



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

TESIS

**Disminución de la variabilidad de resistencia eléctrica
por contacto entre adaptadores de prueba y arneses eléctricos
mediante un diseño de experimentos**

Que para obtener el grado de:
Maestro en Planeación Estratégica e Innovación

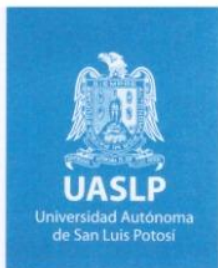
Presenta:
Ing. Salvador Delgado Esmeralda

Asesor:
Dr. Héctor Méndez Azúa

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2025





17 de julio de 2025

**ING. SALVADOR DELGADO ESMERALDA
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Héctor Méndez Azúa**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Planeación Estratégica e Innovación**, me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 17 de julio del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Disminución de la variabilidad de resistencia eléctrica por contacto entre adaptadores de prueba y arneses eléctricos mediante un diseño de experimentos"

Introducción.

1. Proceso de fabricación y pruebas de arneses de alto voltaje para automóviles eléctricos.
2. Estudio de los factores que intervienen en la variación de resistencia en adaptadores utilizados para pruebas de arneses de alto voltaje.
3. Análisis de resultados.

Conclusiones.

Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

Ccp. Archivo
-bvlg

"1945-2025: 80 años formando profesionales de la Ingeniería en beneficio de la sociedad"

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

Disminución de la variabilidad de resistencia eléctrica por contacto entre adaptadores de prueba y arneses eléctricos mediante un diseño de experimentos

se realizó en el periodo agosto de 2022 a diciembre de 2024 bajo la dirección del Dr. Dr. Héctor Méndez Azúa.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Ing. Salvador Delgado Esmeralda

Resumen

En este trabajo de tesis se busca identificar las causas de variaciones de resistencia eléctrica que se presentan durante la prueba de resistencia entre el adaptador de prueba y los arneses de alto voltaje utilizados en vehículos eléctricos. Con esta tesis se desarrolló una técnica para ajustar las variables causantes del problema con la finalidad de asegurar mediciones fiables y poder, con esta técnica, cumplir los requerimientos de los clientes. La metodología desarrollada consistió en 3 etapas: un diagnóstico del sistema para identificar las principales causas de la variación de la resistencia eléctrica aplicando la metodología del control estadístico del proceso. En la segunda etapa se diseñó y se desarrolló un prototipo para poder ajustar los factores identificados en la primer etapa. Con el prototipo desarrollado, se logró la aproximación del prototipo a las condiciones ideales para obtener la respuesta deseada, usando para su comprobación la técnica estadística de diseño de experimentos y validando los resultados por medio de un análisis de regresión por coeficientes codificados. En la última etapa, con los resultados positivos, se logró una estandarización de procesos generando una instrucción de trabajo que permite a los operarios a configurar correctamente las variables, asegurando calidad y precisión del producto final.

Palabras clave: *Variación de resistencia eléctrica, Repetibilidad, Diseño de Experimentos, Arneses Eléctricos, Aseguramiento de la Calidad.*

Abstract

This work is aimed at solving a non-repeatability problem in measurements, specifically by identifying the causes of the electrical resistance variations observed during the resistance measurement between the test adapter and high-voltage harness used in electric vehicles. The goal is to develop a technique that allows adjusting the variables causing the issue to ensure reliable measurements and, with this technique, meet customer requirements. The methodology used consisted of three stages: a system diagnosis to identify the main causes of electrical resistance variation, applying the methodology of statistical process control. In the second stage, a prototype was designed and developed to adjust the factors identified in the first stage. With the developed prototype, the conditions were approximated to the ideal ones to achieve the desired response, using the statistical technique of Design of Experiments (DOE) and validating the results through regression analysis with coded coefficients. In the final stage, with positive results, process standardization was achieved by generating a work instruction that enables operators to correctly configure the variables, ensuring the quality and precision of the final product.

Keywords: *Electrical resistance variation, Repeatability, Design of Experiments, Electrical Harnesses, Quality Assurance.*

Dedicatoria

Al universo, por permitirme seguir aprendiendo y verme en su reflejo, por mostrarme la valentía de fluir y el valor de respetar. A mis padres Juana y Salvador, a mi compañera de camino, Sonia y a mis seres queridos, por brindarme la comprensión, el apoyo y el equilibrio necesarios para la realización de este trabajo académico, mostrándome el valor del mismo. Al gato Lucas por ser mi compañero de desvelos y enseñarme la paciencia.

AGRADECIMIENTOS

A mis compañeros de trabajo, por su colaboración y apoyo en la realización de esta tesis. A la invaluable guía y orden de mi asesor, el Dr. Héctor Méndez Azúa. Al trabajo y dedicación de los sinodales cuyos comentarios y observaciones permitieron ampliar la investigación. A mi resiliencia y objetividad para mantenerme enfocado. A la Facultad de Ingeniería de la UASLP, por ser una universidad que provee las herramientas necesarias para el desarrollo de sus alumnos.

Contenido

Introducción.....	1
1 Capítulo 1. Procesos de fabricación y prueba de arneses de alto voltaje para automóviles eléctricos	3
1.1 Importancia de los arneses eléctricos para automóviles eléctricos e híbridos	3
1.2 Problemática de la variación de resistencia en la prueba de arneses eléctricos	8
1.3 Justificación	16
1.4 Objetivos	17
1.4.1 Objetivo General	18
1.4.2 Objetivos específicos.....	18
1.5 Hipótesis.....	18
1.6 Marco teórico	19
1.6.1 Marco metodológico: técnicas para la medición de resistencia	19
1.7 Alcance	28
2 Capítulo 2. Estudio de los factores que intervienen en la variación de resistencia en adaptadores utilizados para pruebas de arneses de alto voltaje.	29
2.1 Planteamiento metodológico.....	29
2.2 Desarrollo del modelo para el análisis de variaciones en componentes automotrices (MAV)	30
2.2.1 Desarrollo de la propuesta metodológica	31
2.3 Definición de Indicadores	36
3 Capítulo 3. Análisis de resultados.....	43
3.1 Presentación del caso de estudio	43
3.1.1 Prueba de resistencia eléctrica en un adaptador de prueba	43
3.2 Etapa 1: Diagnóstico del sistema	48
3.2.1 Identificación de las causas de la variación en la variable estudiada	51
3.2.2 Evaluación de los factores que intervienen en variación de la variable	54
3.3 Etapa 2: Diseño de la solución.....	58
3.3.1 Propuesta de diseño	58
3.3.2 Validación experimental del diseño	64

3.3.3 Aproximar el prototipo a las condiciones ideales para obtener la menor resistencia usando el mínimo número de experimentos o pruebas	65
3.3.4 Análisis de regresión por Coeficientes codificados	80
3.4 Etapa 3: Estandarización del proceso	82
3.4.1 Generación de la actualización en la instrucción de trabajo	82
3.4.2 Desarrollo de procedimientos estándar	83
3.4.3 Propuesta de plan de implementación	86
3.5 Resultados	89
Conclusiones.....	93
Referencias	95
Glosario	98

Índice de ilustraciones

Figura 1-1: Imagen de arnés automotriz.....	5
Figura 1-2: Imagen de un banco de pruebas para la verificación eléctrica final de un arnés de alto voltaje	6
Figura 1-3: Gráfica del efecto de la temperatura sobre la resistencia del cobre	9
Figura 1-4: Imagen de las terminales que van dentro de los conectores	10
Figura 1-5: Conectores de un arnés	10
Figura 1-6: Clips de sujeción.....	11
Figura 1-7: Adaptador de prueba.....	14
Figura 1-8: Posibles causas de variación de resistencia en un adaptador de prueba.....	15
Figura 1-9: Representación de la resistencia de cables	20
Figura 1-10: Circuito método Kelvin	21
Figura 1-11: Pares de terminales para un conector de un mazo de cables	22
Figura 1-12: Resistencia de contacto a 1 kHz (línea continua) y reactancia a 2 MHz de un par de piezas de prueba con ciclo de frotamiento para una longitud de pista de 50 μm	23
Figura 1-13: Diagrama de flujo del método Seis Sigma DMADV asistido por el DoE	27
Figura 2-1: Modelo para el análisis de variaciones en componentes automotrices (MAV)	32
Figura 3-1: Imágenes de pines de prueba a) cabeza redonda plana; b) cabeza plana; c) cabeza redonda.	44
Figura 3-2: a) Imagen de un terminal interna de un conector de un arnés b) Imagen de un conector de un arnés con sus terminal interna.	45
Figura 3-3: Imagen del traslape entre un pin de prueba y un conector de un arnés	45
Figura 3-4: Vista de corte de un adaptador de prueba conectado a un conector de un arnés.....	46
Figura 3-5: Imagen de dos adaptadores de prueba en un banco de pruebas	47
Figura 3-6: Banco de pruebas para arneses	48
Figura 3-7: Imagen digital de conector de arnés muestra	49
Figura 3-8: Imagen de pines de prueba haciendo contacto con terminal interna de un conector...49	
Figura 3-9: Imagen de pin haciendo traslape de 0.7 mm con conector de arnés.....	50
Figura 3-10: Imagen de un pin de prueba con cabeza plana para contactar un conector de arnés.51	
Figura 3-11: Imagen de traslape entre pin de prueba plano y terminal de conector	51

Figura 3-12: Principales causas de la variación de la resistencia eléctrica	54
Figura 3-13: Análisis de capacidad de pin circular plano	56
Figura 3-14: Análisis de capacidad de pin plano	57
Figura 3-15: Conector con cable de muestra de arnés.....	58
Figura 3-16: Pin de contacto de prueba.....	59
Figura 3-17: Piezas maquinadas del dispositivo de prueba a) parte fija, b) parte móvil.....	60
Figura 3-18: Inserción de diferentes pines sobre parte móvil	61
Figura 3-19: Ensamble parte fija y móvil.....	62
Figura 3-20: Ensamble final representando arnés entro del dispositivo	63
Figura 3-21: Diferentes traslapes de pin con terminal de conector	63
Figura 3-22: Vista de sección de dispositivo de prueba con conector	64
Figura 3-23: Opciones de configuración de diseño factorial	66
Figura 3-24: Configuración inicial en Minitab para DoE completo 2 x 3	67
Figura 3-25: Resumen de la configuración del DoE completo 2 x 3	68
Figura 3-26: Resumen del modelo DoE completo 2 x 3	68
Figura 3-27: Ecuación de regresión del DoE completo 2 x 3	69
Figura 3-28: Gráfica de Pareto del DoE completo 2 x 3	70
Figura 3-29: Tabla de coeficientes codificados del DoE completo 2 x 3.....	71
Figura 3-30: Gráfica de efectos principales de la resistencia del DoE completo 2 x 3	72
Figura 3-31: Gráfica de interacción del DoE completo 2 x 3	73
Figura 3-32: Resumen del experimento diseño factorial completo multinivel	75
Figura 3-33: Resumen del modelo del DoE completo multinivel.....	76
Figura 3-34: Ecuación de regresión del DoE completo multinivel	76
Figura 3-35: Gráfica de Pareto del DoE completo multinivel.....	77
Figura 3-36: Gráfica de efectos principales de la resistencia del DoE completo multinivel	78
Figura 3-37: Gráfica de interacción del DoE completo multinivel	78
Figura 3-38: Optimización de la respuesta del DoE completo multinivel	79
Figura 3-39: Tabla de coeficientes codificados del DoE completo multinivel	81
Figura 3-40: Instrucción de trabajo del diseño de un adaptador de alto voltaje.....	83
Figura 3-41: Diagrama de Gantt del plan de implementación	86

Figura 3-42 Optimización de la respuesta del DoE completo multinivel	89
Figura 3-43 Configuración de la optimización de la respuesta en el modelo físico	90
Figura 3-44 Gráfica de la tabla de valores físicos en $m\Omega$	91
Figura 3-45 Repetibilidad en mediciones físicas en $m\Omega$	92

Índice de tablas

Tabla 3-1: Resumen de valores de resistencia en pines	55
Tabla 3-2 Niveles que pueden ser utilizados para cada factor	65
Tabla 3-3: Niveles utilizados para cada factor en un DoE 2 X 3	66
Tabla 3-4: Experimento DoE factorial completo de con 2 factores y 3 niveles.....	67
Tabla 3-5: Experimento Diseño factorial completo multinivel.....	75
Tabla 3-6: Resumen del análisis de regresión en el diseño factorial completo multinivel	82
Tabla 3-7 Tabla de valores de entrada y salida en el adaptador físico	90

Introducción

Los automóviles eléctricos han tenido un gran repunte en la última década, por lo que ofrecer un coche estable y confiable es una necesidad para la sociedad. Los automóviles que usan energía eléctrica son diferentes en sus componentes eléctricos internos comparados con los que funcionan con combustibles. Las diferencias se ven presentes en la complejidad de las baterías y en los componentes de alimentación, ya que usan cargas elevadas; así como en los dispositivos mecánicos y eléctricos para la recuperación de la energía del automóvil. Estos elementos caracterizan a esta nueva tecnología, por lo que es importante garantizar el flujo de la energía que pasa por medio del arnés (Kawauchi, y otros, 2014), cuyo término es utilizado para nombrar al conjunto de cableado que posee el automóvil y que conecta a todos los componentes que lo conforman, los cuales son vitales para el funcionamiento y desempeño del sistema.

El desarrollo de la tecnología de prueba para arneses está en constante actualización, ya que se trabaja a la par con las ideas de mejora que requieren tanto clientes como proveedores, donde se trata de desarrollar un trabajo en equipo, que incluye el resultado de las investigaciones y las experiencias. El aumento de la eficiencia de los procesos productivos es un área de desarrollo en las organizaciones, en la que no se escatima en inversiones, ya que trae beneficios para todos los interesados, por lo que garantizar el producto es una necesidad. La tecnología que se investiga en este trabajo está relacionada con arneses de alto voltaje en una empresa del ramo automotriz en la ciudad de San Luis Potosí, donde se realizan pruebas a arneses de automóviles eléctricos por medio de adaptadores de prueba que evalúan su resistencia conectándose a fuentes de alto voltaje en todas las ramificaciones del arnés para corroborar el funcionamiento adecuado, considerando un factor de seguridad. En este trabajo se presentarán los problemas que surgen al medir la resistencia de los arneses con valores de alto voltaje, tomando en consideración la teoría científica y la experiencia laboral, relacionado con la alta variación que se tiene entre las corridas de pruebas de la resistencia.

Al término de este trabajo se espera obtener una pauta para la mejora del proceso de diseño y producción de adaptadores de prueba de arneses, los cuales contribuyen de manera directa en la garantía, tiempo de producción y costo del arnés. Este trabajo va dirigido al diseño de pruebas confiables del producto, ofreciendo confiabilidad a los clientes y reafirmando la responsabilidad

hacia la sociedad, así como el apoyo a productos no necesariamente automotrices pero que utilicen alto voltaje en el desarrollo de sus productos o para la investigación y desarrollo de energías alternativas.

Capítulo 1. Procesos de fabricación y prueba de arneses de alto voltaje para automóviles eléctricos

Esta sección tiene como objetivo la presentación de la empresa en donde se desarrolla este trabajo. Por cuestiones de confidencialidad, el nombre de la empresa no se menciona en el documento. En esta sección se presentará el contexto de este trabajo, se definirán los objetivos e hipótesis, el marco teórico, así como la delimitación del alcance del trabajo.

1.1 Importancia de los arneses eléctricos para automóviles eléctricos e híbridos

La industria automotriz en las economías internacionales, y su papel como propulsor para el desarrollo de otros sectores, ha provocado que diversos países tengan como uno de sus principales objetivos el desarrollo y fortalecimiento de este sector. La industria automotriz en México ha representado un sector estratégico para el desarrollo económico debido a la amplia proveeduría y ventajas competitivas a nivel mundial que se ofrecen tanto en mano de obra calificada como competitiva. La Secretaría de Economía afirma “Por su amplia proveeduría y las ventajas competitivas a nivel mundial que ofrece México en mano de obra calificada y competitiva, posición geográfica y acceso preferencial a otros mercados, la industria automotriz mexicana aún tiene un alto potencial de crecimiento y de generación de empleos de alta calidad” (Secretaría de Economía, 2016, p. 3).

