 19 |
| 5.2. Objetivos Específicos | 19 |
| 6. Materiales y métodos | 20 |
| 6.1. Definición del diseño de experimentos | 23 |

| | | |
|------|--|----|
| 6.2. | Medición experimental..... | 25 |
| 7. | Resultados y discusión..... | 31 |
| 7.1. | Análisis de datos..... | 31 |
| 7.2. | Diseño de experimentos óptimo | 34 |
| 7.3. | Mejora en la parametrización | 36 |
| 7.4. | Control de variables a través de un estudio de capacidad | 41 |
| 8. | Conclusiones..... | 46 |
| 9. | Consideraciones éticas de seguridad e higiene | 48 |
| 9.1. | Equipo de protección antiestática para el personal. | 48 |
| 9.2. | Medidas de higiene para personal ante la contingencia sanitaria por COVID-19. | 48 |
| 9.3. | Normas de seguridad e higiene para el uso de laboratorio e instrumentos de medición. | 49 |
| 9.4. | Disposición de material no conforme..... | 49 |
| 9.5. | Consideraciones éticas de la privacidad de los datos, confidencialidad y manejo de la información..... | 50 |
| 9.6. | Consideraciones éticas de propiedad Intelectual | 51 |
| 10. | Referencias bibliográficas..... | 52 |

Índice de cuadros

| | | |
|-----------|---|----|
| Cuadro 1. | Factores y niveles de la celda de carga | 23 |
| Cuadro 2. | Selección D-óptima de Federov | 25 |
| Cuadro 3. | Prueba de normalidad..... | 26 |
| Cuadro 4. | Matriz de significancia de los factores..... | 32 |
| Cuadro 5. | Ecuaciones del modelo..... | 33 |
| Cuadro 6. | Prueba de normalidad en los residuales del modelo. | 35 |
| Cuadro 7. | Parámetros sugeridos | 40 |

Índice de figuras

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 1. | Representación de histéresis para un interruptor eléctrico | 6 |
| Figura 2. | Sección transversal del interruptor, (a) botón de plástico, (b) almohadilla de silicona y (c) PCBA. | 7 |
| Figura 3. | Diagrama de los diferentes tipos de factores en diseño robusto. | 15 |
| Figura 4. | Sistema de la celda de carga | 21 |
| Figura 5. | Switch de referencia..... | 22 |
| Figura 6. | Diagrama de flujo de la metodología..... | 22 |
| Figura 7. | QQ-Plot para prueba normal de F1..... | 27 |
| Figura 8. | QQ-Plot para prueba normal de F2..... | 28 |
| Figura 9. | QQ-Plot para prueba normal de F3..... | 29 |
| Figura 10. | QQ-Plot para prueba normal de F4. | 30 |
| Figura 11. | Interacción de ds y tp para la fuerza de F1, gráfica de RStudio..... | 36 |
| Figura 12. | Interacción de ds y tp para la fuerza de F2, gráfica de RStudio..... | 37 |
| Figura 13. | Interacción de ds y mf para la fuerza de F3, gráfica de RStudio | 38 |
| Figura 14. | Interacción de ds y tp para la fuerza de F4, gráfica de RStudio..... | 39 |
| Figura 15. | Estudio de capacidad para F1 | 42 |
| Figura 16. | Estudio de capacidad para F2..... | 43 |
| Figura 17. | Estudio de capacidad para F3..... | 44 |
| Figura 18. | Estudio de capacidad para F4..... | 45 |

Resumen

A través del gráfico de histéresis se evalúa la relación de fuerza y el desplazamiento en el interruptor eléctrico de uso automotriz llamado también botón pulsador. El análisis de histéresis debe considerar variables indirectas como la velocidad de desplazamiento, el tiempo de muestreo, el tamaño de la sonda de contacto y la fuerza de retorno máxima controlada a través de un sistema de celda de carga. Desafortunadamente, existen pocos documentos sobre variables indirectas para medir la histéresis. Este artículo presenta los resultados experimentales sobre el impacto de estas variables en la medición de la histéresis, realizando una parametrización óptima utilizando la selección D-óptima de Fedorov y la regresión lineal múltiple. Los hallazgos muestran que la velocidad de desplazamiento y el tamaño de la sonda de contacto de la celda de carga son las variables críticas que impactan el resultado de la histéresis.

Abstract

The relationship between the force and the displacement of the automobile buttons is evaluated through the hysteresis graph. Hysteresis analysis should consider indirect variables such as displacement speed, sampling time, touch probe size, and the maximum return force-controlled through a load cell system. Unfortunately, there are few documents on indirect variables to measure hysteresis. This paper introduces the experimental results on the impact of these variables on hysteresis measurement, performing an optimal parameterization using Fedorov D-optimal selection and multiple linear regression. The findings show that the displacement speed and touch probe size of the load cell are the critical variables that impacts the result of hysteresis.

Keywords: Electrical switch, Hysteresis, Haptic, Force/displacement, Snap ratio, Load cell.

1. Introducción

Por lo general, los automóviles se clasifican por su seguridad, rendimiento, economía de combustible, rendimiento y comodidad. Algunas características de utilidad incluyen amortiguación de ruido, espacio de carga, acceso a la cabina, ajustes y acabados interiores y controles hápticos. El último está relacionado con la percepción táctil al presionar un botón de un interruptor eléctrico (Carreira et al., 2013; Kwon et al., 2018).

Presionar un interruptor eléctrico puede generar fatiga en el usuario dependiendo de la frecuencia y contexto de uso; por lo que estos aspectos son un factor esencial en su diseño y componentes (Lee et al., 2009; Radwin & Ruffalo, 1999; Vieira et al., 2017). Sin embargo, aunque las interfaces táctiles han reemplazado algunos interruptores eléctricos en la industria automotriz, este cambio no puede ocurrir en el corto plazo debido a los costos de desarrollo y fabricación (Canadas et al., 2017; Doerrer & Werthschuetzky, 2002). Dado que los clientes y los fabricantes priorizan estos costos, las pruebas de confiabilidad son esenciales para la viabilidad de fabricación de la tecnología eléctrica que aún se utiliza (Vieira et al., 2017).

Los principales componentes de los interruptores eléctricos, utilizados actualmente, son una almohadilla de silicona (AS), también llamada "*Silicone Pad*" en inglés; un mecanismo de componentes plásticos; y una placa de circuito impreso ensamblada (PCBA) (Gaspar et al., 2017). La AS tiene la función de resistencia mecánica cuando se presiona un botón y también proporciona contacto eléctrico que cierra el circuito. El PCBA es el encargado de proporcionar la función en el interruptor, cuando este tiene contacto con la AS, el circuito se cierra. Esta conjunción de componentes da, en esencia, el funcionamiento electromecánico de los interruptores eléctricos, que es interactuado a través de la háptica (Canadas et al., 2017).

La háptica comprende un sistema de percepción basado en dos subsistemas, uno cinestésico y otro cutáneo (Mechanisms, 2009; Pérez Ariza & Santís-Chaves, 2016). El sistema cinestésico se viene desarrollando desde hace varios años, y pueden generar

retroalimentación mecánica compuesta por magnitudes de fuerza y desplazamiento. Por otro lado, el sistema cutáneo es táctil, y su función es recibir retroalimentaciones sensibles a la textura, la temperatura, la forma, la rigidez y las vibraciones al interactuar. (Alexander et al., 2014; Mechanisms, 2009; Pérez Ariza & Santís-Chaves, 2016). Cada subsistema representa un tipo diferente de tecnología (Alexander et al., 2014; Pérez Ariza & Santís-Chaves, 2016).

En consecuencia, en el área de interacción y comodidad de los automóviles, los dispositivos táctiles están poco estudiados, sin embargo, los pulsadores de los automóviles han incluido en su tecnología, características cinestésicas y cutáneas, tales como rugosidad del material, tamaño, fuerza y desplazamiento al ser presionados. (Cholewiak et al., 2008; Decker et al., 1999; Gaspar et al., 2017; Wu & Smith, 2015). Así, la háptica se puede definir como la sensación que se puede percibir cuando se presiona un botón, por lo que es de interés desarrollar la medición de la retroalimentación mecánica en el botón. La medición de la retroalimentación se puede describir bien a través de los fenómenos de histéresis.

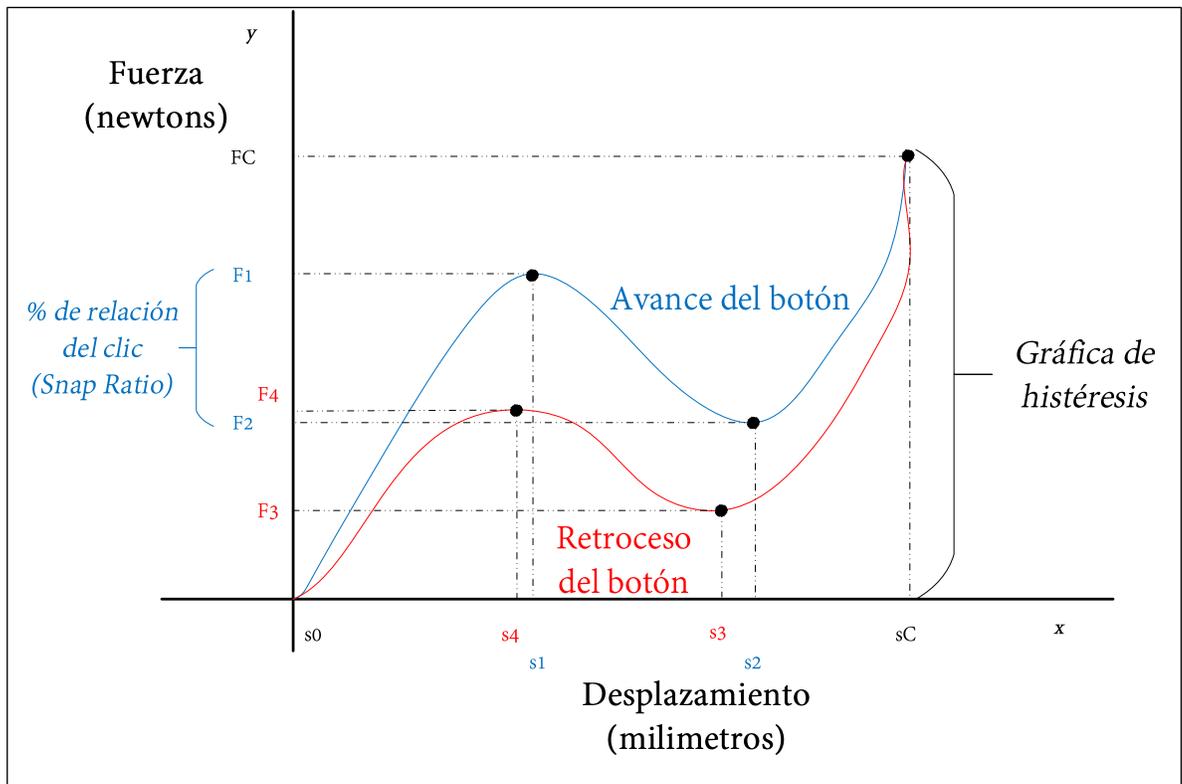
2. Antecedentes

2.1 Descripción teórica

2.1.1. Histéresis

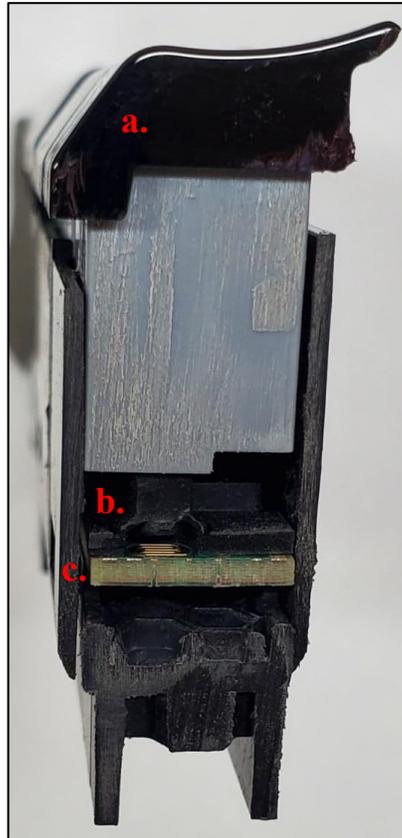
La histéresis es una representación gráfica que describe el comportamiento de un fenómeno, en este caso específico en la mecánica de interruptores eléctricos, a través de dos variables (fuerza y desplazamiento) expresadas como un inicio y un final (Morris, 2011). Representa gráficamente la relación fuerza-desplazamiento en un ciclo de entrada-salida llamado histéresis "que también puede describirse como la carrera y la fuerza de reacción de un interruptor". De acuerdo con el gráfico de histéresis (Figura 2), el desplazamiento total ($s_0 - s_C$) es entre la pastilla de contacto de la AS y la superficie de PCBA (Figura 2) (Vieira et al., 2017). Los desplazamientos en los interruptores eléctricos oscilan entre 1,5 y 2,5 milímetros. Las investigaciones de Canadas et al. (2017) y Vieira (2017) muestran que la AS contribuye significativamente al desempeño del gráfico de histéresis (Canadas et al., 2017; Vieira et al., 2017). Por tanto, la percepción del trazo a través de la háptica puede ser mejor debido a la compresión de los materiales que ejerce la inercia al pulsar el interruptor eléctrico (Valverde et al., 2019).

Figura 1. Representación de histéresis para un interruptor eléctrico



Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Sección transversal del interruptor, (a) botón de plástico, (b) almohadilla de silicona y (c) PCBA.



Fuente: Bitron de México S.A. de C.V.

2.1.2. Efecto háptico

La sensación háptica en un interruptor eléctrico, depende principalmente del diseño de los componentes del botón; ya la vez, el diseño será modificado por la propuesta del interruptor de acuerdo a los requerimientos y especificaciones del cliente (Schütte & Eklund, 2005). Por ejemplo, funciones como arranque de motor, eleva cristales, control de bloqueo de puertas y retrovisores, entre otras. Cada una de estas aplicaciones requiere una apreciación diferente de la háptica (Vieira et al., 2017).

Para mejorar la percepción de la háptica se han desarrollado diferentes investigaciones. Valverde et al. (2019) utilizaron un diseño de experimentos para determinar si los elementos de diseño son significativos para lograr una háptica aceptable en el caso de estudio. Se utilizaron cinco factores relacionados con el diseño mecánico del espacio entre las guías, longitud de precarga, longitud de actuadores, longitud de guías y lubricación en las guías. La variable de respuesta fue el perfil háptico formado por puntos de fuerza y desplazamiento en el gráfico. El resultado fue que cada cambio en el diseño mecánico puede proporcionar un perfil háptico diferente y una percepción diferente al usuario. (Valverde et al., 2019).

2.1.3. Snap ratio

La característica de chasquido se expresa en unidades porcentuales (consulte el eje "y" en la Figura 2). Cuando la diferencia entre la magnitud F1 y F2 es significativa, la háptica es mejor y la percepción también. El Snap Ratio (SR) da como resultado una retroalimentación mecánica percibida táctilmente en el interruptor eléctrico (Canadas et al., 2017; Enigk et al., 2008; Gaspar et al., 2014; Nagurka et al., 1999; Nagurka & Marklin, 2005; Radwin & Jeng, 1997; Vieira et al., 2017).

$$\text{Snap Ratio } \% = \frac{F1 - F2}{F1} \times 100 \quad (1)$$

La fuerza F3 representa la fuerza mínima de retorno, y como su nombre lo indica, se obtiene cuando el interruptor regresa a su posición original. Además, F4 representa la fuerza máxima de retorno (ver Figura 2).

Además, en la Figura 2, FC y sC representan la fuerza de contacto máxima y la carrera de contacto máxima (desplazamiento máximo).

Por otro lado, el SR se describe como la relación entre la fuerza de actuación máxima y la fuerza de contacto mínima "F1 & F2" (Ver Figura 2). Algunos autores también se refieren al chasquido como la intensidad táctil debida a la liberación repentina de energía. El efecto de "chasquido" está relacionado con un contacto eléctrico exitoso (Oulasvirta et al., 2018;

Valverde et al., 2019). El desplazamiento instantáneo define la curva de histéresis entre la cresta y el valle (Enigk et al., 2008). Debe estar entre 40% y 60% para una buena háptica (Gaspar et al., 2017; Vieira et al., 2017).

En otra investigación, se usó un diseño experimental para reducir el ruido en el interruptor usando el diseño de la AS mientras se preservaba la característica de retroalimentación mecánica en clic o SR como se conoce. Se utilizó la matriz ortogonal L8 (2^7) para definir el impacto en el ruido. Se utilizaron cuatro factores del diseño de la AS; altura del cabezal, diámetro del faldón, espesor de la placa base y diámetro del cabezal inferior. La variable de respuesta seleccionada fue el cambio en la velocidad ΔV del cabezal del domo de la AS con respecto a la PCBA, se definió con el modelo de elementos finitos del domo de la AS. La altura del cabezal y el espesor de la placa base fueron los factores que pueden modificar la velocidad ΔV . En base a este resultado, se utilizó un método de superficie de respuesta (RSM) para determinar los valores óptimos de los parámetros de diseño para el cambio mínimo de velocidad ΔV , utilizando las variables altura del cabezal y espesor de la placa base. En este trabajo se demostró que el ruido de clic se puede reducir manteniendo la calidad táctil mediante la optimización de la forma de la AS. (Kwon et al., 2018).

2.1.4. Celda de carga

La celda de carga es un equipo para medir fuerza y distancia; posteriormente, un software puede ayudar a obtener la relación entre ambos y la gráfica de los fenómenos de histéresis.

En una celda de carga, los dispositivos primarios integrados para determinar las características del gráfico de histéresis son un motor de desplazamiento automático, una tarjeta de adquisición de datos y un programa informático para la representación del gráfico (Canadas et al., 2017; Kis et al., 2004; Nagurka et al., 1999). Canadas et al. (2017), utilizaron el método Gage R&R con ANOVA para validar el equipo de medición relacionando las variables de fuerza de actuación F1, fuerza de contacto F2 y carrera S2. Sin embargo, los parámetros utilizados en la celda de carga no se mencionan con precisión; solo se mencionó un rango de velocidad descrito como óptimo de 17 a 330 $\mu\text{m/s}$ siguiendo el diseño de histéresis (Canadas et al., 2017).

En otra investigación, las variables de velocidad, fuerza y desplazamiento se correlacionaron gráficamente (Weir et al., 2004). La velocidad seleccionada para la moderación de la fuerza estuvo estrechamente relacionada con el uso del interruptor (Valverde et al., 2019). Además, los investigadores de Nagurka y Marklin (2005) utilizaron un diseño experimental y determinaron la forma en que el perfil de la gráfica de histéresis variaba solo cambiando la velocidad de desplazamiento del botón (Nagurka & Marklin, 2005).

Los resultados demuestran una fuerza de rigidez no lineal frente a la característica de desplazamiento a una velocidad determinada y la presencia de fuerzas de tipo amortiguador que aumentan con la velocidad de depresión del botón a un desplazamiento determinado (Nagurka & Marklin, 2005).

2.1.5. Diseño de experimentos

El diseño de experimentos (DoE, por sus siglas en inglés) es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso. En él se plantean un conjunto de pruebas experimentales en las que se determina cuales pruebas se deben realizar y de qué manera. Los datos obtenidos de estas pruebas son analizados estadísticamente para obtener una evidencia objetiva y establecer una conclusión efectiva al problema. (Gutiérrez & Salazar, 2008).

En el sector industrial, esta técnica puede ser utilizada para mejorar el rendimiento de un sistema o proceso, reducir la variabilidad, mejorar la calidad de los productos, determinar los factores de un proceso, el impacto de los factores sobre el proceso y encontrar la condición de operación óptima, entre otros (Tanco Rainusso, 2008). Generalmente para implementar un diseño de experimentos se llevan a cabo los siguientes pasos (Tanco et al., 2007).

1. La identificación del problema.
2. Selección de factores y niveles.
3. Selección de la variable de respuesta.
4. Elección del diseño experimental.
5. Realización de los experimentos.
6. Análisis de los datos.
7. Conclusiones y recomendaciones.

Un diseño factorial estudia el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas. Su principal objetivo es determinar una combinación de niveles de los factores con la cual crear un proceso con mejor desempeño (Gutiérrez & Salazar, 2008). Un diseño factorial completo considera todas las posibles combinaciones que pueden crearse a partir de niveles y factores seleccionados. Estas combinaciones se les conoce como matriz de diseño o arreglo factorial.

Los niveles de un factor pueden ser de tipo cuantitativo o cualitativo. Los primeros son aquellos que puede tomar valores métricos y los de tipo cualitativo son los que están dados por cualidades o categorías del factor o variable. (Gutiérrez & Salazar, 2008).

2.1.6. Pruebas de normalidad

Las pruebas de normalidad para datos se utilizan para asegurar que los datos provienen de una fuente estable y confiable, donde también podría quedar implícito el sistema de medición para la obtención de los mismos. El estudio de normalidad es utilizado a menudo una vez que se tienen una serie de datos que provienen de una prueba o experimento lo que se busca también es que los datos representen una distribución normal. La hipótesis es que en una serie de datos siempre debe ser representada por una distribución normal. La prueba de normalidad puede ser de manera gráfica y también evaluarse a través de un coeficiente. A continuación, se enumeran algunas pruebas de normalidad utilizadas comúnmente. (Bee Wah & Mohd Razali, 2011; Mishra et al., 2019)

1. Shapiro–Wilk
2. Kolmogorov–Smirnov
3. Anderson-Darling

En el trabajo de Yap Bee Wah llamado “*Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests*” se demuestra que la mejor prueba es la de Shapiro–Wilk, sin embargo, también se recomienda realizar pruebas graficas para datos menores a 50 observaciones.

2.1.7. Fundamentación teórica

La celda de carga está compuesta por un sensor de fuerza y una estructura de aluminio para su fijación, en esta última también incluye un sistema mecánico que protege a la celda de carga cuando se aplica una fuerza mayor a 300 Newtons. La interface con el sistema de medición está constituida por elementos de hardware como son tarjetas electrónicas de adquisición de datos, amplificador de señal, servo motor para el control del desplazamiento, entre otras. (Canadas et al., 2017; Nagurka et al., 1999; Nagurka & Marklin, 2005). Se relaciona principalmente con la magnitud de desplazamiento. La fuerza esta expresada en Newtons y el desplazamiento en milímetros ambas referidas en el Sistema Internacional de Unidades (BIPM, 2008). Estas magnitudes constituyen la gráfica de histéresis.

La histéresis es una representación gráfica que describe el comportamiento de un fenómeno a través de dos variables en este caso magnitudes de fuerza y desplazamiento con un comportamiento de bucle de entrada y salida o también descrito como un inicio y un fin (Morris, 2011). La fuerza y el desplazamiento son los mensurandos para la caracterización de la háptica (BIPM, 2008; Canadas et al., 2017; Vieira et al., 2017). A continuación, en la Figura 2 representa gráficamente la relación de fuerza y desplazamiento en un ciclo de entrada y salida denominado histéresis. “Carrera y fuerza de reacción de un botón de interruptor”. (Vieira et al., 2017).

En el eje horizontal está representado el desplazamiento con unidades de milímetros. En el eje vertical se representa la fuerza expresada en Newtons.

La fuerza F_1 representa la fuerza máxima de accionamiento (peak force, en inglés) con su respectivo desplazamiento que se encuentra en la posición s_1 . F_2 representa la fuerza mínima de accionamiento también conocida como fuerza mínima de contacto ya que es aquí en donde ocurre el cierre del contacto eléctrico y el desplazamiento queda ubicada con s_2 . Estas fuerzas se obtienen cuando se oprime el interruptor eléctrico.