El sector automotriz mexicano tiene el potencial para incrementar su competitividad como productor y convertirse en un importante centro de diseño e innovación tecnológica, para ello, tendría que jugar un papel fundamental en el desarrollo del capital humano, ya que un bajo nivel limita la implementación de procesos de mayor valor disminuyendo la confiabilidad de inversión (Secretaría de Economía, 2016).

En México, la innovación puede ser un factor muy importante para acceder a mayor número de clientes, a nuevos mercados e incluso para obtener mejores precios que los actuales. Con productos de mejor calidad y nuevos diseños, los artesanos podrían ingresar a mercados regionales,

nacionales e internacionales, mejorando sus ingresos y por lo tanto elevando su nivel de vida (Jiménez Castañeda, Domínguez Hernández, & Martínez Castro, 2009).

México ofrece importantes ventajas competitivas a nivel mundial, el acceso a proveeduría de alta calidad contribuye a reducir los costos de las armadoras, como pueden ser el costo de inventarios, costos logísticos y reducción de riesgos por proveeduría. El desarrollo de una región conlleva a la generación de empleos más calificados, pero también mejor remunerados, un mayor desarrollo del capital humano, la mejora de la sustentabilidad de las empresas, desembocando en una mejora de la competitividad del país (Secretaría de Economía, 2016).

El caso de estudio que dio pie al desarrollo de este trabajo de tesis se caracteriza por ser un proveedor internacional de industria automotriz y cuenta con varias sedes alrededor del mundo. El trabajo desarrollado en este trabajo de tesis se lleva a cabo en la planta que se encuentra en San Luis Potosí, cuyos principales clientes demandan un producto vanguardista y personalizado. Los productos que maneja están relacionados con la parte eléctrica de los automóviles, tales como arneses, equipo eléctrico, electrónico y componentes de próxima generación. El tema de tesis tiene relación directa con la elaboración de arneses para coches de alta gama y se envían a diferentes partes del mundo, donde cada cliente tiene sus propios modelos y variantes.

Todo coche, ya sea convencional o de nueva generación, como el coche eléctrico funciona, en su mayoría, con señales eléctricas, las cuales son recibidas y procesadas por computadoras o módulos de procesamiento. Estos módulos son los encargados de interpretar las señales para ejecutar las funciones esperadas. Estas funciones pueden ser: desde el arrancar del motor, bajar los vidrios, encender las luces y direccionales, poner en funcionamiento el aire acondicionado, activar los limpiaparabrisas y otras funciones básicas del automóvil, hasta la activar calefacción en los asientos, ajustar automáticamente las luces cuando es de noche, activar la cámara de reversa cuando la caja de velocidades es puesta en reversa, accionar los sensores de proximidad, etc. Algunas de estas funciones son consideradas como secundarias, ya que están relacionadas con el confort y no con el funcionamiento y seguridad del sistema; pero el accionar una bolsa de aire o deshabilitar las puertas ante un choque son funciones del sistema que son primordiales en caso de emergencia, de ahí la importancia de la comunicación interna.

Estas señales viajan por medio de cables por todo el automóvil, los cuales deben de cumplir con características especiales como el material, el calibre y el recubrimiento específico, esto para que la señal pueda llegar a los circuitos, sensores y actuadores. A cada actuador y sensor del coche le llega un conjunto de cables por lo que, dependiendo del equipamiento y tecnología del coche, es su nivel de complejidad.

Al conjunto de todo el cableado mencionado, sumando los módulos, conectores de las contrapartes del coche y clips de sujeción a la carrocería se le conoce como arnés, en la Figura 1-1 se muestra como el arnés envuelve todo el interior del automóvil.

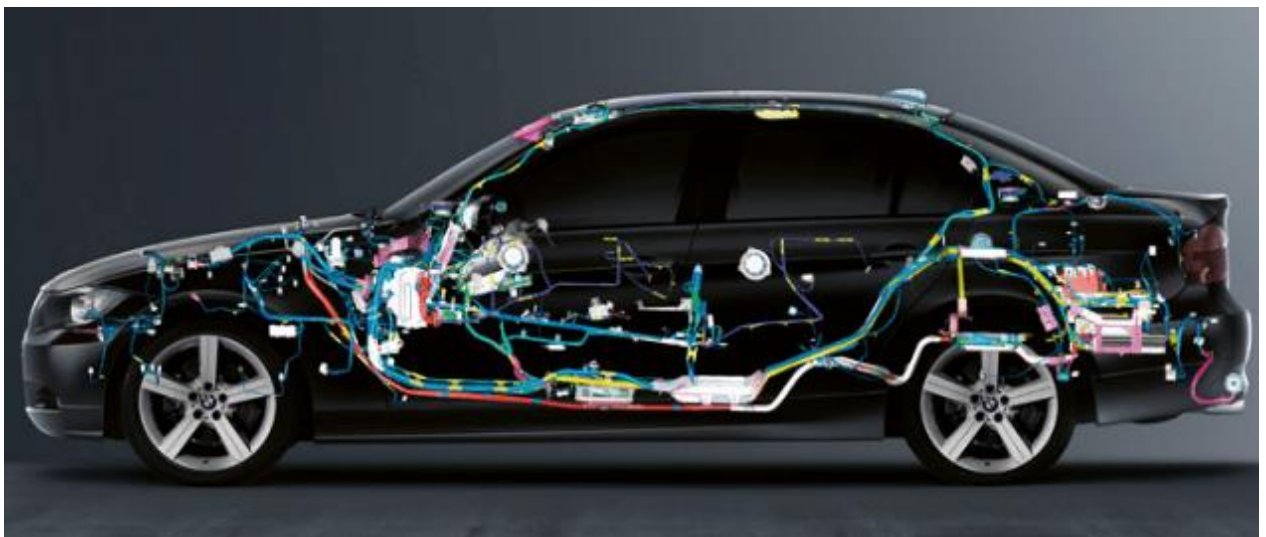


Figura 1-1: Imagen de arnés automotriz
(Opportimes, 2016)

Los arneses constituyen las vías de comunicación de los automóviles, lo que podría ser comparado con el sistema nervioso central del cuerpo humano; si una señal es mandada, pero esta no tiene por donde viajar, la señal se pierde y no hay una acción que pueda ser ejecutada por daño de las conexiones.

Actualmente, una forma en que los arneses se pueden clasificar es respecto al voltaje de operación: los arneses de bajo voltaje, que son utilizados para automóviles que funcionan con gasolina y arneses de alto voltaje, que son para automóviles que funcionan con energía eléctrica o

híbrida. Independientemente del tipo de arnés, su funcionamiento debe estar garantizado por todas las funciones primarias, secundarias y de seguridad que comunica.

La empresa en la cual se encuentra el proceso de estudio produce los arneses ensamblando los mazos de cable, al que se le van agregando los conectores, clips y terminales manualmente con ayuda de equipo de fijación. Dentro de la empresa existe un área que construye los bancos de prueba para comprobar que los arneses fabricados funcionen correctamente como el mostrado en la Figura 1-2. En estos bancos se encuentra montados la computadora y sus respectivos adaptadores de prueba, los cuales son dispositivos en los que se pueden introducir los conectores del arnés, cada conector del arnés es insertado a un adaptador de prueba, el cual simula la inserción del conector con la contraparte del coche y, una vez conectadas sus partes, los arneses son sometidos a pruebas para asegurar su buen funcionamiento, se ejecutan pruebas eléctricas que permitan identificar si el arnés es apto para ser enviado al cliente y para corroborar que el arnés es liberado como un producto confiable.



Figura 1-2: Imagen de un banco de pruebas para la verificación eléctrica final de un arnés de alto voltaje (Emdep, 2022).

Las mesas y los adaptadores son desarrollados en la empresa, por lo existe un subdepartamento encargados de la construcción de estas mesas de prueba con sus respectivos adaptadores, el cual se compone de sus propios equipos de diseño, producción y calidad. La labor del departamento de diseño es elaborar adaptadores de pruebas confiables, de fácil fabricación y a bajo costo, para que este conjunto de adaptadores de prueba pueda verificar en el arnés la continuidad, el calibre adecuado, el margen de resistencia pedida, existencia de componentes adicionales como seguros, color, entre otras especificaciones que pueda requerir el cliente. Al mencionar la importancia de los adaptadores, se puede considerar al departamento de diseño como el corazón de la producción de arneses de la empresa ya que no solamente importa la cantidad de arneses puedas producir, sino la cantidad de ellos que han sido fabricados correctamente.

Como se mencionó anteriormente, existen clasificaciones entre los arneses, como es la clasificación para automóviles convencionales y eléctricos, en los cuales, para probarlos, se trabaja con bajo y alto voltaje respectivamente. Para el diseño de adaptadores de prueba, se poseen guías de diseño para ambas tecnologías. Para la tecnología de bajo voltaje, resulta eficaz seguir la guía de diseño de adaptadores, pero para la tecnología de alto voltaje, hay ocasiones que al seguir la guía de diseño no se obtiene un producto funcional por lo que se detecta área de oportunidad de mejora.

El problema surge debido al alto nivel de exigencia del cliente con la prueba de resistencia en el cableado, ya que se presenta una variación fuera del límite establecido para cumplir con los requisitos del cliente. Se desconocen con exactitud los factores que intervienen en los valores de la resistencia, por lo que para este trabajo se buscará resolver este problema.

Al carecer de esa información, por ser una tecnología relativamente nueva, en ocasiones es necesario un rediseño basado en prueba y error hasta lograr el contacto estable. Todo rediseño implica mayores gastos para la empresa, porque se necesita tiempo de diseño para evaluar el cambio y generar la mejora, tiempo de producción para el desensamble y ensamble con las piezas nuevas o retrabajadas y tiempo de ser probado nuevamente.

Esta investigación va encaminada a analizar los factores que intervienen en la variabilidad con las pruebas de resistencia, apoyándose en la teoría científica mediante la experimentación física

de los adaptadores. En el apartado de la problemática se detallará el problema. La importancia de desarrollar este tema reside en la tendencia de un repunte a nivel mundial de los autos eléctricos (IEA, 2023) por utilizar una energía alterna al combustible, por lo que es necesario invertir en la investigación y desarrollo de las tecnologías actualmente usadas para poder responder a tiempo las necesidades actuales y futuras del cliente.

1.2 Problemática de la variación de resistencia en la prueba de arneses eléctricos

Como desarrollador de arneses de cableado específicos para sus clientes, se fabrican sistemas de arneses de cableado cada vez más sofisticados, cuya complejidad del arnés puede contar con hasta 1031 variantes, dependiendo de las funciones para el cual ha sido diseñado. Estas tecnologías están orientadas a futuro, para sistemas de accionamiento convencionales y para sistemas de energías alternas que utilizan sistemas de mazos de cables de alto voltaje.

Los automóviles convencionales que funcionan con combustibles fósiles suelen operar en sus funciones internas a 12 volts, algunos otros modelos de automóviles usan hasta 24 volts en CD, lo cual es un voltaje bajo y se considera de fácil manipulación. Sin embargo, en el caso de los automóviles híbridos y eléctricos, debido a su naturaleza de operación, pueden llegar a operar en algunos componentes hasta 500 volts en CD, siendo alto en comparación con los coches tradicionales.

Dentro del arnés se encuentran sus componentes que son: el cableado, terminales de cables, conectores y clips de sujeción. El calibre y recubrimiento del cableado dependerá de la tecnología para la cual será utilizado, sea bajo o alto voltaje, más la especificación del cliente. A continuación, se presenta una breve descripción de estos componentes.

Para el **cableado**, los materiales con los que son elaborados los arneses juegan un rol muy importante. Buscando una máxima conductividad los materiales utilizados para los cables son elaborados con materiales que entran en la categoría de superconductores. Para el cobre, que es el material que está hecho el arnés y para la mayor parte de los conductores metálicos, su resistencia aumenta casi linealmente con un incremento de la temperatura como se muestra en la Figura 1-3.

Si un material tendiera a no presentar resistencia al flujo de los electrones se le llamaría superconductor. Los superconductores son materiales que poseen esa capacidad intrínseca de resistividad; sin embargo, se requieren temperaturas muy bajas para obtenerlos; lo cual, dependiendo de las aplicaciones, puede ser muy difícil de lograr.

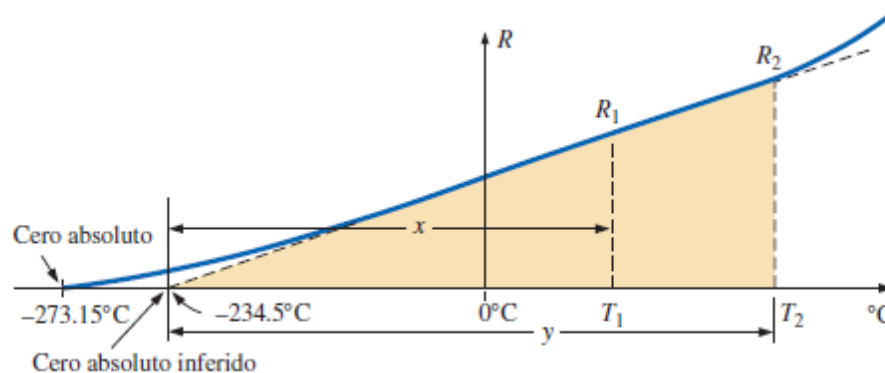


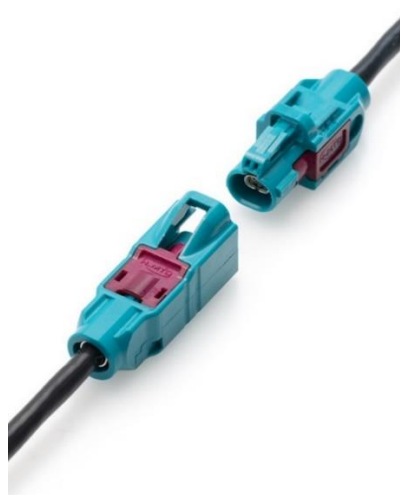
Figura 1-3: Gráfica del efecto de la temperatura sobre la resistencia del cobre
(Boylestad, 2004)

Las **terminales** son elementos esenciales del arnés, ya que indican el principio o fin de un circuito de comunicación; es decir, principio o fin de un cable. Las terminales están fabricadas de aluminio o cobre, debido a que estos materiales son buenos conductores de la electricidad, por lo que tienen mayor facilidad de trasladar la señal. Las terminales se encuentran crimpadas con el cableado como se aprecia en la parte inferior de la Figura 1-4, su función principal es lograr una correcta fijación, ya que las terminales entran en las cavidades de los conectores que se muestran en la parte superior de la Figura 1-4. Las cavidades brindan soporte y dirección al hacer contacto con sus contrapartes en el vehículo, y así, al insertarse se evita movimiento y se asegura el contacto en todo momento.



*Figura 1-4: Imagen de las terminales que van dentro de los conectores
(Dhoot Transmission, 2023).*

Los **conectores** están encargados de proteger y aislar las terminales del cable. Pueden ir sellados, para protegerlos contra humedad y polvo, lo que le brinda resistencia a la temperatura de trabajo del coche. Permiten la inserción mecánica con la contraparte del coche o con contrapartes de componentes del arnés como se representa en la Figura 1-5 que al insertarse aseguran la posición y evitando intermitencias de comunicación entre componentes, asistido por los seguros que contiene.