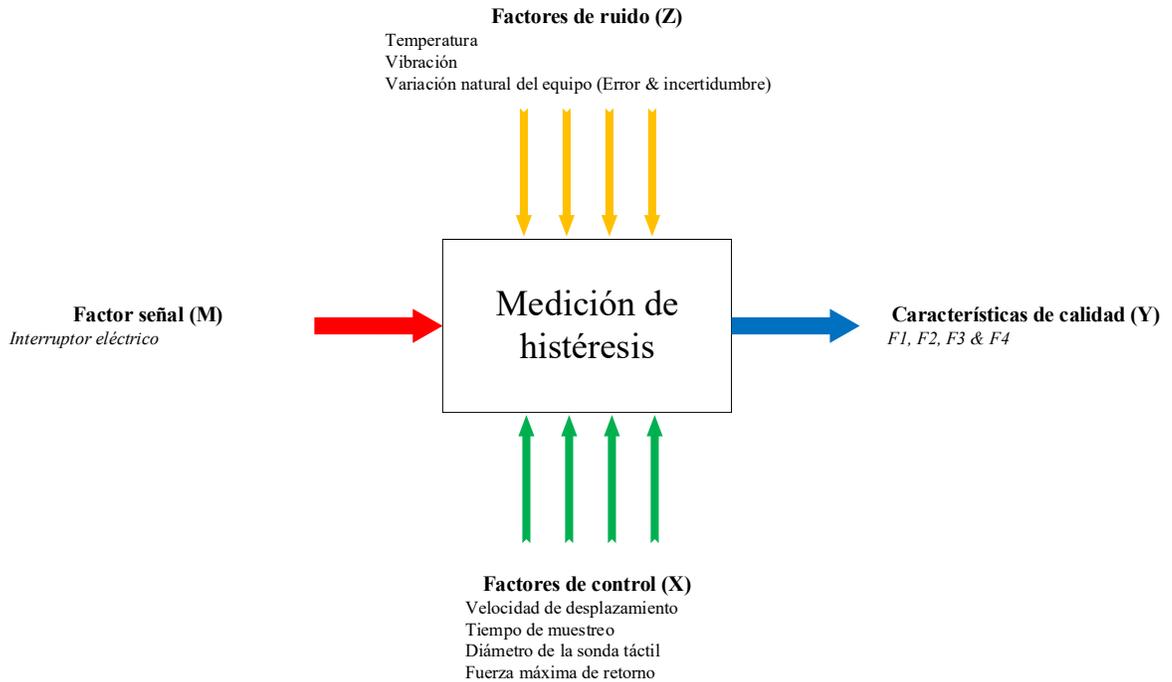
3. Planteamiento del problema y justificación

Para parametrizar una celda de carga en la medición de la histéresis, debemos identificar las variables que intervienen en la obtención de los datos. Si bien es fundamental definir los parámetros que afectan la medición de la histéresis, es crucial conocer las características técnicas del equipo a utilizar (Nagurka et al., 1999). Identificar las variables en el sistema de medida que depende del programa informático. Las principales características son conocer los rangos de ajuste de cada subsistema y del sistema integrado. Los rangos de ajuste referidos pueden ser variados a través de un software (Canadas et al., 2017; Valverde et al., 2019). Por lo tanto, las características de histéresis de las muestras deben estar dentro del rango de ajuste del equipo.

La adecuada resolución de magnitudes está en función de las características específicas de la histéresis para detectar la variación a través del equipo de medición (BIPM, 2008). La calibración del hardware para las magnitudes aumenta la precisión de la medida, por lo que debe realizarse antes de caracterizar la histéresis. Para la calibración de los equipos, ningún método considera las magnitudes de fuerza y desplazamiento juntas. Por lo tanto, cada magnitud debe calibrarse de forma independiente.

Otras variables a considerar son las de ruido que se pueden clasificar en internas o externas, como el lugar de medición en la superficie del botón, rozamiento, temperatura, humedad, entre otras. En la Figura 1 se describen los diferentes tipos de factores que intervienen. Algunos equipos para realizar los experimentos de medición se encuentran en un entorno no controlado, por lo que será necesario trazar las variables de ruido que pueden ser medibles (BIPM, 2008). Por ejemplo, la variable específica del punto de medición podría causar variabilidad si no se controla. Además, la forma de la superficie del botón es variable ya que proviene del diseño inicial de acuerdo con los requisitos del cliente. (Canadas et al., 2017).

Figura 3. Diagrama de los diferentes tipos de factores en diseño robusto.



Fuente: Elaboración propia.

Otra variable a considerar para medir la háptica es el acondicionamiento de la Almohadilla de Silicona (AS), conocida como el principal contribuyente a la háptica. El acondicionamiento consiste en unidades previas de acuerdo con la recomendación del fabricante (Guide, n.d.). Se debe considerar un procedimiento de medición para hápticos con fines de reproducibilidad, así como estudios estadísticos de linealidad y sesgo (BIPM, 2008).

El principal problema a enfrentar en el desarrollo de esta investigación fue el desconocimiento de las características del equipo en la celda de carga, tales como resolución, exactitud, precisión, incertidumbre, calibración y programación, y la interacción entre ellas. Sin embargo, una vez identificadas y controladas las variables, podremos obtener el control de histéresis.

La parametrización de la histéresis en una celda de carga en interruptores eléctricos cobra importancia debido a que las especificaciones y normas de los fabricantes de equipo original

OEM (Original Equipment Manufacturing, por sus siglas inglés), no son amplias y precisas (Almefelt et al., 2006). Por lo que en muchas ocasiones la evaluación de la háptica se ha llevado a cabo de manera empírica tomando en cuenta a los mejores competidores (Best-In-Class, por sus siglas en inglés) (Vieira et al., 2017; Weir et al., 2004; Wellings et al., 2010). El OEM no puede dar a los proveedores de interruptores eléctricos una especificación de los parámetros de medición para la obtención de la histéresis (Weir et al., 2004).

Existen pocos equipos para la medición de histéresis en interruptores eléctricos con una escala y resolución adecuada a las tolerancias que se busca evaluar (Colton & Hollerbach, 2007). Los instrumentos pueden llegar a ser costosos debido a que tienen que ser construidos a la medida de la necesidad del cliente. La principal restricción es el tiempo para su construcción, ya que suelen ser largos. De igual manera los fabricantes de estos equipos no aplican algún método de validación apropiado que pueda garantizar la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones. Los costos dependen de los componentes a utilizar ya que existe una gran variedad de los mismos (Canadas et al., 2017; Nagurka et al., 1999). Se estima que el desarrollo de una celda de carga por un integrador es de alrededor de \$50,000 USD.

El principal contribuyente de la característica de háptica es la AS por lo que su desarrollo y fabricación de este último es relevante en la calidad de un interruptor eléctrico. La fabricación en serie de una AS se realiza a través de un molde que es diseñado de acuerdo a las especificaciones de histéresis. El costo de un herramental para una AS oscila entre los \$15,000 y \$30,000 USD dependiendo del número de cavidades y volumen contratado al proveedor. (Vieira et al., 2017).

El tiempo de desarrollo de la AS representa un costo ya que esta se realiza de manera empírica, es decir, a prueba y error, comenzando con la construcción de un molde con metales suaves como el aluminio, posteriormente el ajuste de la herramienta se tiene que hacer en base al resultado histéresis comparado con la especificación (Gaspar et al., 2019). El costo de estos desarrollos puede verse severamente afectado si no se tienen una descripción eficaz de la histéresis (Vieira et al., 2017).

En algunos trabajos de investigación sólo se hace énfasis en las características de la histéresis (Canadas et al., 2017; Valverde et al., 2019). Sin embargo, existen variables del sistema de medición que pueden influir en la calidad del resultado de esta medición de histéresis (Nagurka et al., 1999). La definición y el control de estas variables son elementos que se deben considerar para los estudios de validación (Vieira et al., 2017).

No existen referencias suficientes de trabajos anteriores en dónde se haya estudiado a fondo las variables que afectan a la obtención de la histéresis en una celda de carga. Entre otros motivos encontramos que una parametrización robusta de la celda de carga permitirá evaluar las características de histéresis con repetibilidad y reproducibilidad en los resultados (Canadas et al., 2017). Actualmente el diseño de la histéresis no contempla ninguna variable o elemento de entrada para la medición y caracterización de la misma (Guide, n.d.).

Con los datos de parametrización se podrá homologar la medición con otros equipos similares dentro de la organización a través de una metodología documentada. Con un método estandarizado de medición se podrán validar celdas de carga de nuevos proyectos en un menor tiempo lo que aumentaría la productividad. Así mismo con la parametrización se podría homologar el proceso de medición de histéresis con los fabricantes de la AS lo que ahorraría tiempo de aprobación para este componente.

4. Hipótesis

Las variables de velocidad de desplazamiento, tiempo de muestreo, tamaño de la sonda táctil y la fuerza máxima de retorno, contribuyen de manera significativa a la caracterización y parametrización de la gráfica de histéresis en una celda de carga.

5. Objetivos

5.1. Objetivo General

Determinar la parametrización de la histéresis en una celda de carga para interruptores eléctricos automotrices a través de la significancia de sus variables de velocidad de desplazamiento, tiempo de muestreo, tamaño de la sonda táctil y fuerza máxima de retorno, formada a través de la medición de fuerza y desplazamiento.

5.2. Objetivos Específicos

1. Identificar la significancia de las variables de control para la medición de las fuerzas de F1, F2, F3 y F4 que conforman a la gráfica de histéresis, para obtener una medición precisa y confiable en la celda de carga.
2. Establecer los parámetros de las variables de la celda de carga para que el sistema de medición sea capaz de repetir y reproducir los resultados de fuerza que describen a la histéresis.
3. Definir y controlar las fuentes de variación que hagan sensible al sistema de medición de fuerza y desplazamiento con la finalidad de controlarlas cuando sea posible.
4. Establecer un estándar para la parametrización de la celda de carga de otras líneas de prueba en interruptores eléctricos automotrices.

6. Materiales y métodos

Esta metodología se llevó a cabo en una organización automotriz en la cual se fabrican dispositivos electromecánicos de uso automotriz. Para este estudio se utilizó una estación de medición de háptica existente que es utilizado como equipo de prueba.

El equipo utilizado es uno ya existente en el proceso de manufactura llamado EOLT (End Of Line Tester, por sus siglas en inglés) que está compuesto por (ver Figura 4, referencia):

1. Una celda de carga:
 - a) Servo robot para el desplazamiento en el eje “Z” de la marca Omron modelo R88M-1M10030T-BS2 200 hasta 3000 rpm.
 - b) Sensor de fuerza de la marca Kistler modelo 9217A (-500 a 500 Newtons). Histéresis típica < 0.2% FSO (de la escala total de salida, por sus siglas en inglés).
 - c) Módulo de amplificación de señal de la marca Kistler modelo 5073A111.
 - d) Sensor de desplazamiento de la marca HBM modelo WA/10mm. Desviación de linealidad. Mayor desviación entre el punto inicial y final (incluida la histéresis con referencia a la sensibilidad nominal) $\leq \pm 0.2 \%$.
 - e) Módulo de amplificación de señal para sensor de desplazamiento de la marca HBM modelo MP-55.
2. PLC de la marca Omron modelo NJ501-1320.
3. Workstation de la marca HP.
4. HMI Cimplicity de General Electric.

Figura 4. Sistema de la celda de carga



Fuente: Bitron de México S.A. de C.V.

La muestra a utilizada es un switch de uso automotriz con número de parte interno “30282115” (ver Figura 5).

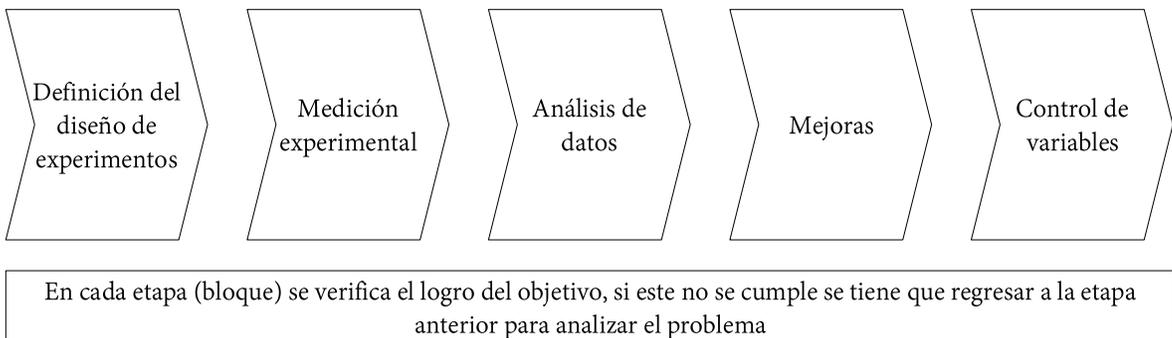
Figura 5. *Switch de referencia*



Fuente: Bitron de México S.A. de C.V.

Los pasos fueron basados en la metodología Define Measure Analyze Improve Control (DMAIC) por sus siglas en inglés: definición del diseño de experimentos, medición experimental, análisis de datos, mejoras y control de variables (ver Figura 6).

Figura 6. *Diagrama de flujo de la metodología*



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe detalladamente el procedimiento metodológico seguido durante la investigación, así como la descripción de los resultados obtenidos y su análisis.

6.1. Definición del diseño de experimentos

Con base en las variables de ajuste que se identifiquen en la programación del PLC y HMI se determinó la tabla de factores y niveles para la medición de la háptica (histéresis). Los niveles para los factores se tomaron con base en los rangos de ajuste y los rangos de operación.

Cuadro 1. Factores y niveles de la celda de carga

| Factor | Código | Primer nivel | Segundo nivel | Tercer nivel |
|---|--------|--------------|---------------|--------------|
| Velocidad de desplazamiento (mm/s) | sd | 3.0 | 5.5 | 8.0 |
| Tiempo de muestreo (ms) | st | 5 | 20 | 40 |
| Tamaño de la sonda táctil (diámetro) (mm) | tp | Ø 2,5 | Ø 4 | Ø 6 |
| Fuerza máxima de retorno (Newtons) | mf | 5 N | 8 N | 11 N |

A partir de estas variables, el factorial de diseño es 3^4 con 81 corridas.

Fuente: Elaboración propia.

Los factores considerados fueron:

- Velocidad de desplazamiento.
- Tiempo de muestreo.
- Tamaño de la sonda táctil.
- Fuerza máxima de retorno.

Los niveles de acuerdo a los rangos de ajuste son tres:

- Bajo
- Medio
- Alto

Las variables de respuesta son:

- Las fuerzas F1, F2, F3 y F4 que conforman la histéresis.

Se determinaron factores y niveles (ver cuadro 1), las corridas del diseño se realizaron a través de un diseño factorial general. Para el procesamiento y obtención de datos se utilizó el software estadístico RStudio de libre acceso.

En consecuencia, con el factorial completo, tenemos que realizar 81 corridas. Sin embargo, un D-óptimo de Federov [32]–[35]. Se utilizó el método de selección para obtener un resultado de manera eficiente; aplicando esta función, obtuvimos los siguientes experimentos (ver cuadro 2).

Cuadro 2. Selección D-óptima de Federov

| Número de experimento | Ds (mm/s) | st (ms) | tp (Ø) | mf (N) |
|-----------------------|-----------|---------|--------|--------|
| 1 | 3 | 5 | 2.5 | 5 |
| 8 | 5.5 | 40 | 2.5 | 5 |
| 12 | 8 | 5 | 4 | 5 |
| 22 | 3 | 20 | 6 | 5 |
| 26 | 5.5 | 40 | 6 | 5 |
| 29 | 5.5 | 5 | 2.5 | 8 |
| 34 | 3 | 40 | 2.5 | 8 |
| 41 | 5.5 | 20 | 4 | 8 |
| 42 | 8 | 20 | 4 | 8 |
| 46 | 3 | 5 | 6 | 8 |
| 54 | 8 | 40 | 6 | 8 |
| 60 | 8 | 5 | 2.5 | 11 |
| 70 | 3 | 40 | 4 | 11 |
| 74 | 5.5 | 5 | 6 | 11 |

Velocidad de desplazamiento (ds); tiempo de muestreo (st); Tamaño de la sonda táctil (tp); Fuerza máxima de retorno (mf).

Fuente: Elaboración propia.

6.2. Medición experimental

Una vez definida la matriz experimental, se realizaron las corridas experimentales con el equipo de medición de háptica y la muestra de interruptor seleccionada con el número de parte “30282115”. Las medidas fueron tomadas en el botón de la función “Start Stop”. Se tomaron datos ambientales como temperatura y humedad para identificar alguna condición especial que pudieran afectar en los resultados obtenidos. La variable respuesta se obtuvo de un botón como ya se mencionó anteriormente.

Se realizó una prueba de normalidad para cada conjunto de datos, y los resultados se muestran en el Cuadro 3 con tres pruebas diferentes.

Cuadro 3. Prueba de normalidad

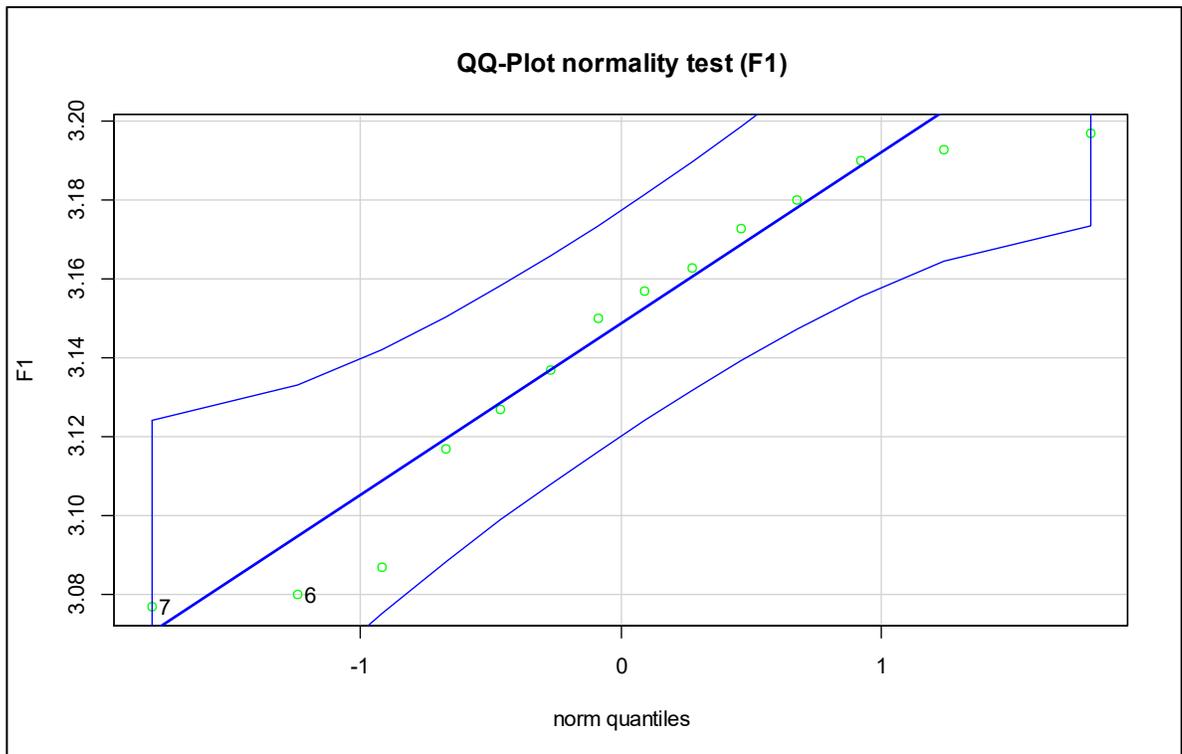
| VARIABLES DE RESPUESTA | Prueba de Shapiro (α) | Anderson-Darling (α) | Kolmogorov-Smirnov (α) |
|------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| F1 | 0.19 | 0.34 | 0.75 |
| F2 | 0.17 | 0.22 | 0.24 |
| F3 | 0.71 | 0.60 | 0.49 |
| F4 | 0.33 | 0.28 | 0.32 |

F1, F2, F3 y F4 son las fuerzas que componen el gráfico de histéresis.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores alfa muestran que los datos son normales y se distribuyen uniformemente obteniendo un valor de $p > 0,05$. Estos conjuntos de datos se pueden utilizar en el siguiente paso para el estudio de regresión lineal múltiple por sus siglas en inglés (MLR). Los gráficos QQ se muestra en las (Figs. 7-10).

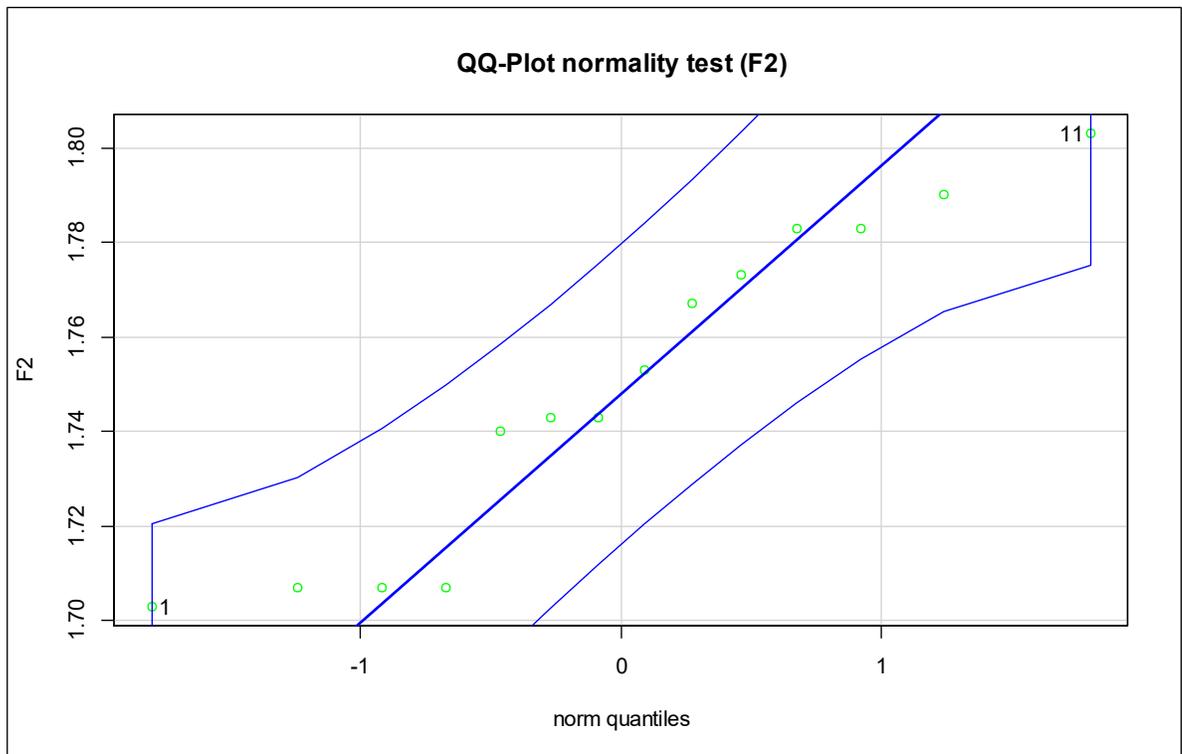
Figura 7. QQ-Plot para prueba normal de F1.



Gráfica de prueba de normalidad de los datos obtenidos en el experimento de la fuerza uno, en donde se muestran que los datos están dentro de los niveles de confianza

Fuente: Elaboración propia.

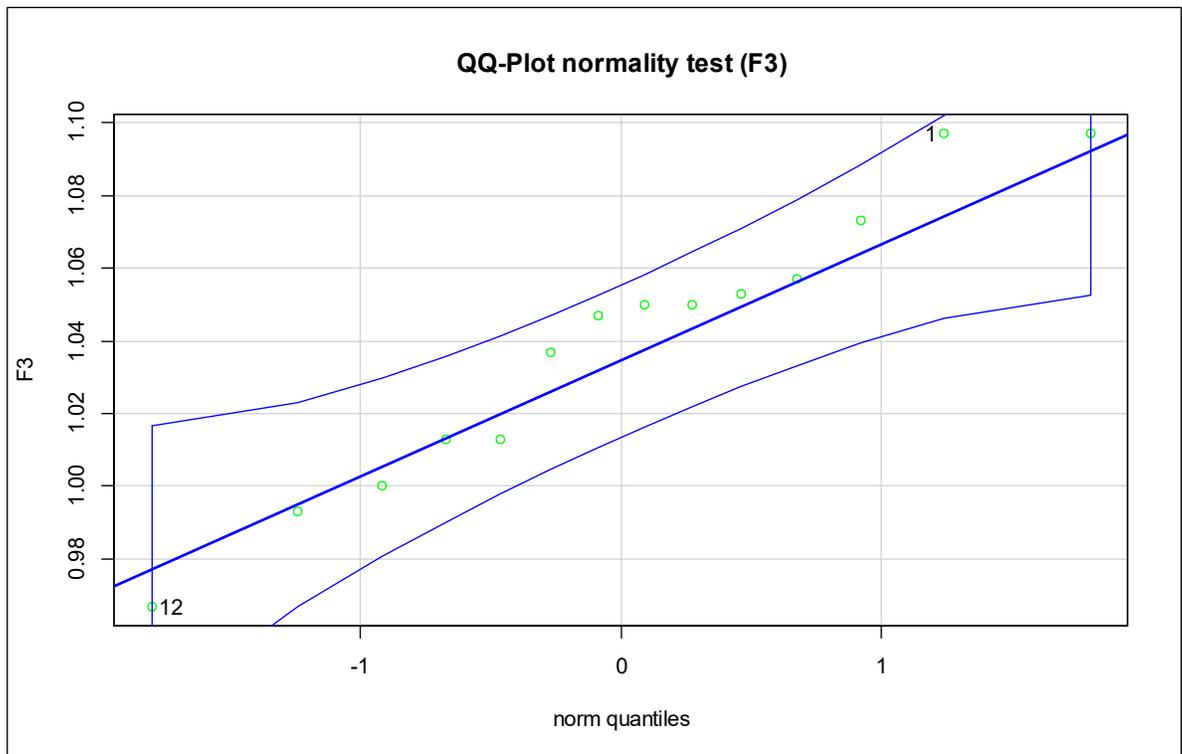
Figura 8. QQ-Plot para prueba normal de F2.