*Figura 1-5: Conectores de un arnés
(Dhoot Transmission, 2023).*

En la Figura 1-6 se aprecia un **clip de sujeción**, el cual, es usado para fijar y guiar el arnés con la carrocería del automóvil. Los clips constan de un sujetador que se engancha a la parte metálica de la carrocería y la abrazadera que se rodea al cableado.



Figura 1-6: Clips de sujeción
(AVERY DENNISON CORPORATION, 2025)

Para probar los arneses y sus componentes se requiere un banco de pruebas con sus respectivos adaptadores de prueba que permitirán realizar la conexión de los arneses que serán probados.

En la Figura 1-7 se ilustra un **adaptador de prueba**. Este adaptador es un dispositivo electromecánico, el cual tiene un block plástico maquinado para que pueda ser insertado un conector del arnés y que en el fondo del maquinado contiene pines de contacto fabricados en aleaciones de cobre, oro o platino, que son buenos conductores de electricidad. La intención de los pines de contacto es que alcancen a las terminales del conector a probar; es decir, que al insertar un conector, los pines de contacto reciban a las terminales con los pines, logrando la mayor cantidad de área de contacto posible y tomando en consideración una fuerza de presión entre pin y terminal ocasionada por el traslape de contacto inducido por la distancia que se acercan entre el mismo pin y terminal, esto permite un contacto estable, el cual se realiza a una distancia donde no se dañe ninguno de los dos materiales.

Existen diversas pruebas que se realizan en los bancos de prueba, que se llevan a cabo al insertar el arnés en los adaptadores de prueba. Estas pruebas dependen de los requerimientos del cliente y las seis principales que se realizan son: continuidad, corto circuito entre cables, presencia, hermeticidad, color y resistencia.

- *Las pruebas de continuidad* consisten en verificar que haya comunicación entre los extremos de cada cable, es decir, que no esté roto y se realiza conectando el arnés a los adaptadores de prueba mandando una señal de un extremo del cable y verificar que llegue al otro extremo.
- *La prueba de aislamiento* consiste en verificar que no haya comunicación de un cable con los demás cables y se realiza enviando una señal por un extremo del cable y monitorear que a los otros extremos de los cables no les llegue esa señal.
- *La prueba de presencia* es para verificar que el conector contenga un componente adicional y se realiza mediante un pulsador internamente instalado en el adaptador.
- *La prueba de hermeticidad* consiste en evaluar que el conector esté sellado herméticamente a través de la inyección de aire.
- *Prueba de color*, debido a que existe mucha variedad de conectores, hay unos que por su forma física exterior son muy parecidos entre ellos y para diferenciarlos se requiere una que los identifique para asegurar que se montó el conector adecuado. Esta prueba se realiza por medio de un sensor de color instalado dentro del adaptador de prueba.
- *Prueba de resistencia*. Para todos los arneses se realizan las pruebas mencionadas, excepto la prueba de resistencia que es exclusiva para arneses de coches eléctricos ya que se necesita verificar que la resistencia en el arnés sea menor o igual a la requerida por el cliente para facilitar el flujo de la energía entre los componentes del automóvil. Esta prueba consiste en aplicar un voltaje que incluye un factor de seguridad, el cual va desde aplicar voltaje de 2.7 kV hasta 4.3 kV dependiendo de los requerimientos del cliente y luego se evalúa en la máquina especializada para evaluar la resistencia del arnés y poder liberarlo.

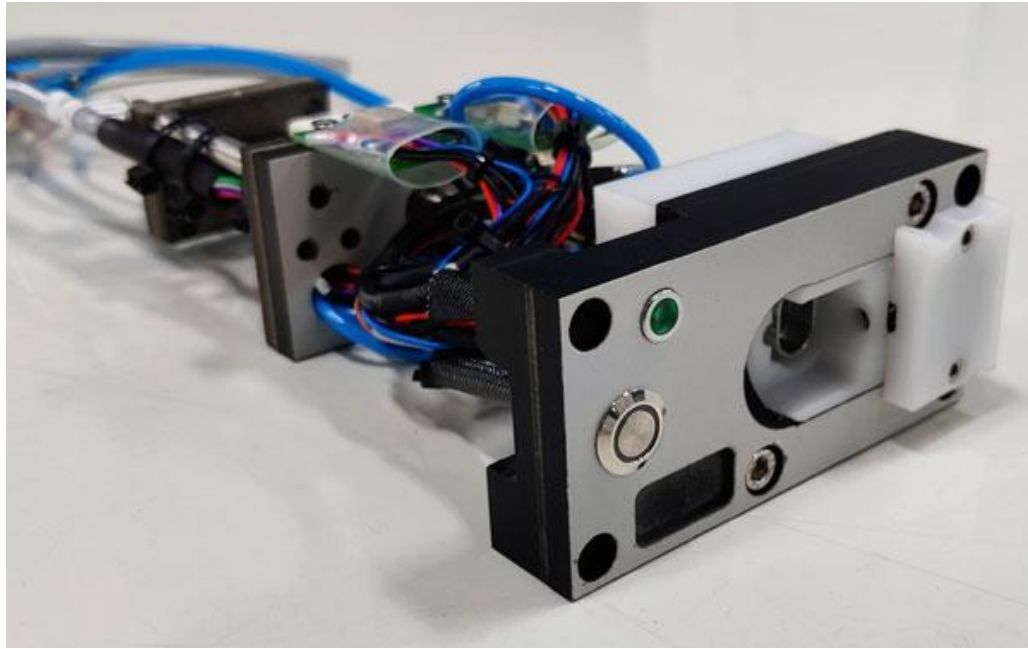
No se cuenta con un parámetro físico que marque un límite entre baja y alta tensión, pero por normativa para proporcionar protecciones adecuadas a los sistemas, la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), en sus diversas publicaciones, establece límites que subdividen en baja tensión hasta 1000 V en corriente alterna y hasta 1500 V en corriente continua en base a la norma IEC 61140:2016 , (Comisión Electrotécnica Internacional, 2016) estos estándares son definidos con el objetivo de que, por debajo de ese voltaje, exista un arco eléctrico sostenido, es decir, arriba de estos valores existe la posibilidad de que si ocurre un cortocircuito, la corriente pueda saltar a través del aire, formando un arco eléctrico visible y peligroso.

Con la llegada de nuevas tecnologías, como lo son los autos eléctricos, ha sido necesario realizar pruebas más robustas que alcancen a cubrir los requerimientos que necesita el cliente y un caso es la prueba de resistencia. Esta prueba consiste en que, una vez conectado el arnés con los adaptadores de prueba, en su interior cada terminal del conector es tocada por un par de pines de contacto del adaptador y estos a su vez están conectados a un equipo especializado en alto voltaje, que tiene la capacidad de evaluar la resistencia que existe en el arnés mediante un método que es utilizado para evaluar resistencias muy pequeñas llamado 4 polos o método de Kelvin (Kuphaldt, 2006). Para una mejor comprensión de este trabajo, este método será presentado en el Marco Teórico de este trabajo de tesis.

El departamento de diseño recibe un conector como patrón muestra y la documentación correspondiente del conector, donde se especifican los requisitos del cliente para la fabricación del adaptador. Una vez que la información esté completa, se diseña el adaptador en el software Solid Edge y se manda a producción para su fabricación. Al finalizar su producción, se verifica, en conjunto con los departamentos internos de producción, calidad y diseño, para asegurar que se cumple con los requerimientos pedidos por el cliente y su estabilidad para ser liberado como un adaptador confiable y, si es requerido, proceder a su producción en serie.

Conexión del adaptador

En la Figura 1-2 se muestra el **banco de pruebas** *que* es la unión de dos o más adaptadores de prueba mostrado en la Figura 1-7, estos son colocados en una mesa con una computadora que por programación corre las pruebas necesarias. El adaptador de pruebas diseñado contiene una cavidad por donde se introducirá un conector, siendo este un brazo o extremo del arnés. En la base de la cavidad del adaptador se encuentran ensamblados pines que realizan el contacto con las terminales del conector. Los pines del adaptador son conducidos a una tarjeta del banco de pruebas mediante cableado; el circuito se cierra con otro adaptador instalado en la misma mesa para que este, a su vez, se conecte con un conector, que es el otro extremo del arnés, la prueba se corre mediante la secuencia de un programa que ejecuta la computadora de la mesa de prueba basado en los requerimientos del cliente.



*Figura 1-7: Adaptador de prueba
(Dhoot Transmission, 2023).*

Medición de resistencia

El *banco de pruebas* contiene la máquina que mide la resistencia y posee un alcance de millonésimas de Ohm de exactitud. Esta máquina realiza la medición cuando la conexión es efectiva, es decir, en cuanto se cierra el circuito eléctrico entre conector, adaptador y máquina. Por proceso, se realiza un mantenimiento preventivo programado cada 2 meses para evaluar que esté operando de manera adecuada. Cuando hay sospecha de falla, se cuenta con un dispositivo patrón de $1\ \Omega$, el cual ayuda a mantener la operación confiable.

Se han detectado dos problemas los cuales surgen en la etapa de medición de la resistencia, la cual es la etapa final previa a la liberación del adaptador. El primer problema surge cuando se diseña un adaptador y este se produce. En ocasiones, ciertas medidas de resistencia no cumplen con los requerimientos del cliente; en ese caso, se efectúa un rediseño, ya sea por el cambio de concepto o cambio parcial del adaptador. Estos cambios implican nuevas medidas de resistencia que se esperaba que no fueran muy significativas; sin embargo, en ocasiones cambian drásticamente hasta en un $\pm 25\%$.

Cabe señalar que las mediciones se hacen con arneses patrón que envía el cliente, lo que significa que se está utilizando la misma referencia. Sumado a esto, como segundo problema, al realizar pruebas de repetibilidad, consistentes en realizar varias pruebas al mismo arnés patrón, con el mismo equipo y mismas condiciones (Creus, 2011), en cada inserción del mismo arnés al adaptador de prueba, en algunos adaptadores se obtiene un resultado diferente de resistencia, con una variación que ronda el 2%, lo que se considera un porcentaje de interés para estudiarlo y evaluar el impacto con los requerimientos del cliente y de ser posible tratar de minimizarlo mientras los factores externos lo permitan. En este trabajo se pretende reducir el 27% de variación, correspondientes a las variaciones por rediseño y de la repetibilidad y así tener una mayor certeza al liberar un adaptador y también evitar retrabajos en los adaptadores que tengan medidas cercanas al límite de resistencia del requerimiento del cliente.

Los porcentajes de variaciones en las resistencias se han obtenido a través de la recopilación de datos que se han obtenido del análisis de los adaptadores de prueba que hasta el momento se han fabricado en la empresa, en la Figura 1-8, se muestran los factores donde se ha visualizado una afectación a los resultados de la prueba de resistencia.

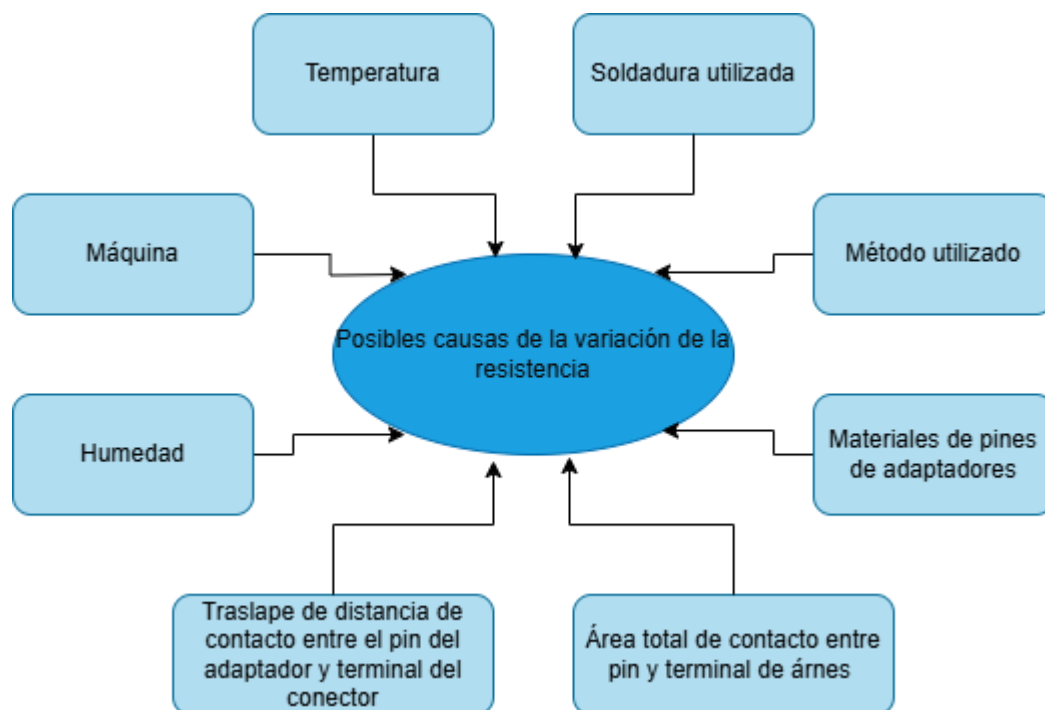


Figura 1-8: Posibles causas de variación de resistencia en un adaptador de prueba

Si algún adaptador no funciona, o alguno de los departamentos de diseño, producción o calidad, que son los departamentos directamente involucrados en la producción del arnés, no están de acuerdo con los resultados, se regresa el componente para realizar un cambio o mejora al diseño, buscando alcanzar los requerimientos del cliente. Es por esta razón que, si la prueba de resistencia sobrepasa los niveles máximos permitidos por la muestra, o está muy cerca de su límite superior de las especificaciones del cliente, se tiene que realizar un retrabajo hasta lograr su funcionalidad y en esa inversión de tiempo de retrabajo de diseño, producción, ensamble y calidad. El problema actual es la falta de información suficiente para realizar un método de diseño más eficiente que proporcione la confiabilidad necesaria en la elaboración de un adaptador.

El objetivo de este trabajo es encontrar la causa o las causas principales que afectan la variación de la resistencia entre adaptadores y arnés con la finalidad de que se pueda minimizar.

Por lo tanto, el enunciado formal del problema es:

“¿Cómo se pueden disminuir las variaciones de la resistencia por contacto entre adaptadores de prueba y arneses eléctricos de manera que se pueda asegurar el cumplimiento con las exigencias del cliente?”

Y las preguntas de investigación para este trabajo son:

- *¿Cuáles son las causas de variación de la resistencia entre los adaptadores y el arnés eléctrico?*
- *¿Cómo se puede asegurar el cumplimiento de los requerimientos del cliente?*
- *¿Cómo se puede llevar a cabo, de manera sostenida, la reducción de la resistencia entre los adaptadores de prueba y los arneses eléctricos?*

1.3 Justificación

Con el desarrollo de este trabajo se pretende hacer una aportación al impulso de las nuevas tecnologías relacionadas con el sector de automóviles eléctricos, ya que es una tecnología que se

está introduciendo globalmente y en la cual se espera un repunte en los próximos años por ser una energía alterna al combustible.

Las soluciones propuestas podrían utilizarse para el diseño de dispositivos para pruebas en otros componentes involucrados en la distribución de corriente continua a alto voltaje; contribuiría a desarrollar mejores productos que impactarían a la sociedad en productos con un menor precio, mayor accesibilidad y seguridad para el cliente.

En el caso específico de la empresa, los beneficios identificados son:

1. Aseguramiento de la calidad de los productos elaborados en la empresa caso de estudio.
2. Ahorros en tiempo de mano de obra, tiempo de rediseño, producción por desensamble y ensamble e inspección.
3. Mejora de la guía de diseño para la elaboración de adaptadores de alto voltaje.
4. En el caso de que el producto sea producción en serie se reduce la variación.
5. Cumplimiento de las exigencias de los clientes.
6. Disminución de retrabajos, ahorrando recursos materiales y humanos en tiempos de diseño, producción e inspección final.
7. Mantener la posición e imagen de la empresa.