Gráfica de prueba de normalidad de los datos obtenidos en el experimento de la fuerza dos, en donde se muestran que los datos están dentro de los niveles de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

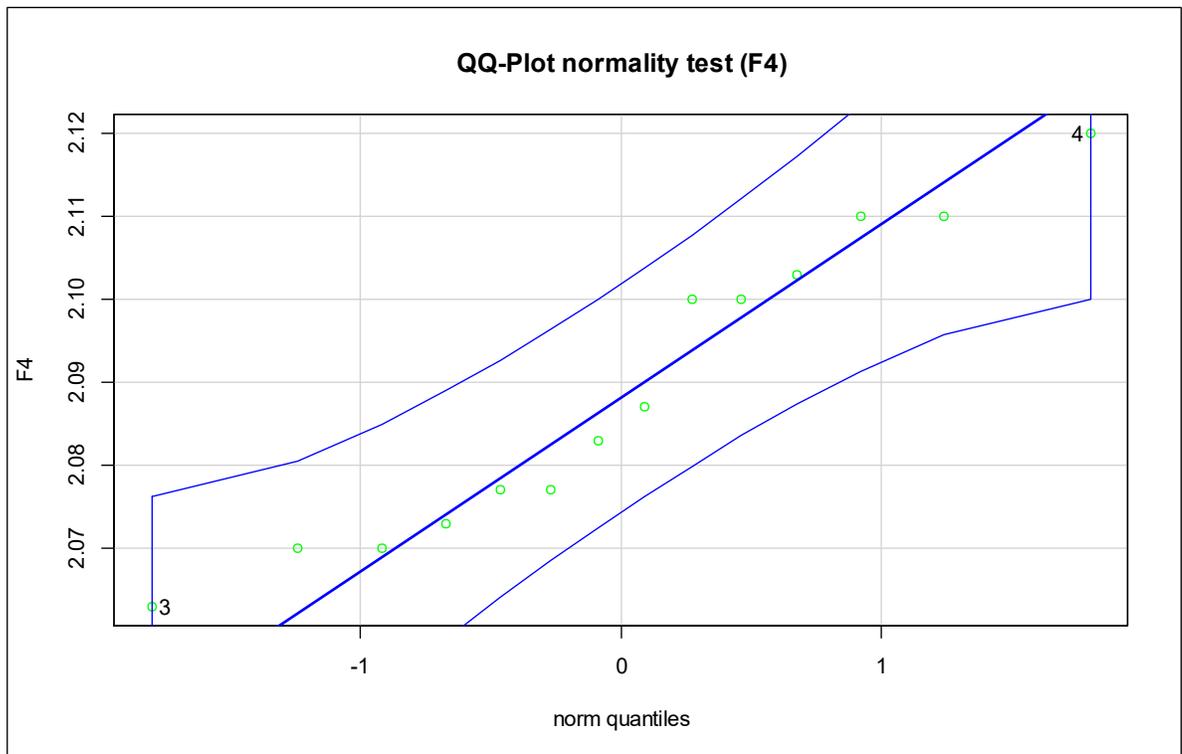
Figura 9. QQ-Plot para prueba normal de F3.



Gráfica de prueba de normalidad de los datos obtenidos en el experimento de la fuerza tres, en donde se muestran que los datos están dentro de los niveles de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. QQ-Plot para prueba normal de F4.



Gráfica de prueba de normalidad de los datos obtenidos en el experimento de la fuerza cuatro, en donde se muestran que los datos están dentro de los niveles de confianza.

Fuente: Elaboración propia.

7. Resultados y discusión

7.1. Análisis de datos

Un resumen de todos los resultados se presenta en el Cuadro 4. Donde se puede demostrar que la variable principal que afecta el valor de histéresis es la velocidad de desplazamiento. El Cuadro 4 muestra que pueden cambiar los valores en F1, F2, F3 y F4 con una significancia consistente. Otras variables como el tiempo de muestreo, tamaño de la sonda táctil y la fuerza máxima también fueron significativas, pero solo contra fuerzas específicas. Se determinaron las variables relevantes para cada una de las magnitudes de fuerza que hacen que la histéresis cambie su caracterización. Estas significaciones se obtuvieron una vez que se determinó el modelo mejor ajustado según las interacciones entre las variables seleccionadas en R^2 con un 74% como mínimo para F4, esta fuerza se describe como máxima fuerza de retorno en la dirección hacia atrás (ver Figura 2).

Cuadro 4. Matriz de significancia de los factores

| Código del factor / R ² | F1 | F2 | F3 | F4 |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ds | *** 0.000328 | *** 1.03e-05 | *** 0.000359 | *** 0.000529 |
| st | n/a | n/a | n/a | n/a |
| tp | *** 8.45e-05 | *** 0.000151 | n/a | ** 0.00261 |
| mf | n/a | n/a | *** 3.86e-05 | n/a |
| R-cuadrada ajustada | 0.86 | 0.89 | 0.95 | 0.91 |
| Valor-p | 0.0001385 | 3.301e-05 | 0.0004491 | 0.002494 |

Códigos de significado: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1. Velocidad de desplazamiento (ds); Tiempo de muestreo (st); Tamaño de la sonda táctil (tp); Fuerza máxima de retorno (mf).

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 5 se muestran las ecuaciones para cada modelo que explican la respuesta a cada variable.

Cuadro 5. Ecuaciones del modelo.

| VARIABLES DE RESPUESTA | Ecuaciones |
|------------------------|--|
| F1 | $F1 = 3.147 + 0.043(ds) - 0.005(ds^2) + 0.047(tp) - 0.008(tp^2)$ |
| F2 | $F2 = 1.752 + 0.047(ds) + 0.001(ds^2) + 0.030(tp) + 0.0007(tp^2)$ |
| F3 | $F3 = 1.031 - 0.033(ds) - 0.002(ds^2) - 0.055(mf) - 0.002(mf^2) + 0.002(ds)(mf) - 0.005(mf)(ds^2) - 0.001(ds)(mf^2) + 0.011(ds^2)(mf^2)$ |
| F4 | $F4 = 2.085 - 0.02(ds) - 0.002(ds^2) + 0.0003(tp) + 0.014(tp^2) - 0.004(ds)(tp) + 0.013(tp)(ds^2) - 0.015(ds)(tp^2)$ |

Velocidad de desplazamiento (ds); Tiempo de muestreo (st); Tamaño de la sonda táctil (tp); Fuerza máxima de retorno (mf).

Fuente: Elaboración propia.

Con este resultado, la velocidad de desplazamiento es el factor esencial para describir la histéresis del gráfico. Sin embargo, la velocidad solo puede ser controlada por la celda de carga donde la principal función es asegurar que el interruptor tenga la háptica correcta cuando el sistema de medición se usa para producción en masa. Otro uso es verificar el gráfico del componente de AS en las fases de diseño y validación como estándares de la industria automotriz.

La velocidad de desplazamiento ha sido mencionada en otra investigación. El problema es que no existe un estándar definido para medir la histéresis en interruptores eléctricos que especifique el valor de velocidad para cada aplicación. Otro trabajo se ha centrado en las pruebas hápticas basado en la experiencia en un grupo de personas, pero el riesgo es tener una sensación diferente de acuerdo a la perspectiva de cada persona. Para esta discrepancia entre un grupo de personas se debe utilizar un sistema de medición automático como la celda de carga, con el fin de evitar una evaluación cualitativa.

No existe ninguna investigación que intente obtener un estándar de velocidad utilizando la percepción de personas ni mucho menos a través de una celda de carga.

El tiempo de muestreo puede afectar la fuerza en tres regiones de la histéresis. Por lo general, este factor no se menciona en otras investigaciones porque puede depender del nivel de programación o software utilizado en la celda de carga.

Es importante mencionar que en el equipo también existe una histéresis principalmente en el sensor de fuerza y el sensor de desplazamiento que como ya se ha mencionado componen la gráfica de histéresis en los interruptores automotrices, sin embargo y de acuerdo a sus especificaciones técnicas de cada elemento se tiene que esta es menor al 0.2% del rango total de operación en el caso del sensor de fuerza y para el sensor de desplazamiento también se considera una histéresis similar. Considerando estos valores el impacto de este conjunto de histéresis no es relevante para el propósito de este estudio.

7.2. Diseño de experimentos óptimo

Los diseños experimentales óptimos (EO) es una clase de plan experimental que selecciona corridas del factorial completo en función de aquellas pruebas que producen el menor error de covarianza debido a los efectos de aberración; cuando existe una función de enlace teórica para la respuesta y sus posibles regresiones. Un beneficio adicional de la teoría de diseños óptimos es la selección de pequeños subconjuntos de un gran experimento factorial completo que aún son útiles para identificar los factores con mayor efecto en la respuesta de interés.

Una ventaja de EO es que las ejecuciones experimentales seleccionadas podrían ser una pequeña fracción del diseño factorial completo, al tiempo que conservan la representatividad de los datos de las condiciones experimentales y su impacto en la respuesta. En nuestro caso, el análisis de residuos reveló normalidad ($p\text{-val} > 0,05$), la regresión fue significativa ($p\text{-val} < 0,05$) y tuvo una buena correlación en R^2 ver Cuadro 4. Resultados que sugieren que el modelo experimental fue un buen ajuste para responder a nuestras preguntas de investigación.

Se realizó una prueba de normalidad para cada modelo en los datos de residuos, los resultados se muestran en el siguiente cuadro con la prueba de Shapiro, ver Cuadro 5.

Cuadro 6. Prueba de normalidad en los residuales del modelo.

| Variable de respuesta del modelo | Prueba de Shapiro (α) |
|----------------------------------|--------------------------------|
| F1 | 0.19 |
| F2 | 0.17 |
| F3 | 0.71 |
| F4 | 0.33 |

F1: Fuerza uno, F2: Fuerza dos, F3: Fuerza tres y F4: Fuerza cuatro (ver Figura 1).

Fuente: Elaboración propia.

Con este resultado, la velocidad de desplazamiento (ds) puede ser el factor esencial para describir la histéresis del gráfico; la velocidad solo puede ser controlada por una celda de carga donde la propuesta principal es asegurar que el botón pulsador tenga la háptica correcta cuando se usa en producción en masa.