Actualmente por cada requerimiento del diseño de un adaptador de prueba, se está alcanzando un retrabajo significativo de casi el 30% por lo que al implementar una mejora la guía del diseño se pretende reducir al 10%.

Si se cubren las necesidades del cliente, se corrobora el compromiso de la empresa por elaborar productos de calidad y da la pauta al aseguramiento de futuros proyectos, donde se mantiene la imagen de la empresa como marca preferida.

1.4 Objetivos

Los principales intereses de la compañía están relacionados con la innovación administrativa, productividad e investigación y desarrollo. Como en toda empresa de clase mundial, sus acciones están basadas en la mejora continua, centrales para el aseguramiento a largo plazo de

la calidad de sus productos. Para este trabajo de tesis, y basados en lo presentado anteriormente, se presentan a continuación los objetivos que rigen este trabajo de tesis.

1.4.1 Objetivo General

El objetivo general para este trabajo es el siguiente:

Disminuir las variaciones de resistencia eléctrica por contacto entre los adaptadores de prueba y los arneses eléctricos de alto voltaje para asegurar el cumplimiento con las exigencias del cliente para este producto por medio de una metodología, desarrollada con este propósito.

1.4.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos que permitirán el cumplimiento del objetivo general son:

1. Realizar un análisis de los procesos de la elaboración de los adaptadores de prueba para arneses de alto voltaje, con el fin de encontrar las causas de variación de la resistencia por contacto entre los adaptadores y el arnés para así poder atacar el problema.
2. Desarrollar una guía de diseño para realización de adaptadores de alto voltaje para el proceso de producción que permita alcanzar los requerimientos del cliente.
3. Implementar la guía de diseño en el proceso del diseño de adaptadores de alto voltaje para lograr la estandarización del proceso.

1.5 Hipótesis

De los factores que se conocen que intervienen en la modificación de la lectura de la resistencia eléctrica, los cuales fueron presentados anteriormente en la problemática, se podrían excluir los factores de máquina y método utilizado, ya que son factores adecuados para tomar lecturas en el orden de 10^{-6} a $10^{-7} \Omega \times \text{cm}$, siendo los adecuados para la medición de resistencia eléctrica del arnés de alto voltaje. Los factores de temperatura y humedad también son excluidos,

ya que las mediciones que se han realizado han sido en espacios donde se controlan estos factores. Respecto al factor de tipo de materiales de los pines, los problemas de variación se han presentado en diferentes aleaciones de pines que se usan para las pruebas dentro de la empresa y sin algún patrón conocido al momento por lo que se sería preferible usar el pin que más se utiliza al hacer este tipo de pruebas. Los pines del adaptador de prueba se sueldan al cableado del banco de pruebas por soldadura, la información que se tiene al momento es que se han reportado casos donde afecte, pero solo cuando no es aplicada correctamente, por lo que, usar otro tipo de soldadura no sería un factor viable para modificar, al menos por el momento.

Con base en todo lo anterior, la hipótesis que rige este trabajo de tesis es la siguiente:

“Las variaciones en las mediciones de la resistencia eléctrica por contacto entre los adaptadores de alto voltaje y los arneses son afectados por la cantidad de área de contacto y el traslape de la distancia de contacto que tienen los pines del adaptador de prueba contra las terminales de los conectores del arnés”.

1.6 Marco teórico

El propósito de esta sección es presentar un estudio de diversos artículos relacionados con la problemática que se trata en la empresa caso de estudio. Los artículos seleccionados fueron basados en problemas relacionados con la introducción de nuevas tecnologías de ingeniería en la industria, así como la presentación de los conceptos, herramientas y metodologías que permiten lograr el cumplimiento de los objetivos anteriormente planteados. Estos breves resúmenes de artículos estudiados se consideran igualmente relacionados a la solución del tema central, donde se busca la aportación de cómo resolvieron sus problemas y cómo podrían ayudar al desarrollo de este trabajo.

1.6.1 Marco metodológico: técnicas para la medición de resistencia

Las técnicas de medición que se realizan en la empresa caso de estudio se hacen con una máquina que mide la resistencia en función de los requerimientos del cliente con alto voltaje.

Método de Kelvin para medir resistencias pequeñas

Para el caso de estudio se requieren lecturas de resistencia muy pequeñas por lo que, para medidas de alta precisión, no es apropiada la medición con un ohmímetro, ya que la resistencia de los arneses de alto voltaje son en el orden de miliohmios ($m\Omega$). En la Figura 1-9 se muestra un circuito que representa la conexión al medir un objeto por medio de un ohmímetro, si los cables de conexión del ohmímetro fueran muy largos o si el objeto a medir tuviera una resistencia muy baja, el error de medición introducido por la resistencia del cable será sustancial por lo que la lectura del medidor sumará la resistencia de los cables de medida y la de la resistencia bajo prueba (Kuphaldt, 2006).

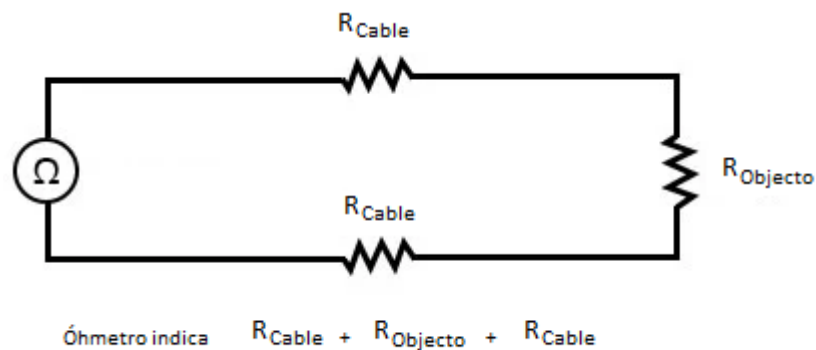
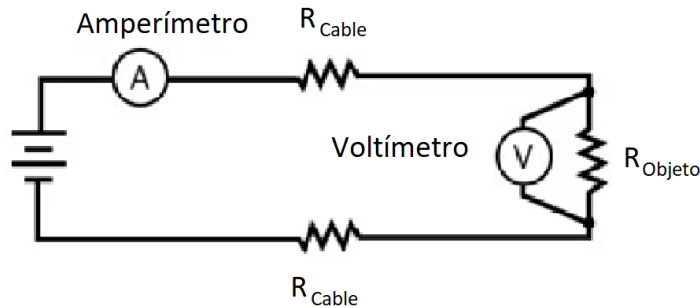


Figura 1-9: Representación de la resistencia de cables

Fuente: (Kuphaldt, 2006)

Para evitar una lectura errónea, cuando una resistencia llega a en términos de $m\Omega$, Kelvin propuso un método conocido como *método de 4 polos* o también llamado *método de Kelvin*. En la Figura 1-10 está dibujado el circuito del método de Kelvin, el cual consiste en hacer pasar por un circuito exterior una corriente y por un circuito interior, se mide la tensión. Debido a que los voltímetros modernos tienen altas resistencias internas, prácticamente no circulará corriente.



*Figura 1-10: Circuito método Kelvin
(Kuphaldt, 2006)*

Por la Ley de Ohm se sabe que la resistencia es igual a la tensión dividida por corriente ($R = V/I$) (Young & Freedman, 2020). Entonces determinar la resistencia del componente es cuantificable si se mide la corriente que lo atraviesa y la caída de voltaje a través del componente. La precisión puede mejorarse si la corriente del voltímetro se mantiene al mínimo, ya sea mediante el uso de baja corriente a gran escala o un sistema potenciométrico (Gil & Rodríguez, 2001).

Desarrollo de nuevos contactos eléctricos para aplicaciones de alta tensión

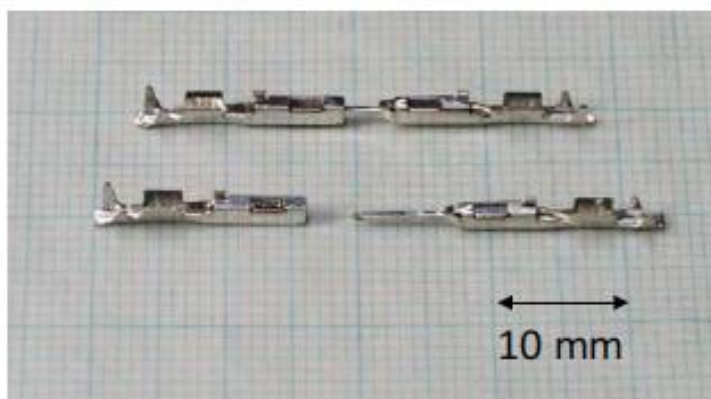
Un estudio que vale la pena analizar para la situación desarrollada en la empresa caso de estudio es uno realizado en el centro de investigación “AREVA T&D – ARC” en Villeurbanne, Francia, ya que presentó el desarrollo de una nueva tecnología de contacto de arco para interruptores automáticos de alta tensión (Visata & J. & Montillet, 2006). El principal resultado de este estudio muestra que los materiales compuestos de carbono/cobre podrían comportarse razonablemente bien. En particular, su erosión durante las pruebas de conmutación no fue demasiado alta en comparación con la de los contactos reales. Además, se pudo observar que, en algunos casos, la erosión de la boquilla respecto al arco fue menor que la obtenida con los compuestos tungsteno/cobre. En paralelo, los cálculos de la composición del plasma mostraron que, dependiendo de las condiciones, se podría evitar la formación de grafito dentro de la cámara de arco, por lo que el compuesto de carbono/cobre podría representar una tecnología prometedora.

Evaluación del impacto de la degradación de terminales en la medición de impedancias

Dentro de los principales temas que se tienen que estudiar está la cantidad de inserciones de un arnés a un adaptador de voltaje durante las pruebas. Un artículo sobre este tema mostró que el desgaste puede ser un factor determinante en pruebas de alto voltaje y terminales de conectores.

“La oxidación y el desgaste afectan la degradación de los conectores con contactos de metal-base chapados. Dado que estos fenómenos se procesan gradualmente y se aceleran por el movimiento de fricción causado por el ciclo térmico o la vibración mecánica, es importante evaluar el grado de degradación de los conectores, especialmente de los mazos de cables para automóviles.” (Fukuyama, J. Toyozumi, Itou, & Kaneko, 2018).

La Figura 1-11 muestra las terminales internas de algunos tipos de conectores, las terminales son de tamaño de 10 mm y que a simple vista no se puede observar si existe alguna rayadura, desgaste u oxidación, los cuales son factores que se señalan en dicho artículo.

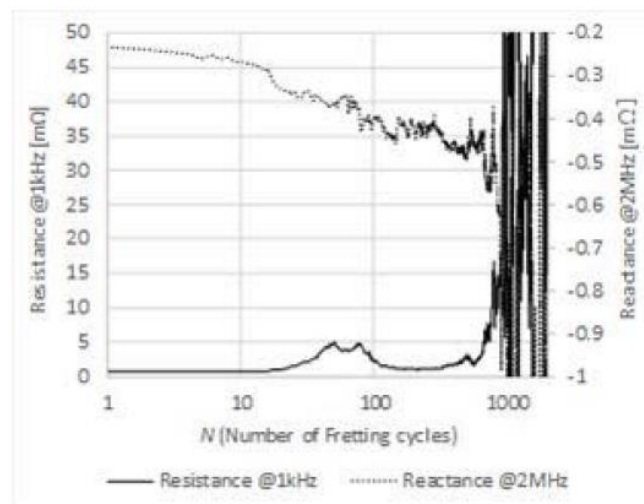


*Figura 1-11: Pares de terminales para un conector de un mazo de cables
(Fukuyama, J. Toyozumi, Itou, & Kaneko, 2018)*

La prueba del artículo (Fukuyama, J. Toyozumi, Itou, & Kaneko, 2018) consistió en medir el cambio del valor de la resistencia en dos terminales macho y hembra de un conector cuando estas son sometidas a una prueba de fricción, para esto se utilizaron terminales de cobre estañado y se realizaron mediciones pequeñas de resistencia, en el orden de los m Ω , haciendo uso del método

de cuatro polos, lo cual marca una pauta adecuada en la selección del método de medición para el problema caso de estudio. Los resultados del mismo muestran que, durante las pruebas de fricción entre terminales de conectores de cobre estañado, se detectaron cambios de resistencia como se muestra en la gráfica de la Figura 1-12 que evalúa la relación de la resistencia contra el número de ciclos, donde el grado de deterioro de los muestras, se obtiene del producto de la fricción entre terminales debido a que se provocan rayaduras internas, abriendo el paso a una oxidación en las terminales. Se demostró también que la repetición continua de inserciones de las terminales va generando deterioros conforme se aumenten los ciclos, y que cuando se superan las cien inserciones, el deterioro ya es significativo para generar variaciones en las resistencias.

En un automóvil la comunicación de datos y energía depende del contacto del arnés con los demás componentes dentro del sistema por lo que las terminales dentro de los conectores son importantes e indispensables para conducir de forma segura. A medida que el sistema de control computarizado se ejecuta en el automóvil, las terminales se vuelven importantes y es crucial tener un contacto entre ellas para garantizar la transmisión dentro del mismo sistema. En la evolución automotriz algunos nuevos modelos han aumentado la cantidad y el volumen de los mazos de cables y sus terminales por lo que hay miles de contactos eléctricos por automóvil y todos ellos necesitan mantener su confiabilidad durante mucho tiempo, más de diez años en circunstancias severas.



*Figura 1-12: Resistencia de contacto a 1 kHz (línea continua) y reactancia a 2 MHz de un par de piezas de prueba con ciclo de frotamiento para una longitud de pista de 50 μ m
(Fukuyama, J. Toyozumi, Itou, & Kaneko, 2018)*

En la Figura 1-12- se muestran los cambios de resistencia cuando son sometidos a cierto número de ciclos. En la primera parte de la gráfica, de cero a diez ciclos, se mantiene la medición de la resistencia, de diez a 100 ciclos se notan cambios en la medición los cuales no representan un valor significativo en el valor de la resistencia y a partir de cien ciclos las mediciones son disruptivas y provocan variaciones significativas.

Basado en los resultados de este artículo se comprende la sensibilidad de las terminales y se confirma que el método de kelvin actualmente utilizado para la medición de la resistencia es el adecuado para detectar posibles defectos en las terminales del arnés. Por otro lado también que las terminales de los conectores presentan problemas de mediciones de la resistencia debido a los ciclos de operación, y que estas, pueden variar los resultados si se introducen mas de una vez en las pruebas de resistencia, incluso si no se hace un contacto adecuado en la forma que se hace contacto del pin de prueba con la terminal del conector, ya que una terminal hembra hace un contacto envolvente con una terminal macho con dos factores que son el área y el traslape de distancia de contacto entre ambos componentes, en cambio los pines de los adaptadores de prueba son usados son de forma genérica los cuales tratan de hacer contacto a terminales tanto hembra como macho y es la tarea del diseñador posicionar las terminales en un lugar adecuado para realizar el contacto de medición. De igual manera, permite establecer que para el experimento que se va a desarrollar para este trabajo de tesis, las terminales no deben ser introducidas más de cien veces en la realización de las pruebas.

Modelado de contactos eléctricos tipo resorte

Con base en un estudio realizado en centro de investigación “High Voltage Switchgears Research Center ARC” (Aitken, Rodriguez, & Vinson, 2012), muestra que la definición de los parámetros de contacto del resorte (geometría, materiales) tiene una fuerte influencia sobre la fuerza de contacto y la resistencia. Para una relación de compresión entre el 10 y el 15%, se pudo ver que la resistencia de contacto es casi estable, en torno a un valor de 3.5 μohm . También es importante resaltar que es importante utilizar el contacto en un rango de tasa de compresión, donde la resistencia del contacto sea casi estable y no en un rango que presente una tasa de aumento

pronunciada. Para este caso, la resistencia de contacto aumenta cuando la tasa de compresión es inferior al 5%. Esta información ayuda a tomar en consideración la influencia del traslape de la distancia de contacto, el cual debería buscarse ser equilibrado para lograr la estabilidad en las mediciones.

Metodología Definir, Medir, Analizar, Diseñar y Verificar (DMADV) aplicada al diseño de máquinas y vehículos eléctricos

Seis Sigma es un enfoque disciplinado, basado en estadísticas y basado en datos y una metodología continuamente mejorada para eliminar defectos en un producto, proceso o servicio, que incluye un conjunto de técnicas y herramientas para la mejora de procesos. La fabricación de máquinas eléctricas es un proceso complejo para transformar diversas materias primas en un producto que funcione bien. La metodología de Seis Sigma DMADV se introduce en el enfoque de control de calidad. Esta metodología se utiliza con el objetivo de controlar doce tolerancias geométricas de los parámetros, debido a que es necesario considerar una gran cantidad de tolerancias simultáneamente, ya que están acopladas entre sí. el método utilizado fue “prueba y error” o “un factor a la vez”, evaluando solo un factor en cada momento y manteniendo los demás sin cambios. En el artículo (Wu, Luk, & Fei, 2017) se desarrolló un método para mejorar la calidad de un motor eléctrico minimizando la variación del rendimiento de la máquina manteniendo la variación del par de salida y la eficiencia del motor dentro del 2% del valor de diseño. La calidad real de los motores y variadores en la producción en masa depende de la tecnología de maquinaria disponible y de aquellas variaciones o incertidumbres inevitables en el entorno de fabricación, ensamblaje y operación. El analizar de los datos e identificar posibles fuentes de defectos, así como controlar tolerancias pequeñas para cada dimensión es clave para la calidad del motor. Al aplicar cambios de diseño en tolerancias, proponen reducir la variación, pero esto aumenta en gran medida el costo de fabricación. Por lo tanto, fue necesario ajustar los valores de las tolerancias para buscar la combinación de tolerancias óptima con menor variación de calidad y costo aceptable. Para la verificación de las tolerancias óptimas del motor diseñado, fueron verificadas por un software de análisis de elemento finito para predecir su comportamiento.

El diseño de experimentos, DOE por sus siglas en ingles “Design of experiment” es un enfoque práctico y ubicuo para explorar espacios de oportunidad multifactoriales. El DOE estadístico es un procedimiento eficiente para planificar experimentos de modo que los datos obtenidos puedan analizarse y arrojar conclusiones válidas y objetivas, lo que tiene muchas ventajas. El método Seis Sigma DMADV asistido por DOE se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 1-13. DOE se utiliza para evaluar la importancia de cada tolerancia en el tercer paso del método y predecir el rendimiento de salida máximo y mínimo en el quinto paso del mismo.

En la producción en masa de máquinas eléctricas, la consistencia del rendimiento de la máquina es un criterio clave para evaluar su calidad. Por lo tanto, minimizar la variación del rendimiento de la máquina es importante para mejorar la calidad de los productos finales. Sin embargo, en el proceso de fabricación de motores, existen muchos factores que afectan el rendimiento final del motor, como la consistencia del material, la precisión del mecanizado y la precisión del ensamblaje. Este artículo se centró en la precisión del mecanizado que es controlable en la etapa de diseño, asumiendo que otros factores son ideales y constantes. (Wu, Luk, & Fei, 2017).

Se considera que el artículo de Wu, Luk, & Fei (2017) muestra un proceso metodológico adaptable a la problemática que se tiene en el problema del caso de estudio, puesto que combina el uso de la metodología Seis Sigma de diseño DMADV como se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 1-13, la cual es asistida por un diseño de experimentos (DoE) en componentes de vehículos eléctricos cuya precisión del proceso afecta significativamente la respuesta, por lo tanto, se pretende que la metodología se adapte a este caso de estudio.

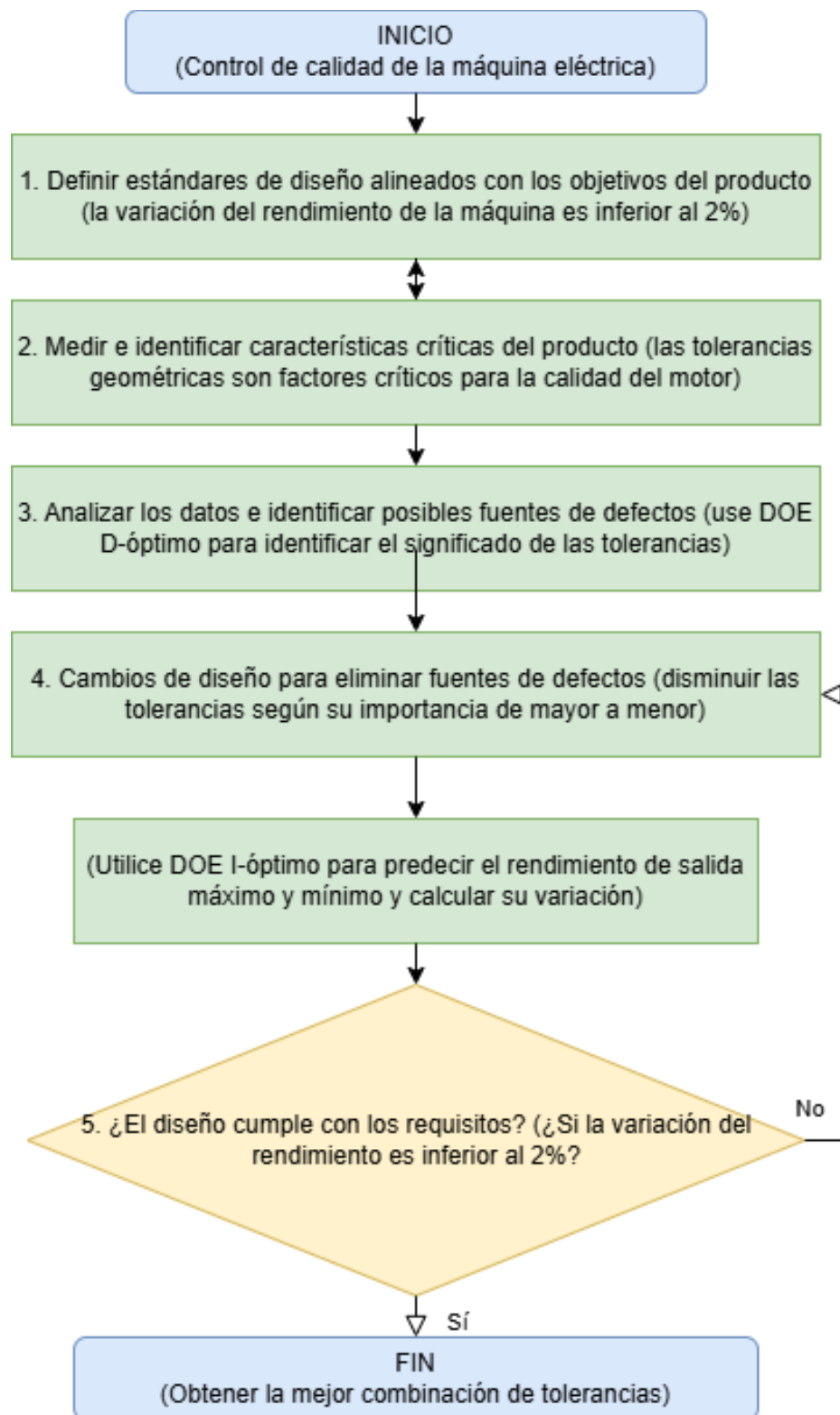


Figura 1-13: Diagrama de flujo del método Seis Sigma DMADV asistido por el DoE

Fuente: Traducido de (D. M. WU, 2017)

1.7 Alcance

Con base en los objetivos específicos del trabajo el alcance de este proyecto se limita al estudio de los problemas en áreas, procesos y procedimientos que estén relacionados con la variación de la resistencia. Se busca encontrar la causa o causas principales que afectan la variación de las resistencias con el objetivo de que se pueda minimizar la resistencia del adaptador para cumplir las necesidades específicas pedidas por el cliente.

Entre las acciones previstas, se encuentra realizar un diseño del experimento que compruebe la causa raíz, o causas, si es el caso.

Se pretende identificar la causa y verificar que se puede reducir la variación de la resistencia sin la implementación en el proceso de la compañía, pero realizar una propuesta de implementación en línea. La causa por la que el alcance no considera su implementación en la línea de producción reside en que los resultados de las pruebas podrían tener un tiempo de respuesta alto, por el hecho de que debido a las políticas de la empresa caso de estudio, los cambios en línea requieren de un estudio de impacto que se debe presentar al corporativo, se debe analizar el impacto en toda la empresa y se requiere de un permiso especial con un proceso burocrático largo y tardado, debido a que se trata de empresa traslacional. Sin embargo, cabe señalar que, a nivel local, el proyecto se considera estratégico, se cuenta con el apoyo de los responsables de la planta en San Luis Potosí y se espera lograr la autorización si se cumplen los objetivos de este trabajo de tesis. Sin embargo, por cuestiones de tiempo, como se mencionó anteriormente, no se desea establecer un compromiso que no se pueda alcanzar por factores fuera del control del autor.

La resistencia eléctrica que presentan los adaptadores de prueba para arneses de alto voltaje es importante ya que su valoración debe de presentar una resistencia muy baja o que tienda a cero puesto que estos aparatos son el puente entre la máquina que mide resistencia y el objeto a medir, en este caso es el arnés, si una lectura es alta se está considerando que el adaptador no afecta el valor real de resistencia que posee el arnés. Debido a esta razón, los adaptadores deben probarse en una parte del proceso donde se conozca este valor y se señale como valores que no afecten la medición final.

Capítulo 2. Estudio de los factores que intervienen en la variación de resistencia en adaptadores utilizados para pruebas de arneses de alto voltaje.

En este capítulo se presenta la definición de la metodología de este trabajo. El objetivo de esta sección es identificar las características de esta investigación con la finalidad de utilizar esta información en el planteamiento de la propuesta metodológica.

2.1 Planteamiento metodológico

El caso de estudio se caracteriza por ser una investigación aplicada, porque se sitúa en un caso real en una empresa automotriz ubicada en la ciudad de San Luis Potosí y está encaminada a la solución de problemas prácticos. El proceso que se pretende seguir es de tipo inductivo, ya que parte de un estudio general del componente con respecto a las variaciones de la resistencia, buscando identificar las causas para poder lograr una conclusión.

Este trabajo se ubica en la etapa final del proceso de la elaboración de los arneses de alto voltaje. El departamento que realiza los adaptadores que prueban estos arneses es autónomo e independiente a los procesos anteriores de la elaboración del propio arnés, por lo que le impide abarcar la totalidad del proceso y en caso de encontrar una causa en un proceso anterior solamente podría proponer la mejora al proceso en cuestión. Debido a esto, esta investigación es de tipo cuasi experimental ya que se pretende manipular una variable de resistencia eléctrica experimental y el grupo de estudio está localizado en el departamento de la empresa caso de estudio, por lo que los aspectos de aleatoriedad no están presentes.

Por su naturaleza, esta investigación es cuantitativa, debido a que hace uso de la estadística orientada a decisiones para el análisis de las variables que se van a estudiar.

Por su dimensión cronológica, es de tipo predictiva, ya que se busca realizar un análisis causal con base en fuentes metodológicas para la indagación sobre aspectos teóricos y aplicados de medición, estadística, recolección de datos, análisis, regresiones múltiples, y por ende cualquier

aspecto del proceso metodológico, teniendo lugar en un laboratorio de la empresa donde se desarrolla el estudio con el objetivo de identificar sus causas y posibles consecuencias si el problema no se resuelve.

Finalmente, se pretende seguir un enfoque correlacional, ya que se pretende analizar el comportamiento de las variables mencionadas y su influencia en la variación de la resistencia.

2.2 Desarrollo del modelo para el análisis de variaciones en componentes automotrices (MAV)

Para dar solución al objetivo principal de este trabajo de tesis, el desarrollo de la metodología se realiza mediante un análisis de los objetivos específicos establecidos para dar cumplimiento al objetivo general.

Análisis del primer objetivo específico

En el primer objetivo específico, se busca encontrar las causas de la variación de la resistencia por contacto entre los adaptadores de prueba y el arnés de alto voltaje, esto mediante un estudio del proceso de construcción de los dispositivos para prueba. Para este objetivo, se busca trabajar con un nivel de variable exploratorio, ya que se trata de encontrar las causas de la variación de la resistencia, que es la variable de estudio. En este apartado se pretende establecer un diagnóstico de los componentes usados en los adaptadores y su impacto en la medición de la resistencia eléctrica. El diagnóstico consiste en realizar una evaluación inicial al proceso, donde se define y se mide el proceso, lo que dará como resultado la identificación del problema y su caracterización.

Este apartado busca identificar los criterios para distinguir las variaciones de fondo en eventos de importancia, a través de técnicas para monitorizar el centro del proceso y su variación,

y así localizar la solución que tiene el mayor impacto. Una vez identificadas las causas, se priorizarán para diseñar la solución y la comprobación de estas causas.

Análisis del segundo objetivo específico

Lo que pretende este objetivo es adecuar el procedimiento de diseño para realización de adaptadores de alto voltaje e implementarlo en el proceso de diseño actual, buscando alcanzar los requerimientos del cliente con la solución encontrada. La variable de estudio es el proceso en sí y se trata de una variable de tipo explicativo, para desarrollar una propuesta de una guía de diseño, ya que esta instrucción permitirá definir el correcto proceso de diseño para de adaptadores de alto voltaje y se generarán las instrucciones que permitan incluir la solución en un nivel explicativo mediante procedimientos operativos estándar.

Análisis del tercer objetivo específico

Respecto al tercer objetivo específico, se pretende generar el procedimiento de implementación de la solución al proceso general de construcción de adaptadores para arneses de alto voltaje para lograr la estandarización del proceso. Implementando la nueva guía de diseño al proceso general se pretende alcanzar la estandarización del proceso, favoreciendo al cliente. En este apartado se pretende renovar el proceso para que cuente con el equipo, procedimientos y recursos necesarios para su implementación.

2.2.1 Desarrollo de la propuesta metodológica

La propuesta metodológica desarrollada es presentada mediante un diagrama de flujo vertical para su mejor comprensión. Los apartados de la metodología son presentados en etapas secuenciales para la resolución de la problemática.

Con la información obtenida del análisis de objetivos específicos, se desarrolló un mapa mental en donde se organizan las actividades y propósitos para dar cumplimiento a los objetivos

del trabajo de tesis. De igual manera, se enlistan las herramientas que se pretenden utilizar en cada actividad.

La estrategia consiste en organizar el proceso en tres apartados principales, con la finalidad de proporcionar una mejor organización, obteniendo más claridad en el proceso debido a la fácil identificación de las entradas y salidas. Las etapas son:

1. Diagnóstico del sistema
2. Diseño de la solución
3. Estandarización del proceso

El modelo desarrollado se presenta gráficamente en la Figura 2-1 mostrando la estrategia y secuencia mencionada.