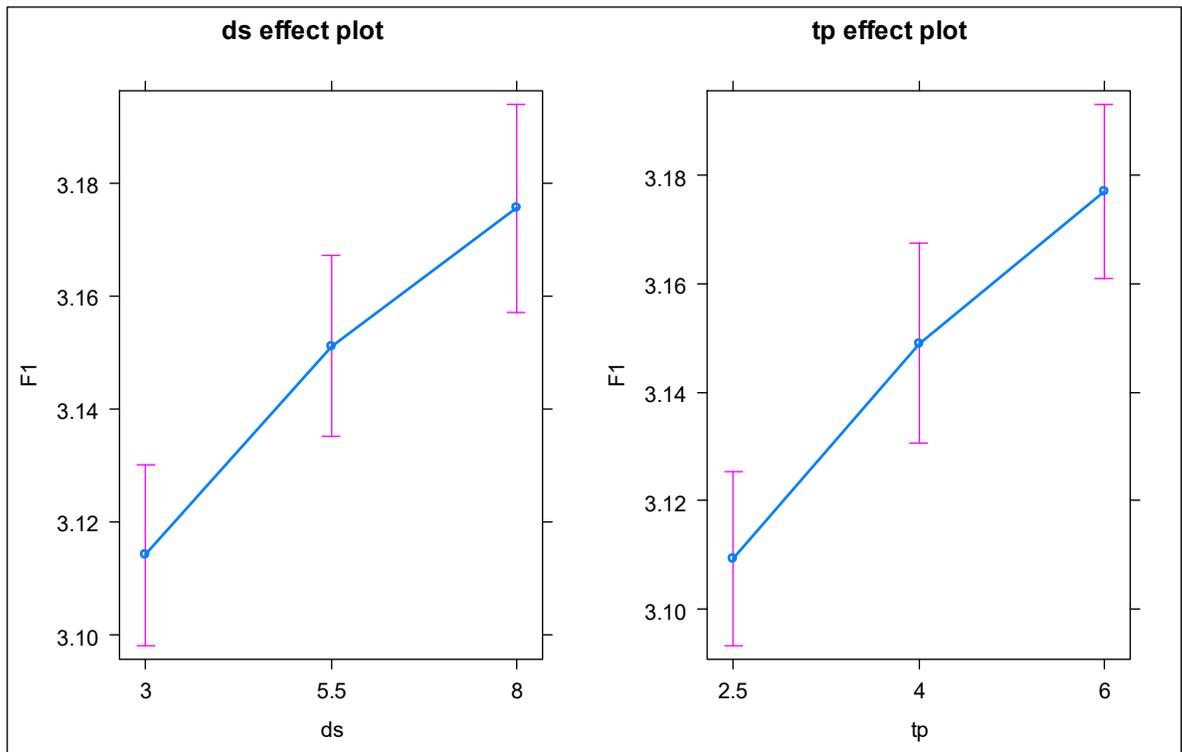
Por lo tanto, nuestros resultados sugieren que es posible medir la háptica de los interruptores no solo usando métodos cualitativos como se hace de forma tradicional, sino usando métodos cuantitativos, como proponemos en esta investigación, mediante prueba automática en una celda de carga.

En esta investigación, el tamaño de la sonda táctil (tp) puede impactar la fuerza en tres regiones de la histéresis (F1, F2 y F4). Por lo general, este factor no se menciona en otras investigaciones porque puede depender del nivel de programación o software utilizado en las celdas de carga.

7.3. Mejora en la parametrización

Es fundamental mencionar que el efecto de cada fuerza en el gráfico de histéresis puede ser diferente según su función y adecuación al SR. Por ejemplo, F1 busca la máxima fuerza para conseguir más contraste respecto a F2 (ver Fórmula 1), al final es conseguir una mejor sensación en la háptica. En la Figura 11 se muestra el gráfico de interacción para velocidad de desplazamiento y el tamaño de la sonda táctil con respecto a F1(ds y tp), extraído del modelo DoE (ver Cuadro 3), demuestra que es posible aumentar o reducir F1 solo cambiando estos parámetros y obtener un resultado en F1 de hasta 3.18 N aproximadamente.

Figura 11. Interacción de ds y tp para la fuerza de F1, gráfica de RStudio



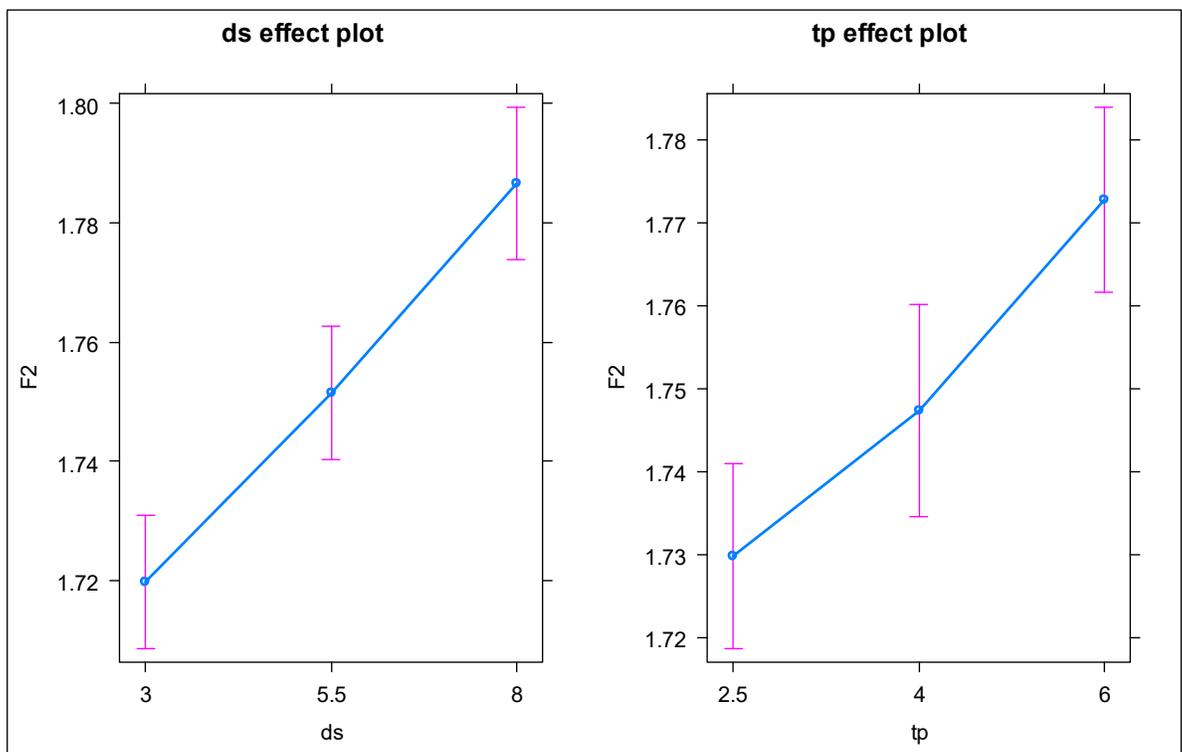
Fuente: Elaboración propia.

Empíricamente, sabemos que es mejor obtener una fuerza F1 más alta, siempre que esté dentro de la especificación técnica. El factor "mf" denominado fuerza máxima de retorno no afectó el resultado de F1, así como tampoco la variable del tiempo de muestreo (mf y st). Se

sabe que activar repetidamente la AS antes de realizar cualquier medición puede ayudar a liberar el estrés que queda en la cúpula de goma de la AS en el momento de su fabricación. Esta preactivación puede ayudar a obtener la fuerza máxima en F1 cuando se mide. Desafortunadamente, los autores no mencionan esta característica particular en la AS.

Al mismo tiempo, en F2 se busca minimizar la fuerza ya que su relación esta con el SR y la retroalimentación agradable del botón al oprimirlo. La figura 12 muestra la interacción entre la velocidad de desplazamiento y el tamaño de la sonda táctil con respecto a la fuerza de F2 (ds y tp). En este caso el tiempo de muestreo y la fuerza máxima de retorno (st y mf) no afectan a F2.

Figura 12. Interacción de ds y tp para la fuerza de F2, gráfica de RStudio

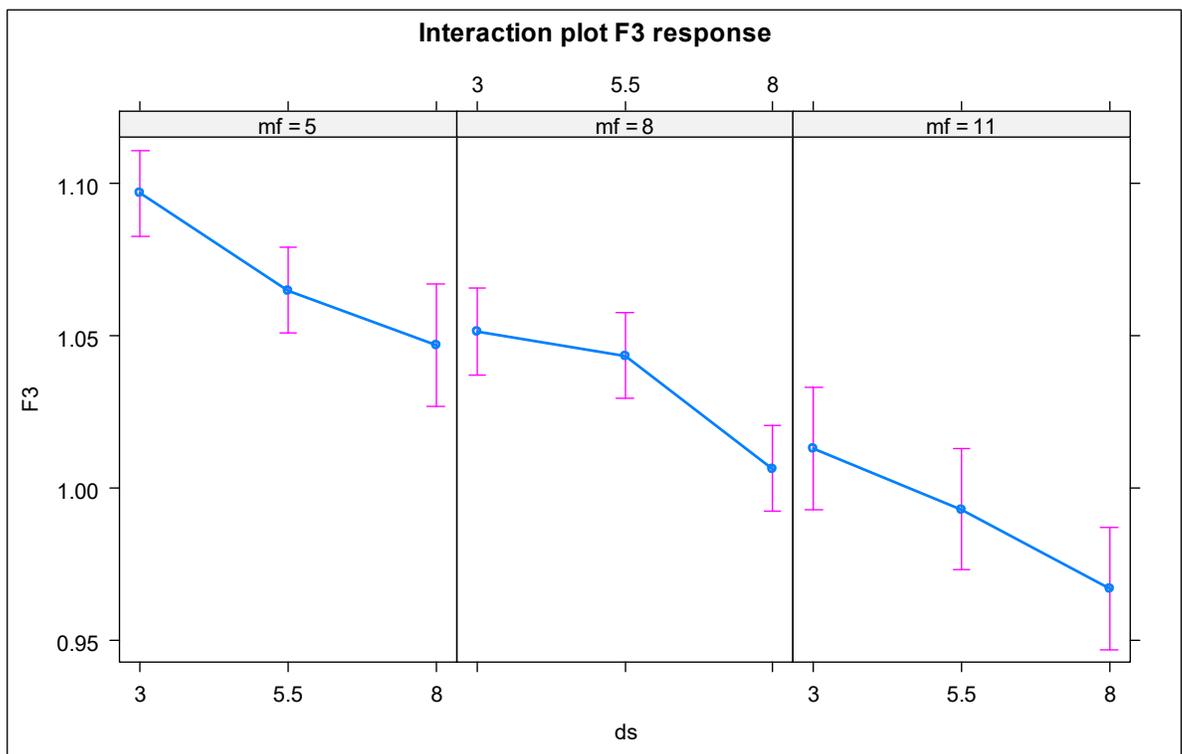


Fuente: Elaboración propia.

F1 y F2 son los valores de fuerza más críticos porque es donde el usuario percibe el mayor porcentaje de la sensación, principalmente la retroalimentación mecánica que da el interruptor cuando se presiona. A su vez, F2 es la fuerza más difícil de percibir ya que tratamos de percibir el valor mínimo de fuerza en este caso. Según los fabricantes de la AS, la relación entre F1 y F2 debería ser del 50 %.

La Figura 13 muestra la interacción entre la velocidad de desplazamiento y la fuerza máxima de retorno, factores significativos para F3 según el Cuadro 4. F3 se ve afectado principalmente por la velocidad de desplazamiento y la fuerza máxima de retorno. Lo que se busca en F3 es obtener un valor alto para garantizar la apertura del contacto eléctrico realizado a través de la pastilla conductiva de la AS.