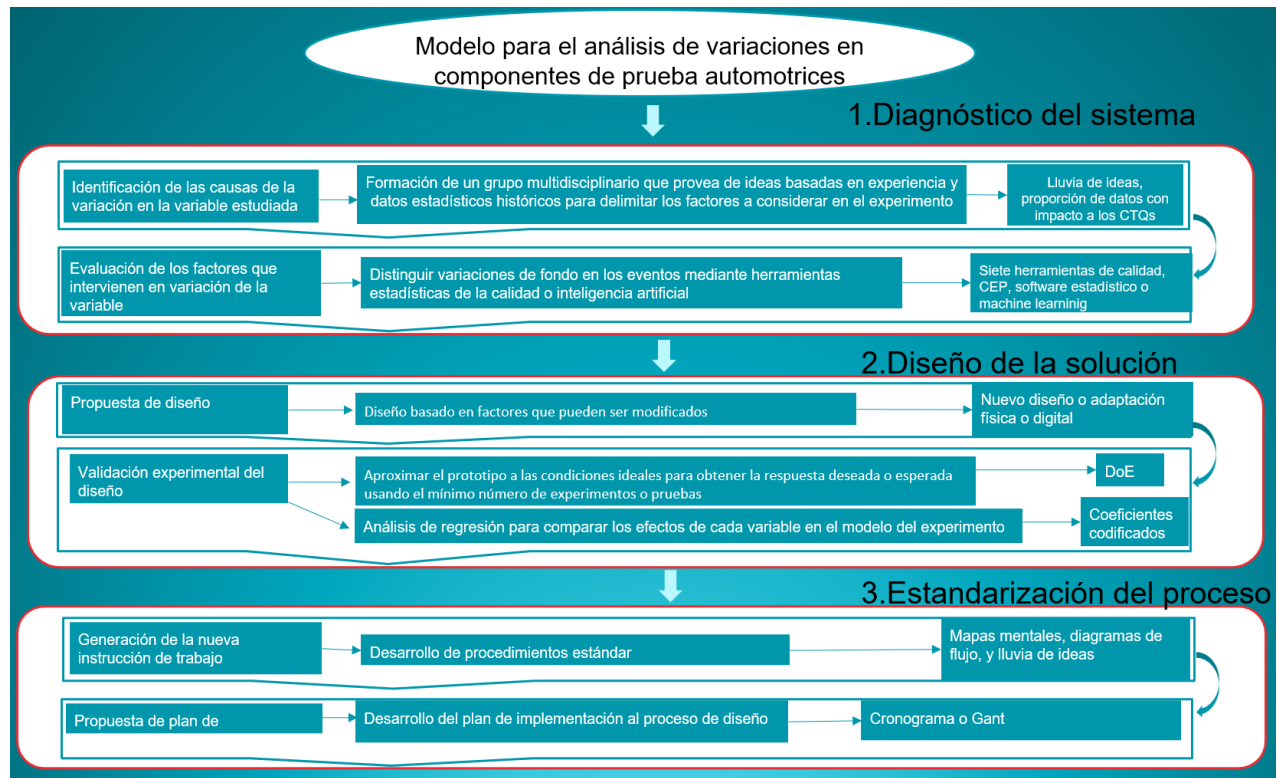


Figura 2-1: Modelo para el análisis de variaciones en componentes automotrices (MAV)

A continuación, se presentará a detalle en qué consisten estas etapas y que actividades se deben llevar a cabo para desarrollarlas.

Etapa 1: Diagnóstico del sistema

El objetivo de la etapa 1 de diagnóstico del sistema busca identificar los factores que intervienen en la variación de resistencia eléctrica en adaptadores de alto voltaje mediante un análisis experimental. Este trabajo pretende identificar las causas y factores que afectan a los adaptadores.

La etapa uno está compuesta por dos actividades:

- 1.1 Identificación de las causas de la variación en la variable estudiada
- 1.2 Evaluación de los factores que intervienen en variación de la variable

Enseguida se detallan estas actividades.

Actividad 1.1: Identificación de las causas de la variación en la variable estudiada

Consiste en identificar la causa raíz del problema o de la salida no deseada. Para el desarrollo de esta actividad, se recomienda la utilización de una herramienta para el análisis de procesos e identificación de problemas, como lo pueden ser el diagrama de pescado o Ishikawa o el análisis de modos y efecto de fallas (AMEF). Para su elaboración, se requiere la integración de un grupo de expertos en el tema, formado por personas que directa, o indirectamente, estén relacionadas en el problema dentro de la misma empresa; o bien, por un grupo de expertos contratados externamente o investigadores expertos en los temas específicos. La decisión de la conformación del grupo estará sujeta al presupuesto, al nivel de confidencialidad de la empresa donde se presenta el problema, así como el tiempo disponible para la solución del problema.

El grupo debe ser capaz de proveer información a partir de lluvia de ideas pudiendo ser datos teóricos o históricos acerca del problema y que tenga una relación de impacto a los críticos de la calidad del producto.

Actividad 1.2: Evaluación de los factores que intervienen en variación de la variable

Esta etapa tiene como objetivo evaluar la relación de las variaciones de las entradas propuestas con la o las salidas para tratar de filtrarlas o descartar las que no sean adecuadas en el

análisis y así determinar las principales variables independientes. Estas variables serán utilizadas para controlar el diseño de la solución; es decir, una vez obtenidos los datos propuestos u obtenidos históricamente, se buscará clasificarlos, ya sea cualitativa o cuantitativamente, para poder distinguir variaciones de fondo en los eventos. Dependiendo del presupuesto, el tiempo y la administración del problema, los datos se podrán procesar mediante herramientas estadísticas de la calidad, softwares estadísticos o herramientas de alguna disciplina del campo de la inteligencia artificial como lo es el *Machine Learning* que, a través de algoritmos, dota a los ordenadores de la capacidad de identificar patrones en datos masivos y elaborar predicciones de las posibles entradas, esto como un análisis predictivo

Etapas 2: Diseño de la solución

La meta de este apartado es la más importante, ya que es en esta etapa en donde se realizarán las pruebas, mediante variaciones de las variables de entrada involucradas con la finalidad de encontrar la variable, o la combinación de variables que permitan alcanzar los valores deseados a la salida del sistema.

Los dos principales apartados a desarrollar son:

2.1 Propuesta de diseño

2.2 Validación experimental del diseño

Actividad 2.1: Propuesta de diseño

El propósito de este apartado es construir o adaptar un prototipo físico en donde sea posible variar las variables de entrada para medir la respuesta, con la finalidad de establecer las relaciones o dependencias entre variables y definir las combinaciones que permitan obtener los valores deseados en la variable de salida. Para llevar a cabo esta tarea, las variables de entrada se llevan a sus valores máximos y mínimos para evaluar físicamente la influencia de las variables de entrada.

Para esta etapa se hace uso de la máquina, componente o sistema, variando los valores de las entradas identificadas en la etapa uno y se registran los valores de la salida, conforme se vayan

manipulando los factores de entrada. En caso de no poder modificar los valores de entrada con el sistema utilizado, se debe buscar la forma de realizar un nuevo prototipo físico o se debe realizar una adaptación, de manera que puedan manipular las variables para obtener la información necesaria.

Actividad 2.2: Validación experimental del Diseño

Una vez obtenido el diseño, se procede a realizar un diseño de experimentos (DoE), el cual tiene como intención evaluar, tanto el diseño propuesto del sistema como la variable de salida. El interés principal de la validación es verificar la congruencia de los datos conforme se vayan modificando las entradas, dando como resultado que el prototipo se aproxime a las condiciones ideales para obtener la respuesta deseada. En dado caso de que la variable de salida esperada por el DoE no pueda ser replicada por el sistema propuesto, o que la salida no convenza al equipo de estudio, debe de realizarse un cambio en el diseño, ya sea proponiendo completamente nuevas entradas, modificar los valores de las variables de entrada actuales o realizar incluso un rediseño del sistema dependiendo la respuesta obtenida.

Etapas 3: Estandarización del proceso

Una vez obtenidos los resultados esperados del experimento, es necesario asegurar que la solución generada pueda ser integrada al proceso y mantenerse con el paso del tiempo. Esto se logra mediante la estandarización de procesos. Para estandarizar los resultados, se procede con las siguientes actividades, con la finalidad de documentar los cambios:

- 3.1 Generación de la nueva instrucción de trabajo
- 3.2 Propuesta de plan de implementación

Actividad 3.1: Generación de la nueva instrucción de trabajo

Con ayuda del equipo multidisciplinario, a través de lluvia de ideas, se buscará la forma de que la nueva parte del proceso sea claro y aplicable para el personal involucrado en el cambio al sistema, con la finalidad de estandarizar el proceso. La elaboración de una instrucción de trabajo pretende integrar los resultados del tema central del trabajo de estudio y optimizar la respuesta.

Actividad 3.2: Propuesta de plan de implementación

Consiste, principalmente, en brindar la información necesaria para la adaptación del proceso actual al nuevo proceso, el cual sirva de guía para realizar los pasos necesarios para alcanzar la estandarización en un tiempo propuesto.

2.3 Definición de Indicadores

Para evaluar la respuesta del sistema, se hace uso de herramientas en las cuales se muestren indicios o señales de que los resultados sean valores confiables y que permitan evaluar hasta qué punto se están alcanzando los objetivos propuestos para la variable de salida.

Se recomienda que entre las herramientas en las que se puede apoyar el estudio sean:

Histograma

Un histograma es un diagrama de barras donde cada barra representa cómo se distribuyen los datos en una única categoría. Cada barra representa un rango continuo de datos o el número de frecuencias de un punto de datos específico. Ayudará a simbolizar el impacto de los datos y su distribución, así como observar cómo se está comportando la variable de salida. Los histogramas son utilizados para mostrar la distribución de esta manera ofrece una visión de grupo permitiendo observar una preferencia, o tendencia, por parte de la muestra o población por ubicarse hacia una

determinada región de valores dentro del espectro de valores posibles. Una variante del histograma es el polígono de frecuencias, que es similar a un histograma normal, pero con la diferencia de que se utiliza el elemento gráfico de área en vez del elemento gráfico de barra (IBM, 2021).

Gráfica de Pareto

Un diagrama de Pareto es una técnica que permite clasificar gráficamente la información de mayor a menor relevancia, con el objetivo de reconocer los problemas más importantes en los que se debería enfocar y solucionarlos. Este principio de Pareto establece que aproximadamente el 80% de los efectos proviene del 20% de las causas. Esta regla ha encontrado aplicación en diversos campos, siendo una herramienta valiosa en la gestión de la calidad y la toma de decisiones estratégicas. El diagrama de Pareto o también conocido como curva de distribución ABC, consiste en una gráfica que clasifica los aspectos relacionados con una problemática y los ordena de mayor a menor frecuencia, con lo que permite visualizar de forma clara cuál es la causa principal de una consecuencia. El diagrama de Pareto es una herramienta que facilita la identificación rápida de los factores que más afectan un proceso, producto o servicio. Gracias a esta capacidad, permite enfocar los esfuerzos de mejora en los aspectos más relevantes, lo que puede traducirse en resultados positivos en menos tiempo. Además, al mostrar visualmente la magnitud relativa de cada problema, ayuda a comprender mejor su impacto y a establecer prioridades en la asignación de recursos. Esta representación gráfica también mejora la comunicación entre los involucrados, promoviendo la colaboración en iniciativas de mejora continua. Finalmente, al dirigir los recursos hacia los puntos más críticos, se optimiza el uso del tiempo y se reducen los costos operativos (QuestionPro, 2024).

Este gráfico estadístico ayudará a descartar el 80 % de los datos que no afectan sustancialmente a la variable salida. Una vez que se desarrolló el experimento del caso específico, se comprueba si se hizo un buen análisis de las variables de entrada, así como evaluar si se comprendió el comportamiento de la salida y su interacción con las variables de entrada.

Ecuación de regresión

La regresión lineal es una técnica estadística utilizada para estimar el valor de una variable con base en otra. En este contexto, la variable que se desea estimar se denomina dependiente, mientras que la que se usa como referencia se llama independiente. Este tipo de análisis permite calcular los coeficientes de una ecuación lineal que relaciona una o más variables independientes con la dependiente, buscando minimizar la diferencia entre los valores predichos y los reales. El método más común para ajustar esta relación es el de mínimos cuadrados, que encuentra la línea que mejor se adapta a los datos emparejados. Una vez obtenida esta línea, se pueden hacer predicciones de la variable dependiente a partir de la independiente.) (IBM, 2024).

Los modelos de regresión lineal son fáciles de implementar y ofrecen una fórmula matemática clara que facilita la interpretación de resultados. Además, pueden aplicarse en diversas plataformas y lenguajes de programación, como lo son: R, MATLAB, Python, Sklearn, Excel, y herramientas como IBM SPSS Statistics, lo que los hace accesibles para distintos entornos académicos y profesionales.

La ecuación de regresión es utilizada para evaluar la salida contra cualquier valor de entrada y así obtener un panorama de que del valor esperado. Si el resultado no es repetible a través del tiempo es necesario realizar un estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) para descartar que sea por un defecto del sistema usado o del operador.

Estudio R&R

Los estudios R&R se aplican cuando es necesario verificar la precisión de los resultados obtenidos y eliminar la influencia de la variabilidad generada por el sistema de medición. Este tipo de análisis permite distinguir entre la variación causada por el propio instrumento conocida como repetibilidad y la que se origina por las diferencias entre los operadores que realizan las mediciones, denominada reproducibilidad.

Repetibilidad

De acuerdo con el VIM (Vocabulario Internacional de Metrología) la repetibilidad de resultados de mediciones es: “la proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando (pieza) bajo las mismas condiciones de medición” (JCGM, 2012). Donde estas condiciones son llamadas condiciones de repetibilidad. Las condiciones de repetibilidad incluyen: el mismo procedimiento de medición, el mismo observador, el mismo instrumento de medición, utilizado bajo las mismas condiciones en el mismo lugar y repetido en un periodo corto de tiempo. La repetibilidad puede ser expresada cuantitativamente en términos de la dispersión característica de los resultados.

Reproducibilidad

De acuerdo con el VIM (Vocabulario Internacional de Metrología) la reproducibilidad de resultados de mediciones es: “la proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurando (pieza) bajo condiciones de medición que cambian” (JCGM, 2012). Donde: una declaración válida de reproducibilidad requiere que se especifique la condición que cambia. Las condiciones que cambian pueden incluir: principio de medición, observador, instrumento de medición, patrón de referencia, lugar, condiciones de uso, tiempo. La reproducibilidad puede ser expresada cuantitativamente en términos de la dispersión característica de los resultados.

Un estudio R&R es el estimado combinado de la repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición.

Para llevar a cabo un estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R), es necesario seguir una serie de pasos estructurados. Primero, se deben seleccionar al menos dos operadores que realizarán las mediciones utilizando el instrumento que se desea evaluar. Luego, se elige un conjunto representativo de piezas del mismo producto, preferiblemente diez o más, que serán medidas varias veces por cada operador. Estas piezas deben reflejar la variabilidad histórica del proceso y presentar un comportamiento estadístico normal. A continuación, se define cuántas veces cada operador medirá cada pieza, siendo recomendable al menos cinco repeticiones. Las piezas deben etiquetarse y entregarse en orden aleatorio a los operadores para evitar sesgos. También es importante especificar el punto exacto de medición en cada pieza y el método que se utilizará. Durante el proceso, las mediciones deben registrarse sin que los operadores conozcan qué pieza

están midiendo ni sus mediciones anteriores, lo que requiere la supervisión de una tercera persona encargada de documentar los datos. Finalmente, se realiza un análisis estadístico de los resultados obtenidos, siendo el método ANOVA uno de los más eficaces para este tipo de evaluación. (Centro de Ingeniería de la Calidad, 2018).

El método ANOVA reparte la variación total (σ^2 total) de los datos en variación debida a la producción (σ^2 pieza), variación debida a la repetibilidad (σ^2 repetibilidad) y variación debida a la reproducibilidad (σ^2 reproducibilidad), finalizando este modelado matemático se evalúa si los resultados son o no estadísticamente significativos.

Gráficas de normalidad con estadístico Anderson Darling

El estadístico Anderson-Darling mide qué tan bien siguen los datos una distribución específica. Para un conjunto de datos y distribución en particular, mientras mejor se ajuste la distribución a los datos, menor será este estadístico (Minitab, 2024).

Las hipótesis para la prueba de Anderson-Darling son:

H0: Los datos siguen una distribución especificada

H1: Los datos no siguen una distribución especificada

Con el conjunto de datos obtenidos de nuestra salida y distribución en particular, mientras mejor se ajuste la distribución a los datos menor será este estadístico, por lo que si el valor p es menor que un nivel de significancia elegido p con valor sugerido de 0.05, entonces la hipótesis nula rechazará que los datos provienen de la distribución. Por tanto, si el *p-valor* para comparar los datos es igual a $0,000 < 0.05$, se toma la decisión de Rechazar la hipótesis nula H_0 . Es decir, que con un nivel de confianza del 95% existe suficiente evidencia para afirmar que alguna de las medidas difiere (Centro de Ingeniería de la Calidad, 2018).

El estadístico de Anderson-Darling también se puede utilizar para comparar el ajuste de varias distribuciones con el fin de determinar cuál es la mejor.

Coefficientes codificados

Un coeficiente describe la relación en tamaño entre un valor de predicción y un valor de respuesta. En esta tabla se codifican las variables en niveles altos y niveles bajos representando el cambio de la respuesta mostrando valores, las pruebas de significación y los intervalos de confianza para los coeficientes de modelos, obteniendo así, los estadísticos de el error estándar, el estadístico t y el intervalo de confianza facilitando la interpretación de los efectos de los factores sobre la variable dependiente.

Análisis de la varianza (ANOVA)

Esta técnica estadística se puede utilizar para evaluar si hay diferencias estadísticamente significativas en la media de más de dos grupos, y así evaluar la importancia de uno o más factores en sus niveles diferentes.

El análisis de la varianza utiliza el mismo marco conceptual que la regresión lineal. La principal diferencia proviene del tipo de las variables explicativas: en lugar de cuantitativas, aquí son cualitativas. En el ANOVA, las variables explicativas suelen denominarse factores. Dependiendo del número de factores, se puede realizar una prueba de ANOVA de un factor, pero también un ANOVA de dos factores o incluso un ANOVA de medidas repetidas. Un ANOVA de un factor tiene una variable explicativa, mientras que un ANOVA de dos factores tiene dos, y así sucesivamente. En todos los casos, la hipótesis nula del ANOVA es que la varianza de la variable dependiente no varía en función de las modalidades de los factores. Si no se puede aceptar la hipótesis nula, se puede concluir que los factores influyen significativamente en los valores de la variable dependiente (XLSTAT, 2024).

Diseño de experimentos

Un diseño de experimentos consiste en una serie de pruebas en las que se modifican deliberadamente las variables de entrada para observar cómo afectan las respuestas del sistema. Esta metodología permite analizar de forma sistemática los factores de proceso o de producto que

influyen en la calidad. Una vez que se identifican las condiciones y componentes que impactan el desempeño, es posible enfocar los esfuerzos de mejora en optimizar aspectos como la confiabilidad, la calidad o el rendimiento del producto.

Dentro de los enfoques más utilizados se encuentra el diseño factorial de dos niveles, conocido como 2^k , que permite estudiar entre dos y quince factores simultáneamente. Este tipo de diseño puede implementarse de forma completa, considerando todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores, o de manera fraccionada, utilizando solo una parte representativa de esas combinaciones. La elección entre uno u otro depende del número de factores y de los recursos disponibles. Por ejemplo, si se trabaja con menos de cinco factores, se recomienda un diseño completo para capturar todas las interacciones posibles. En cambio, si se analizan cinco o más factores, un diseño fraccionado con resolución V o superior puede ser más eficiente, ya que reduce el número de ejecuciones sin perder información relevante. También existe el diseño factorial completo general, que permite trabajar con factores que tienen más de dos niveles. Aunque este enfoque ofrece una visión más detallada, no se recomienda para la selección inicial de variables importantes debido a su complejidad y alto costo. Por otro lado, los diseños de mezcla son apropiados cuando el producto está compuesto por varios ingredientes y se desea estudiar cómo las proporciones afectan la respuesta. Estos diseños son comunes en la formulación de productos, donde la respuesta depende de la combinación de componentes. Finalmente, los diseños de superficie de respuesta se utilizan para refinar modelos existentes, especialmente cuando se sospecha que la relación entre variables no es lineal. Entre estos, destacan los diseños centrales compuestos y los diseños de Box-Behnken, que permiten ajustar modelos cuadráticos y explorar el comportamiento del sistema con un número reducido de ejecuciones experimentales. Además, el DoE incluye herramientas para la optimización de múltiples respuestas, lo que permite encontrar configuraciones que equilibren diferentes objetivos, como maximizar la calidad y minimizar los costos (Minitab, 2024).

Capítulo 3. Análisis de resultados

Como se describió en capítulos anteriores, el trabajo se centra en el desarrollo de un modelo para el análisis de variaciones de resistencia eléctrica por contacto en la elaboración de adaptadores de prueba para arneses eléctricos de alto voltaje. Para evaluar la propuesta, el modelo se implementó en una empresa que fabrica arneses y subcomponentes eléctricos que presentaba la problemática planteada, con la finalidad de validarlo experimentalmente. Este capítulo inicia con la presentación del caso de estudio y, posteriormente, cada una de las etapas y actividades se desarrollan siguiendo el modelo para ilustrar la forma en que éste se implementaría en casos particulares. De esta manera, el modelo puede extenderse a otros casos similares en donde se presenten variaciones de resistencia.

3.1 Presentación del caso de estudio

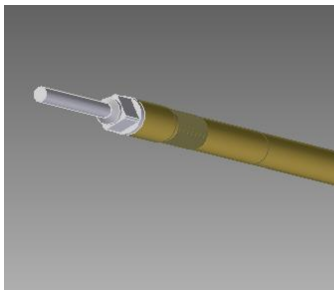
La empresa caso de estudio elabora mesas de prueba, también conocidos como bancos de prueba, las cuales contienen adaptadores de prueba para arneses de alto voltaje. En cada adaptador de prueba se inserta un conector del arnés y una vez hechas todas las conexiones, se realizan diversas pruebas; una de estas pruebas es la prueba de la resistencia eléctrica en el arnés. Específicamente, el problema que aquí se aborda es que se presentaron variaciones al medir la resistencia en los arneses. Estas variaciones se apreciaron cuando se realizaron diferentes diseños de adaptadores de prueba para mismas muestras de arnés que el cliente ha requerido. La metodología propuesta permite estudiar los factores que intervienen en la variación de la variable, siendo en este caso, la resistencia eléctrica en adaptadores de alto voltaje mediante un análisis experimental. Este trabajo se enfocó en buscar las causas y factores que afectan los adaptadores por medio del control estadístico del proceso en un análisis de capacidad de proceso.

3.1.1 Prueba de resistencia eléctrica en un adaptador de prueba

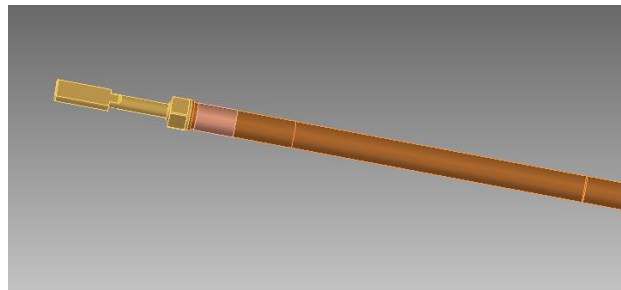
La prueba de resistencia eléctrica se realiza mediante el contacto que se hace con un pin dentro del adaptador, este pin alcanza la terminal interna del conector para establecer contacto, posteriormente el circuito se cierra conectando el adaptador y el otro extremo del arnés al equipo

especial de medición de resistencia eléctrica para los arneses de alto voltaje, que mediante el método de cuatro polos se hace pasar un voltaje y una corriente y así evaluar la resistencia que tiene el arnés en ese trayecto incluyendo cableado y todos los componentes que inherentemente posea el mismo arnés, por lo que la medida de resistencia eléctrica para cada modelo o parte de arnés requerido por el cliente dependerá de la longitud y componentes del arnés.

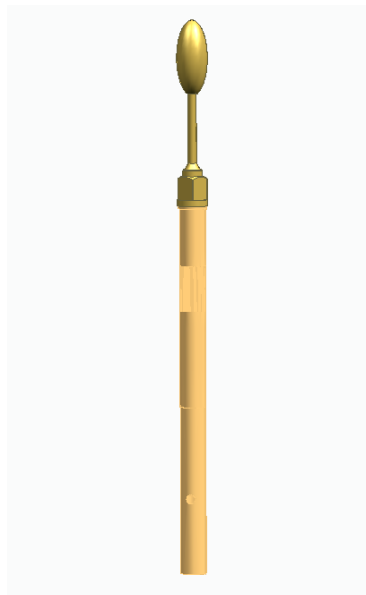
Debido a que existen muchos tipos de conectores, en la Figura 3-1 se muestran con varios modelos de pines que se seleccionan conforme a las terminales internas del conector para establecer el mejor contacto.



a)



b)



c)

Figura 3-1: Imágenes de pines de prueba a) cabeza redonda plana; b) cabeza plana; c) cabeza redonda.

Los conectores son usados para asegurar la conexión en las contrapartes y/o en los componentes del automóvil, en la Figura 3-2 a) se muestra que el interior del conector existen terminales las cuales están crimpadas al cableado interno del arnés para garantizar la continuidad a través de los cables de todo el circuito del tramo requerido, las cuales están ensambladas internamente en el conector de un arnés como se muestra en la Figura 3-2 b).

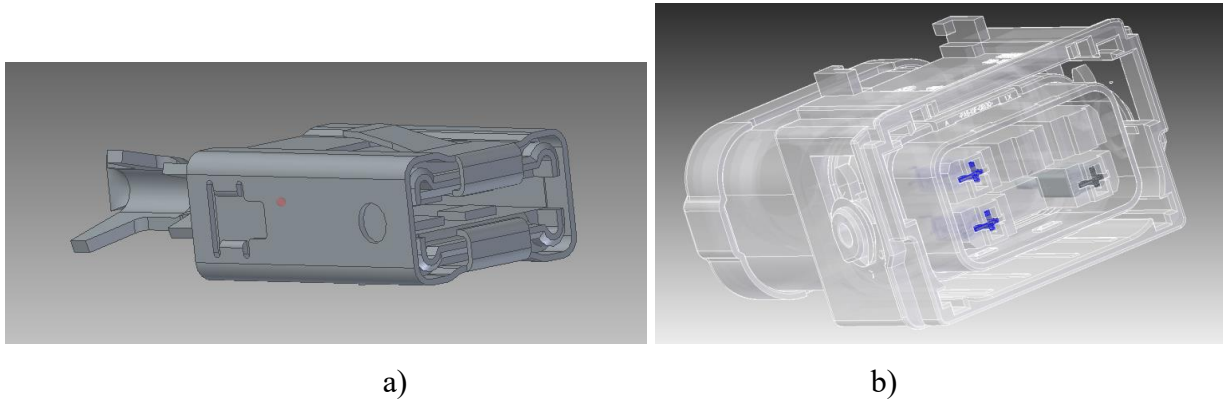


Figura 3-2: a) Imagen de un terminal interna de un conector de un arnés b) Imagen de un conector de un arnés con sus terminal interna.

Estos elementos pin de prueba y terminal de un conector se hacen traslapar cierta distancia de contacto entre ellos; dicha recomendación es hecha por proveedor de los pines de prueba. En la Figura 3-3 se muestra el traslape de ejemplo con una distancia de contacto de 0.7 mm entre un pin de prueba y un conector de un arnés.

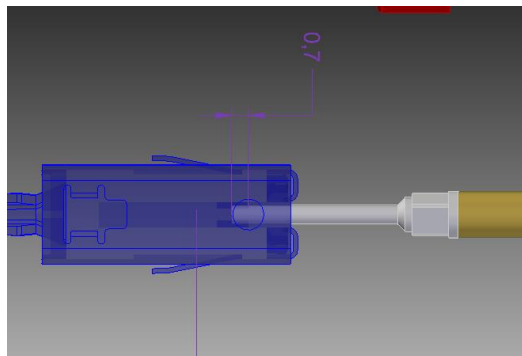


Figura 3-3: Imagen del traslape entre un pin de prueba y un conector de un arnés

En la Figura 3-4 se muestra como los pines se ensamblan en una pieza base maquinada del adaptador de prueba y el conector se inserta por la parte superior del adaptador de prueba.



*Figura 3-4: Vista de corte de un adaptador de prueba conectado a un conector de un arnés
(Ingun, 2024)*

Un banco de prueba está hecho por el conjunto de varios adaptadores de prueba en la Figura 3-5 y Figura 3-6 se muestran los adaptadores instalados dentro del banco de prueba, dependiendo del tamaño del arnés será el número de adaptadores por banco, según el cliente lo necesite en sus requerimientos.



*Figura 3-5: Imagen de dos adaptadores de prueba en un banco de pruebas
(Ingun, 2024)*

Para las pruebas de resistencia, en la Figura 3-6 se muestra como el banco de pruebas posee una computadora central que coordina las pruebas entre tramos del arnés, siendo estos en tramos parciales o totales.



*Figura 3-6: Banco de pruebas para arneses
(Ltd, 2023)*

3.2 Etapa 1: Diagnóstico del sistema

Para el desarrollo de la primera etapa se presentarán, a continuación, dos diseños de adaptadores de prueba en los cuales se realizó una comparativa en la prueba de resistencia eléctrica, ambos adaptadores de pruebas se realizaron sobre un mismo conector. La medida de resistencia depende de la distancia del cable de cobre y material de la terminal en el conector, para esta muestra el valor nominal es de $0.55 \text{ m}\Omega$.

El conector a probar fue el que se muestra en la Figura 3-7, este conector posee cuatro terminales. En este caso, para hacer las mediciones se necesitó la muestra (arnés) siendo el conector con cable, la máquina de medición y un adaptador de prueba, para este conector el cliente otorgó ciertos parámetros de la muestra, los que competen en este caso de estudio son el valor de la

resistencia eléctrica nominal el cual esta valorado en $0.55\text{ m}\Omega$ y el de la variación permitida para la lectura de la resistencia con un $+10\%$ del valor nominal, debido a posibles variaciones del arnés como su longitud de cable y los componentes internos que posee.

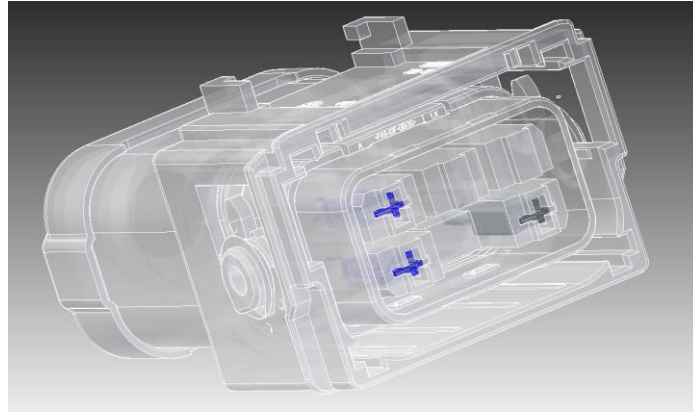


Figura 3-7: Imagen digital de conector de arnés muestra

Diseño número 1

Para las probar este arnés, las guías de diseño sugieren utilizar un pin con cabeza redonda plana para hacer contacto a esta terminal del conector, como el de la Figura 3-8, además de hacer un traslape de hasta 1.8 mm, todo esto para garantizar un mejor contacto.