Figura 13. Interacción de *ds* y *mf* para la fuerza de F3, gráfica de RStudio

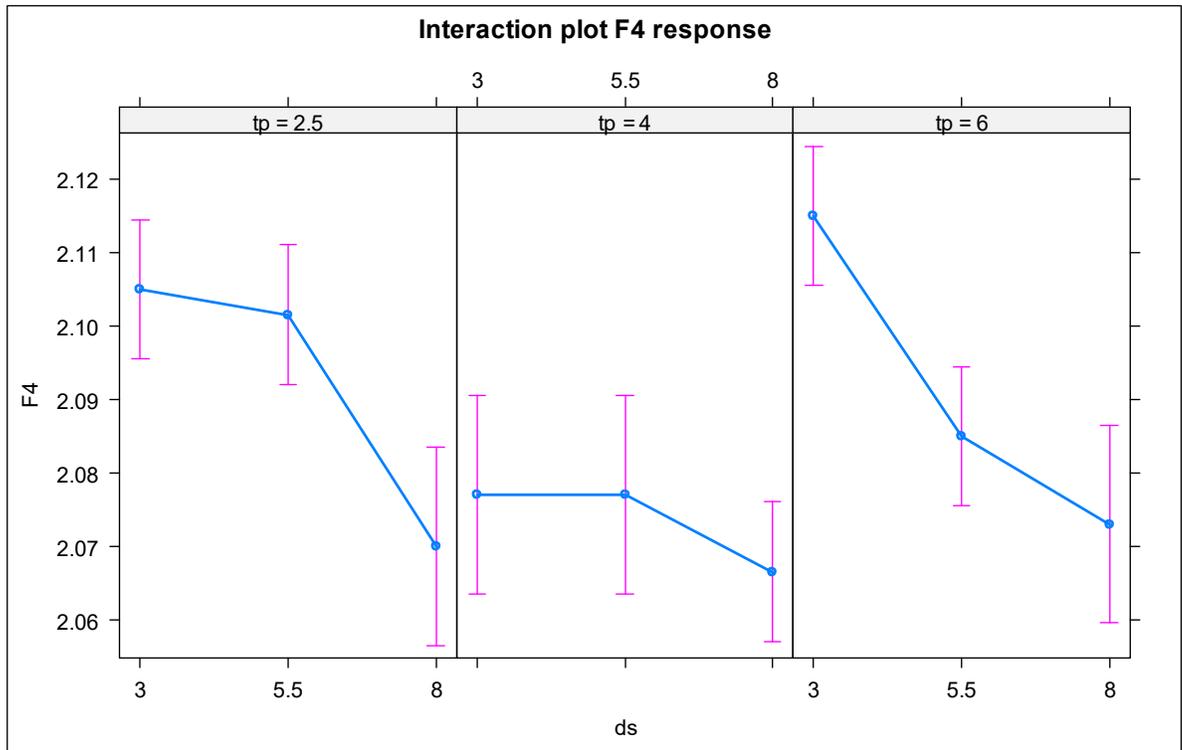


Fuente: Elaboración propia.

En F2 y F3, está la función eléctrica del botón para cerrar y abrir el contacto eléctrico. Ambos son casi imperceptibles para el humano ya que se trata de una fuerza mínima. Sin embargo, en el caso específico de F3, sólo se puede decir que su importancia consiste en asegurar que el contacto se encuentre abierto ya que está relacionado también con la posición por su desplazamiento (ver Figura 2).

La Figura 14 muestra la interacción entre la velocidad de desplazamiento y el tamaño de la sonda táctil, factores significativos para F4 según la Cuadro 4. F4 se ve afectado por ambas variables velocidad de desplazamiento y el tamaño de la sonda táctil. Lo que se busca en F4 es obtener un valor alto para garantizar el retorno de la superficie del botón a su posición original a través de la inercia del mecanismo. Los valores sugeridos basados en la gráfica de interacción para el programa de celda de carga son de acuerdo al Cuadro 7.

Figura 14. Interacción de ds y tp para la fuerza de F4, gráfica de RStudio



Fuente: Elaboración propia.

En resumen, el Cuadro 7 muestra los parámetros sugeridos para la medición de la histéresis en una celda de carga. Es posible modificar el avance y el retroceso que componen la histéresis para obtener resultados que se pueden utilizar en la evaluación del gráfico. El retroceso debe describir la misma forma que el avance, pero con una compensación diferente, normalmente menor en los valores de fuerza, ya que el desplazamiento será siempre el mismo (ver Figura 2).

Cuadro 7. Parámetros sugeridos

| Código del factor | F1 | F2 | F3 | F4 |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|
| ds (mm/s) | 8.0 | 8.0 | 3.0 | 3.0 |
| st (milisegundos) | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Ø tp (milímetros) | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 |
| mf (Newtons) | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |

Velocidad de desplazamiento (ds); Tiempo de muestreo (st); Diámetro de la sonda táctil (tp); Fuerza máxima de retorno (mf). F1 y F2 (velocidad de desplazamiento en el avance); F3 and F4 (velocidad de desplazamiento en el retroceso).

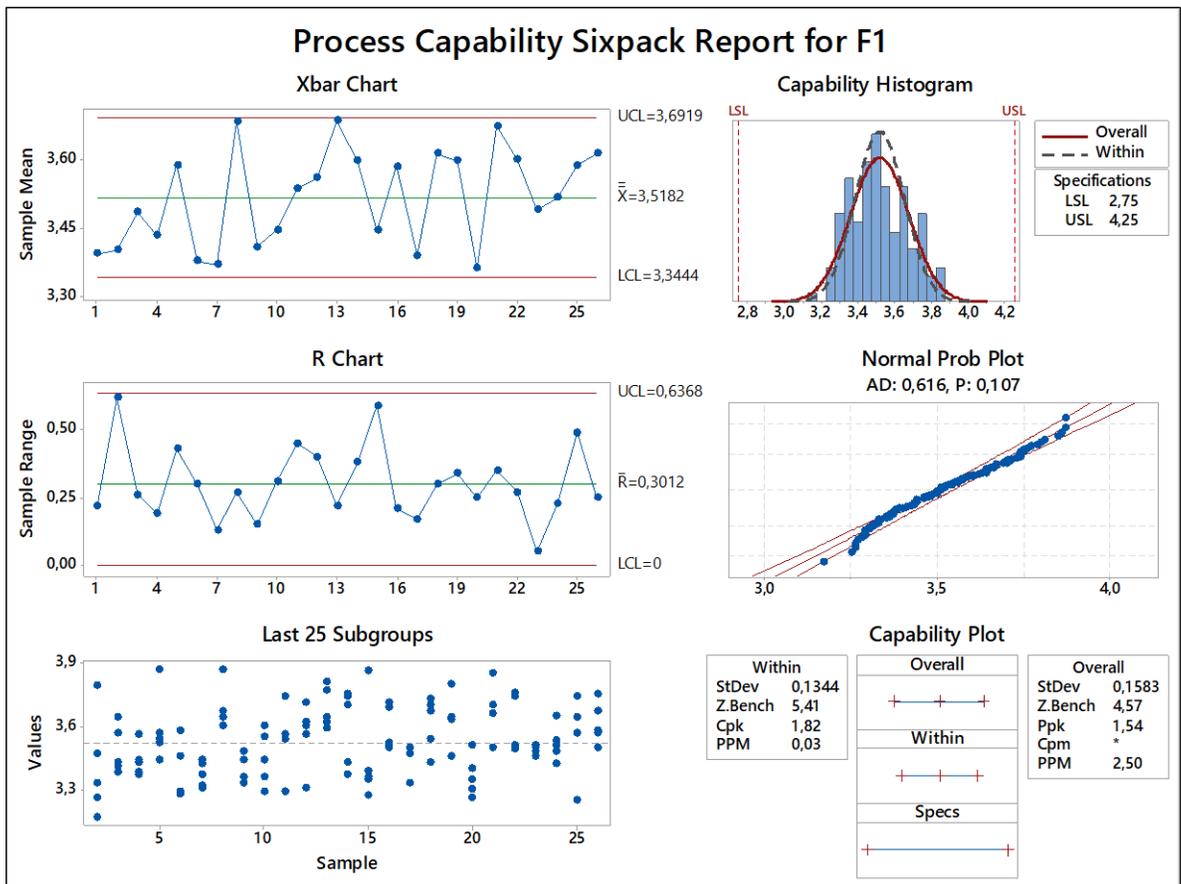
Fuente: Elaboración propia.

Si bien la velocidad es un factor que ha sido comentado en algunos trabajos, puede parecer que, según los resultados, puede tener un efecto diferente sobre el avance y el retroceso. Por ejemplo, en el Cuadro 7, para el avance (F1 y F2), se sugiere tener una velocidad alta; sin embargo, para el retroceso (F3 y F4), se sugiere tener una menor velocidad para leer mejor las magnitudes que, según el gráfico de histéresis, siempre serán con menor fuerza. Este fenómeno también se percibe cuando los usuarios presionan un interruptor de botón, ya que en el retroceso es donde una persona no presta atención.

7.4. Control de variables a través de un estudio de capacidad

Después de los parámetros definidos, se realizó un estudio de capacidad para verificar la capacidad de proceso de las mediciones en cada fuerza del gráfico de histéresis. Por ejemplo, en la Figuras 15-18 se muestra la prueba basada en la capacidad sigma del punto de referencia Z donde $Z_{bench} \geq 5$ para fuerzas F1, F2, F3 y F4. Por lo tanto, puede mostrar suficiente habilidad en las mediciones de fuerza.

Figura 15. Estudio de capacidad para F1



Estudio de capacidad de proceso después de la mejora en los parámetros para la fuerza uno.

Fuente: Elaboración propia.

8. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio podemos concluir con algunos puntos importantes:

1. Se determinó que existe significancia en las variables de la celda de carga que afectan a la caracterización de la gráfica de histéresis. La significancia esta principalmente en la variable de velocidad de desplazamiento, sin embargo, también hay significancia en las variables del tamaño de la sonda táctil y la fuerza máxima de retorno. La variable de velocidad de desplazamiento no sorprende en el estudio, a pesar de ello, hemos comprobado que la velocidad no solo impacta en F1 y F2 como ya es conocido si no también y de manera lógica en F3 y F4.
2. El tamaño de la sonda táctil, sorprende y puede explicar porque la percepción háptica basada en la experiencia de los usuarios se percibe y se describe diferente, por lo que podemos concluir que esto puede ser debido al tamaño de los dedos de los usuarios, en el sistema de celda de carga el sensor de fuerza obtiene la fuerza de manera diferente según el tamaño de la sonda táctil.
3. Por último, tenemos la variable de la fuerza máxima de retorno, lógicamente sabemos que esta puede hacer que la almohadilla de silicona se comprima más o menos en proporción con la fuerza aplicada. La aplicación de esta variable también dependerá de la calidad del material con la que es fabricada la almohadilla de silicona.
4. Como se vio en la experimentación se utilizó un diseño óptimo con la finalidad de hacer esta actividad eficiente en el tiempo y costo por la aplicación del diseño de experimentos, además de utilizar una herramienta estadísticamente robusta. Para los datos utilizados en este estudio se realizaron pruebas de normalidad para determinar la confiabilidad de los mismos.

5. La parametrización de la celda de carga se realizó en base a los datos obtenidos de la significancia y sus efectos sobre las fuerzas de F1 a F4. En base a este estudio podemos determinar que la velocidad es inversamente proporcional a la fuerza de F1 y también sobre el resto de las fuerzas, pero en una proporción más atenuada con respecto a F1. Este conocimiento desarrollado servirá para la parametrización en otras celdas de carga con el mismo principio de ingeniería. Así mismo con el resto de las variables que también fueron significativas en el estudio.
6. No se observó alguna relevancia en los resultados de los datos que pudiera ser atribuible a las condiciones de ruido como la temperatura o la vibración, no obstante, se podría hacer una ampliación del mismo bajo condiciones conocidas de temperatura, vibración, etc.
7. Se determinó mediante un estudio de capacidad la repetibilidad de los resultados con los parámetros propuestos.
8. Con estos resultados se puede desarrollar estándares para evaluar botones automotrices para el resto de las celdas de carga utilizadas en la empresa y también se podrá definir las características principales para la construcción de nuevos equipos de medición. Con lo que se podrá obtener un beneficio económico en la reducción de los errores tipo uno y tipo dos durante la inspección a través de la celda de carga.

Otro tema de estudio es determinar la velocidad óptima para el uso de los interruptores automotrices basado en un grupo amplio de personas, con ello, se podría determinar una especificación universal para los fabricantes de interruptores y un estándar para determinar si la calidad de los mismos es la adecuada para un usuario estándar incluidos hombres y mujeres.

9. Consideraciones éticas de seguridad e higiene

9.1. Equipo de protección antiestática para el personal.

Conforme a la norma ANSI/ESD S20.20 toda persona que ingrese dentro empresa Bitron de México, S.A. de C.V. deberá portar el uso de protección antiestática. Este consta de taloneras, bata y zapatos antiestáticos. Además, en caso de que la persona cuente con cabello largo deberá sujetarse el cabello con la finalidad de evitar generar carga electrostática. El personal y/o visitantes antes de ingresar al área de manufactura deberá asegurar que su equipo personal se encuentre correctamente aterrizado a tierra mediante los equipos de control de aterrizaje. Este control se encuentra colocado antes de ingresar al área de manufactura.

9.2. Medidas de higiene para personal ante la contingencia sanitaria por COVID-19.

Bitron de México, S.A. de C.V. ante la contingencia sanitaria ha seguido la normativa expuesta por el gobierno de México (Secretaría de salud del gobierno de México, 2020) y todo el personal que ingrese a la empresa deberá portar: cubrebocas quirúrgico triple capa o KN95, protección ocular (careta) y gel antibacterial de uso personal.

Toda persona que desee ingresar a las instalaciones de la empresa deberá pasar por el filtro sanitario. En este filtro se verifica que la temperatura corporal sea menor a 37.5 °C, así mismo se realiza una supervisión sobre el uso adecuado del equipo de protección personal. En caso de que se detecte alguna persona con síntomas de COVID-19 se evaluará por el personal médico de la empresa. Personal externo a la empresa antes de su ingreso deberá someterse a una prueba rápida de antígenos para detectar si existe contagio por el virus.

9.3. Normas de seguridad e higiene para el uso de laboratorio e instrumentos de medición.

El personal que ingrese a las instalaciones del laboratorio deberá portar su equipo de seguridad personal expuesto anteriormente en el apartado de “Protección antiestática para el personal operativo, administrativo y visitantes” y en las “Consideraciones de higiene del personal operativo, administrativo y visitantes ante la contingencia sanitaria por COVID-19”. Para evitar cualquier daño que se pueda suscitar al manipular el instrumento de medición “celda de carga” o provocar daños en él, se deberán tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Solo el personal que tenga conocimientos sobre las características del equipo, principio de operación y condiciones en las que se usa podrá manipular los instrumentos de medición.
2. Se deberá seguir el procedimiento de uso del equipo descrito en el instructivo interno.
3. Antes de realizar cualquier medición se debe asegurar que la fuerza máxima de protección de la celda esta activa, esta no deberá ser mayor 10 Newtons.

9.4. Disposición de material no conforme

El material que sea utilizado en el experimento se dispondrá como material no conforme. Este material se desmontará para obtener las partes que integran el producto. Una vez terminado este proceso se capturará el número total de las partes en el sistema ERP (Enterprise Resource Planning, por sus siglas en inglés) y se transferirá al almacén de cuarentena. Posteriormente se dispondrá como SCRAP una vez que el scrap haya sido aprobado para su desecho por el personal competente.

9.5. Consideraciones éticas de la privacidad de los datos, confidencialidad y manejo de la información.

Conforme a lo establecido en la “Ley Federal De Protección De Datos Personales En Posesión De Los Particulares”. La cual establece que la información proporcionada por las partes involucradas, en este caso en particular se refiere a la empresa Bitron de México S.A de C.V. y el investigador (Ing. Sergio Serrano Ayala) deberá ser tratada de manera confidencial. Dentro de esta ley se encuentran protegidos los datos personales, documentos e información, así como, la transparencia, tratamiento y transferencia de los datos.

Esta misma ley estipula que los datos personales es toda aquella información que concierne a una persona física identificable. Además, establece que un documento puede referirse a los expedientes, reportes, estudios, actas, resoluciones, oficios, correspondencia, acuerdos, directivas, directrices, circulares, contratos, convenios, instructivos, notas, memorandos, estadísticas o cualquier otro registro que represente el ejercicio de las facultades o la actividad de los sujetos obligados. Estos podrán estar plasmados en cualquier medio ya sea escrito, impreso, sonoro, visual, electrónico, informático u holográfico.

Esta declaración de privacidad y confidencialidad descrita constituye un acuerdo válido entre las partes involucradas, el cual confirma el conocimiento, entendimiento y aceptación de lo expuesto con los fines expresados. Por este motivo, queda establecido que las partes involucradas guardaran estricta confidencialidad respecto a la información que se proporcione para el desarrollo de esta tesis. Es importante mencionar que para obtener el acceso a la información confidencial el Ing. Sergio Serrano Ayala con numero de empleado 3 requerirá obtener el consentimiento de la empresa Bitron de México, S.A. de C.V. En caso de no contar con la aprobación del representante legal de la empresa, el Ing. Sergio Serrano Ayala no deberá proporcionar ninguna información personal, ni utilizar cualquier información relacionada. De esta forma el Ing. Sergio Serrano Ayala se compromete a cumplir con los estándares de seguridad y confidencialidad necesarios para asegurar la confiabilidad, integridad y disponibilidad de la información recopilada de la empresa Bitron de México, S.A. de C.V.

En cuanto al manejo de los datos, el Ing. Sergio Serrano Ayala se compromete a tratar únicamente aquellos datos con los que se cuente la autorización del responsable de legal de Bitron de México, S.A. de C.V., además de abstenerse a tratar los datos con finalidades distintas a lo convenido por ambas partes. Para esclarecer dicha declaración es necesario realizar una carta de confidencialidad entre ambas partes.

9.6. Consideraciones éticas de propiedad Intelectual

La propiedad intelectual se refiere al derecho de propiedad asociado a cualquier creación de la mente humana la cual protege a los derechos de autor (a). Sé estable que las obras intelectuales que resulten de las acciones relacionadas, serán propiedad de la parte que las haya producido, si estas se derivan de un trabajo conjunto, ambas partes serán titulares de los derechos. Así mismo las partes reconocerán a los investigadores su derecho de figurar como autores en todos aquellos documentos que legalmente les corresponda.

10.Referencias bibliográficas

- Alexander, J., Hardy, J., & Wattam, S. (2014). Characterising the physicality of everyday buttons. *ITS 2014 - Proceedings of the 2014 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, 205–208. <https://doi.org/10.1145/2669485.2669519>
- Almefelt, L., Berglund, F., Nilsson, P., & Malmqvist, J. (2006). Requirements management in practice: Findings from an empirical study in the automotive industry. *Research in Engineering Design*, 17(3), 113–134. <https://doi.org/10.1007/s00163-006-0023-5>
- Bee Wah, Y., & Mohd Razali, N. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(November), 21–33.
- BIPM. (2008). JCGM 200 : 2008 International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) Vocabulaire international de métrologie — Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM). *International Organization for Standardization Geneva ISBN*, 3(Vim), 104.
- Canadas, N., Machado, J., Meireles, J., Delgado, P., & Portinha, A. (2017). Development of an automatic system for the measurement of force and stroke parameters of car radio keypads. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 100, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.044>
- Carreira, R., Patrício, L., Jorge, R. N., & Magee, C. L. (2013). Development of an extended Kansei engineering method to incorporate experience requirements in product-service system design. *Journal of Engineering Design*, 24(10), 738–764. <https://doi.org/10.1080/09544828.2013.834038>
- Cholewiak, S. A., Tan, H. Z., & Ebert, D. S. (2008). Haptic identification of stiffness and

- force magnitude. *Symposium on Haptics Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 2008 - Proceedings, Haptics*, 87–91. <https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2008.4479918>
- Colton, M. B., & Hollerbach, J. M. (2007). Reality-based haptic force models of buttons and switches. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, April*, 497–502. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2007.363835>
- Decker, E. L., Ziemkiewicz, D. J., & Ross, J. R. (1999). Concept to production: Continuous surface keypad switch. *SAE Technical Papers*, 724. <https://doi.org/10.4271/1999-01-0413>
- Doerr, C., & Werthschuetzky, R. (2002). Simulating Push-Buttons Using a Haptic Display: Requirements on Force Resolution and Force-Displacement Curve. *Proceedings of EuroHaptics, November*.
- Enigk, H., Foehl, U., & Wagner, V. (2008). Haptics research at Daimler AG. *Human Haptic Perception: Basics and Applications*, 453–458. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7612-3_37
- Gaspar, J., Fontul, M., Henriques, E., & Silva, A. (2014). User satisfaction modeling framework for automotive audio interfaces. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(5), 662–674. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2014.07.009>
- Gaspar, J., Fontul, M., Henriques, E., & Silva, A. (2017). Haptics of in-car radio buttons and its relationship with engineering parameters. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 59, 29–45. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2017.03.005>
- Gaspar, J., Fontul, M., Henriques, E., & Silva, A. (2019). Push button design requirements and relations to button architecture elements. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 70(October 2018), 92–106. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.01.001>
- Guide, D. S. (n.d.). *Silicone Keypads Design Guide for Construction of Keypads and*

Housings with Contact Pills and Metal Domes Design Parameters for Silicone Keypads.

- Gutiérrez, H., & Salazar, R. (2008). Elementos de inferencia estadística: experimentos con uno y dos tratamientos. In *Análisis y Diseño de Experimentos*.
- Kis, P., Kuczmann, M., Fűzi, J., & Iványi, A. (2004). Hysteresis measurement in LabView. *Physica B: Condensed Matter*, 343(1–4), 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2003.08.069>
- Kwon, H. C., Cho, C. H., Nam, C. W., Chae, S. W., Seo, S. Y., & Kim, K. H. (2018). Reducing car audio button noise while maintaining tactile quality. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.1177/1687814017752596>
- Lee, D. L., Kuo, P. L., Jindrich, D. L., & Dennerlein, J. T. (2009). Computer keyswitch force-displacement characteristics affect muscle activity patterns during index finger tapping. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(5), 810–820. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2008.03.011>
- Mechanisms, P. S. (2009). *Tutorial review haptic perception : a tutorial*. 71(7), 1439–1459. <https://doi.org/10.3758/APP>
- Mishra, P., Pandey, C. M., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., & Keshri, A. (2019). Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(1), 67–72. https://doi.org/10.4103/aca.ACA_157_18
- Morris, K. A. (2011). What is hysteresis? *Applied Mechanics Reviews*, 64(5), 1–14. <https://doi.org/10.1115/1.4007112>
- Nagurka, M., & Marklin, R. (2005). Measurement of stiffness and damping characteristics of computer keyboard keys. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 127(2), 283–288. <https://doi.org/10.1115/1.1902823>
- Nagurka, M., Marklin, R., & Liu, K. (1999). *Design of a Test Rig for Measurement of Stiffness and. June*, 1749–1753.

- Oulasvirta, A., Kim, S., & Lee, B. (2018). Neuromechanics of a button press. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings, 2018-April*, 1–13. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174082>
- Pérez Ariza, V. Z., & Santís-Chaves, M. (2016). Haptic Interfaces: Kinesthetic Vs. Tactile Systems. *Revista EIA*, 13(26), 13–29.
- Radwin, R. G., & Jeng, O. J. (1997). Activation force and travel effects on overexertion in repetitive key tapping. *Human Factors*, 39(1), 130–140. <https://doi.org/10.1518/001872097778940605>
- Radwin, R. G., & Ruffalo, B. A. (1999). Computer key switch force-displacement characteristics and short-term effects on localized fatigue. *Ergonomics*, 42(1), 160–170. <https://doi.org/10.1080/001401399185865>
- Schütte, S., & Eklund, J. (2005). Design of rocker switches for work-vehicles - An application of Kansei Engineering. *Applied Ergonomics*, 36(5), 557–567. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2005.02.002>
- Tanco, M., Viles, E., Ilzarbe, L., & Álvarez, M. J. (2007). Manufacturing industries need Design of Experiments (DoE). *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2166(1), 1108–1112.
- Tanco Rainusso, P. M. (2008). *Metodología para la aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) en la industria*.
- Valverde, N., Ribeiro, A. M. R., Henriques, E., & Fontul, M. (2019). An engineering perspective on the quality of the automotive push-buttons' haptic feedback in optimal and suboptimal interactions. *Journal of Engineering Design*, 30(8–9), 336–367. <https://doi.org/10.1080/09544828.2019.1656802>
- Vieira, J., Osório, J. M. A., Mouta, S., Delgado, P., Portinha, A., Meireles, J. F., & Santos, J. A. (2017). Kansei engineering as a tool for the design of in-vehicle rubber keypads.

Applied Ergonomics, 61, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.12.019>

- Weir, D. W., Peshkin, M., Colgate, J. E., Buttolo, P., Rankin, J., & Johnston, M. (2004). The haptic profile: Capturing the feel of switches. *Proceedings - 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS*, 186–193. <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2004.1287195>
- Wellings, T., Williams, M., & Tennant, C. (2010). Understanding customers' holistic perception of switches in automotive human-machine interfaces. *Applied Ergonomics*, 41(1), 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.03.004>
- Wu, C. M., & Smith, S. (2015). A haptic keypad design with a novel interactive haptic feedback method. *Journal of Engineering Design*, 26(4–6), 169–186. <https://doi.org/10.1080/09544828.2015.1030372>