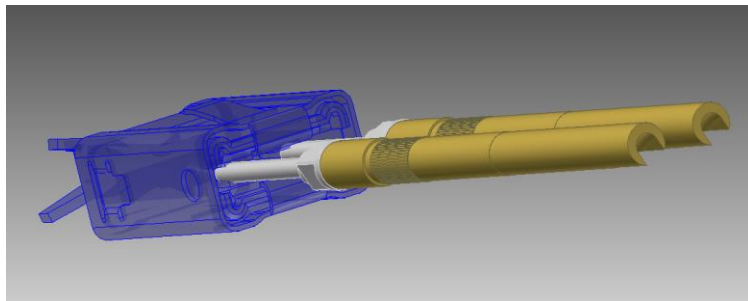


Figura 3-8: Imagen de pines de prueba haciendo contacto con terminal interna de un conector

Se apreció que la terminal del conector contaba con suficiente espacio para hacer contacto; sin embargo, la terminal solo alcanzaba a tener un traslape de 0.7 mm como se muestra en la Figura 3-9 debido a que la base del pin colisionaba con el conector debido a la forma que este posee, razón

por la cual, el conector no le permitía que entrara más el pin y que no se alcanzara a traslapar en su distancia recomendada de 1.8 mm .

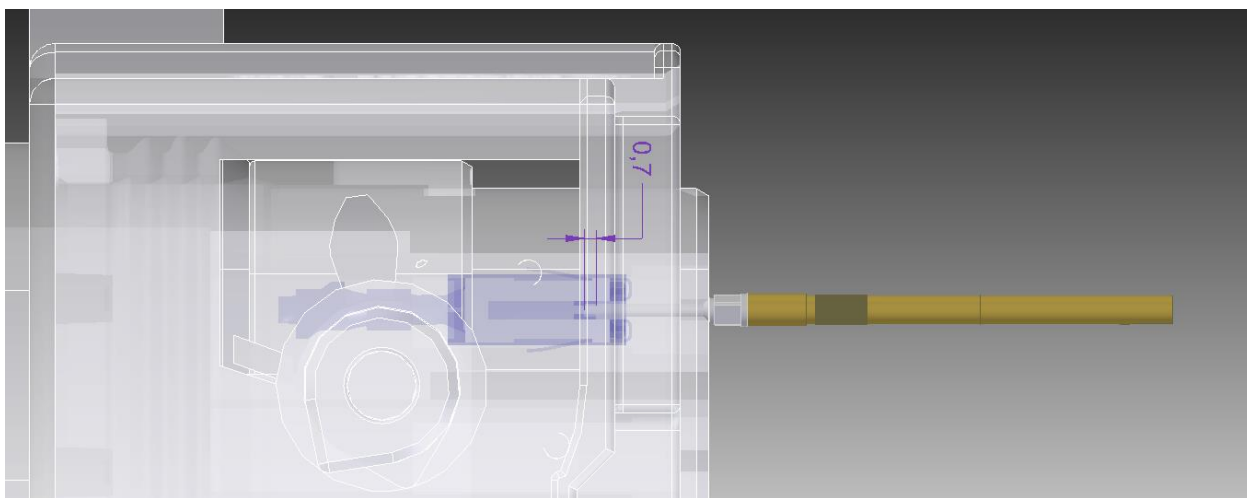


Figura 3-9: Imagen de pin haciendo traslape de 0.7 mm con conector de arnés

La medición de resistencia eléctrica obtenida bajo estas circunstancias fue de **0.7407 mΩ**, sin embargo, el arnés a probar basado en los parámetros del cliente se sobrepasaba **34.54 %** comparado con el valor nominal de la muestra de 0.55 mΩ, por lo que se tuvo que bloquear el prototipo para su análisis.

Diseño número 2

Debido a la forma interna del conector se tuvo que evaluar la funcionalidad de cambiar el pin que prueba para dicho conector. Para solucionar este problema el departamento de diseño decidió utilizar otro pin que es usado para otras terminales, aunque no fuera lo recomendado. Se encontró uno, con la cabeza plana y más largo como el de la Figura 3-10, el cual por su forma pudo introducirse entre la cavidad plástica del conector y de este modo hacer contacto con un mayor traslape en la parte interna de la terminal.

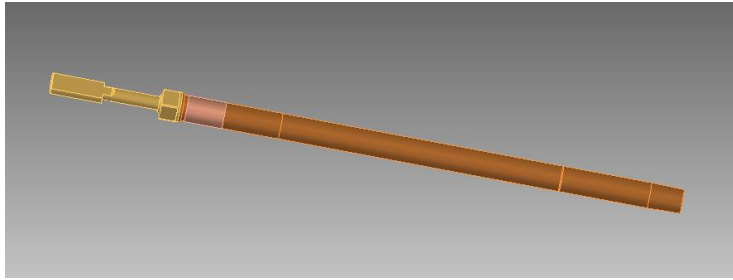


Figura 3-10: Imagen de un pin de prueba con cabeza plana para contactar un conector de arnés

Para el pin seleccionado la hoja técnica menciona hacer un traslape de hasta 2.15 mm contra la terminal a hacer contacto, observado en la Figura 3-11, por lo que se procedió a llevarlo a la distancia de 2.15 mm .

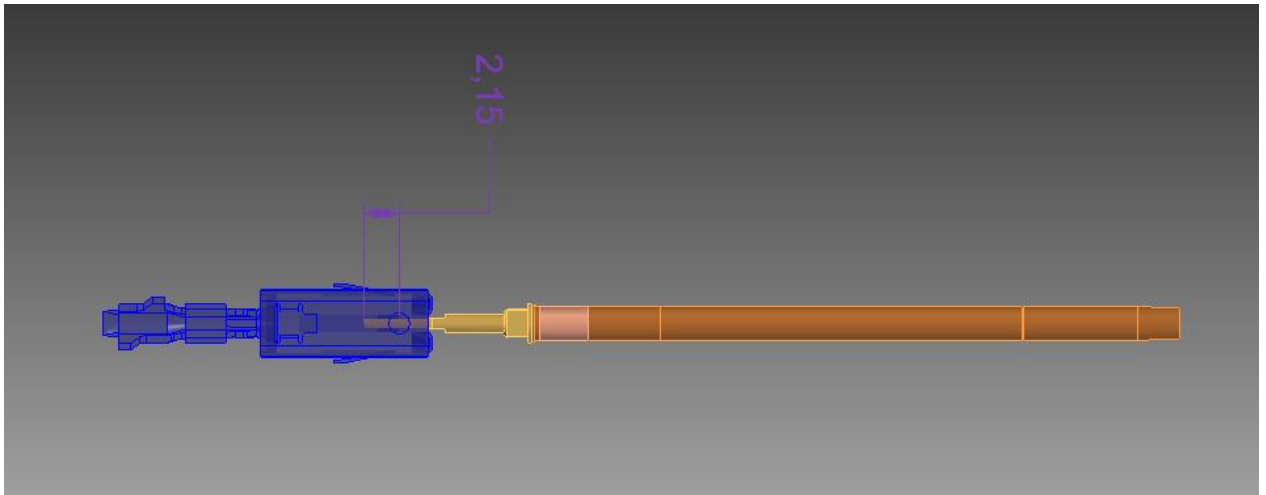


Figura 3-11: Imagen de traslape entre pin de prueba plano y terminal de conector

Con el nuevo pin de prueba propuesto y el traslape de 2.15 mm en el diseño, la medición de resistencia eléctrica fue de **0.5753 mΩ**, por lo que el nuevo diseño se acercaba aceptablemente con un **4.60%** de variación con la muestra original de 0.55 mΩ.

3.2.1 Identificación de las causas de la variación en la variable estudiada

La primera etapa consiste en identificar y evaluar los factores de las causas de la variación de la resistencia en adaptadores de prueba para arneses de alto voltaje, algunos factores se han ido

identificando como las modificaciones que se hicieron en diseño número 2 arriba mencionado en el apartado 3.1. Para llevar a cabo esta etapa, se convocó a un equipo multidisciplinario de los departamentos involucrados al momento de la liberación de un adaptador de prueba, siendo estos, un integrante del equipo de diseño, uno del calidad y otro de producción. Cada integrante, a través de experiencia y datos estadísticos históricos como los que se mostró de ejemplo en el apartado anterior proporcionó información acerca de los factores que más afectan a los adaptadores de prueba; esto, a través de una lluvia de ideas con la finalidad de delimitar los factores a considerar.

Se tiene una noción dentro de la empresa caso de estudio los principales factores que intervienen en la variación de la medición de la resistencia eléctrica, ya que se han fabricado adaptadores con anterioridad. Estos factores son los que han ido variando experimentalmente a través del tiempo, debido al número de proyectos que hasta el momento han sido desarrollados.

La herramienta principal utilizada es la lluvia de ideas, contando con la participación del equipo multidisciplinario descrito en el párrafo anterior. La identificación de las causas permite alinear los factores que afectan la resistencia con las necesidades del cliente y los críticos de la calidad del producto.

Las variables identificadas mediante la lluvia de ideas como posibles causas de la variabilidad de la resistencia fueron:

- *El traslape ejercido por la fuerza de presión en la terminal contra el pin:* cuando un pin y una terminal están en contacto, se efectúa un traslape entre ellos. El pin cuenta en su base con un resorte que provoca una fuerza para asegurar la conexión.
- *Método utilizado:* el método actualmente utilizado es el de 4 polos, explicado en el marco teórico. Se sabe que es el método más recomendado hasta el momento para la medición de la resistencia. Se evaluará la forma del cómo se está aplicando, si está implementado de manera correcta y se revisarán las recomendaciones de investigaciones donde el método es utilizado en alto voltaje.
- *Número de puntos de contacto:* debido a que se usa el método de 4 polos, se debe de tener al menos 1 par de puntos de contacto por cada adaptador. Es necesario evaluar si el número de pines utilizado en el dispositivo para pruebas afecta en la variabilidad de la resistencia por el área de contacto.

- *El material en pines de contacto:* los materiales utilizados son aleaciones en base a oro y titanio. Lo que se evaluará es estudiar si la aleación es la adecuada o, inclusive, buscar otras aleaciones usadas en dispositivos que trabajen a alto voltaje para estudiar su eficiencia.
- *El tipo de soldadura utilizada y método de aplicación:* al usar un pin, este debe ser fijado a la base del adaptador y debe ir soldado a cableado que se dirige a la estación de trabajo. Esta soldadura tiene que estar a más de 300 grados Celsius antes de su aplicación; se pretende evaluar como interviene en la resistencia, ya que pertenece al circuito.
- *La temperatura, la humedad y la máquina de medición:* las condiciones del ambiente, cuando se realiza la prueba, afectan y existe un margen recomendado por el proveedor de la máquina de medición. Resulta necesario verificar que se cumple con las recomendaciones y se debe verificar las afectaciones en la resistencia, e inclusive evaluar la calidad de la lectura de la máquina.

Una vez identificadas las posibles causas de variación se organizó la información en un mapa mental como el de la Figura 3-12, se procedió a analizar en conjunto la información histórica de otros diseños que habían surgido con anterioridad en la empresa en que se realizó el estudio contra los criterios de la lluvia de ideas, donde algunos factores como la soldadura y materiales de los pines se despreciaron ya que la variación que mostraban era menor al 3% o incluso no se podía medir por su porcentaje de variación no apreciable como en los factores de humedad y temperatura. Respecto al factor de método, en este caso el método de 4 polos, es el método adecuado para medir resistencia en el orden de $m\Omega$ ya que elimina las contribuciones de resistencia de la máquina, y por lo tanto, el factor máquina al tener todos los equipos certificados no podrían representar un factor a consideración de variación. Los factores de fuerza y área de contacto como se muestran en verde en la Figura 3-12, al ser modificados, los resultados de los diseños que se tenían registrados proporcionaban variaciones en porcentajes mayores a 20% sobre la lectura de los valores de resistencia inicial, estos resultados coinciden con los que se obtuvieron en los diseños analizados al inicio de la etapa de diagnóstico con una diferencia fue del 30.54% entre ambos diseños mostrados, lo que da razones para la investigación respecto al método de diseño de los adaptadores en la prueba de resistencia.

Específicamente, los factores que se modificaron entre ambos diseños descritos anteriormente en el apartado 3.1 son:

- El traslape sugerido por el proveedor para hacer contacto
- El área cubierta por el pin eléctrico debido a la forma del pin de contacto.

Se procedió a limitar el estudio a estos dos factores como las principales variables de la problemática para continuar con el desarrollo de la metodología propuesta del apartado 2.2.1 en este trabajo de investigación debido a que comparado contra el valor nominal de la muestra se obtuvo una diferencia en las mediciones casi del 30% entre ambos diseños, y que se conoce que en la empresa donde se realizó estudio, en ciertos diseños anteriores han sido principalmente estos dos factores modificados en los rediseños para disminuir el valor de la resistencia.

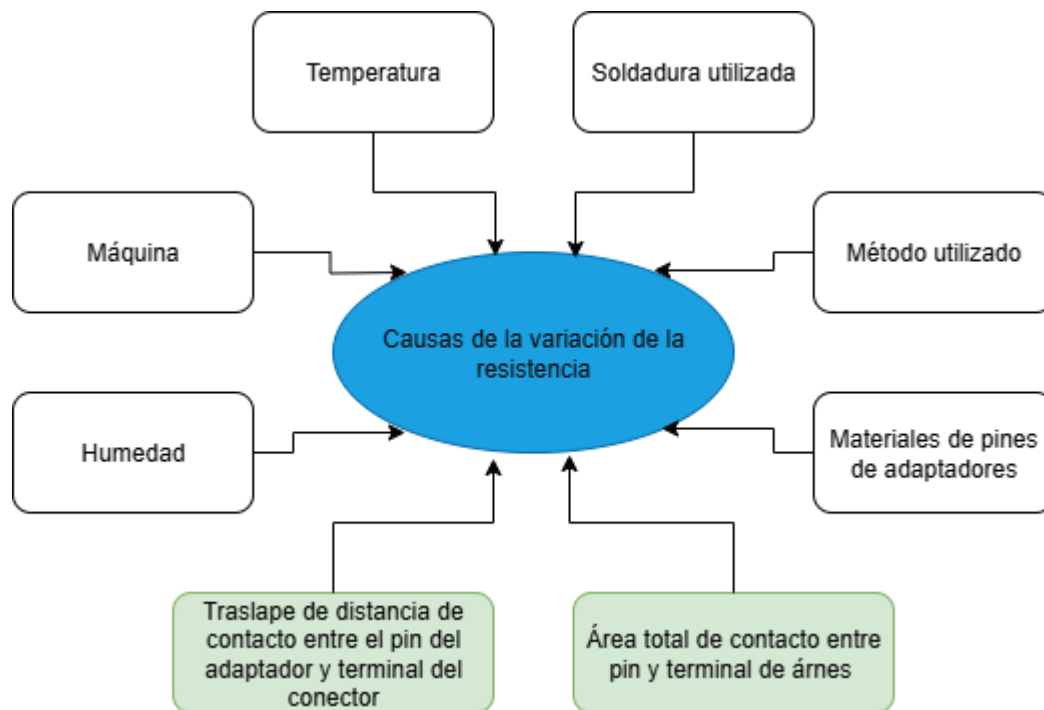


Figura 3-12: Principales causas de la variación de la resistencia eléctrica

3.2.2 Evaluación de los factores que intervienen en variación de la variable

Para continuar con el desarrollo del modelo, se enfocó en el estudio de estos dos factores traslape y área de contacto por lo que se procedió a comparar dos diseños de adaptadores de arneses de alto voltaje. La muestra que se mide en ambos prototipos es la misma y su valor nominal que se mide es de $0.55 \text{ m}\Omega$, a continuación, se muestra la Tabla 3-1 con sus respectivos resultados.

Tipo de pin	Valor de resistencia en mΩ	Porcentaje de variación
Pin de cabeza circular con 0.7 mm de traslape	0.7407	34.54 %
Pin de cabeza plana con 2.15 mm de traslape	0.5753	4.60 %

Tabla 3-1: Resumen de valores de resistencia en pines

Se procedió a evaluar los valores de resistencia de ambos diseños utilizando herramientas del control estadístico del proceso para un análisis formal. Si se desea utilizar la metodología propuesta para otra aplicación, se sugiere utilizar alguna de estas o herramientas o identificar el método más confiable para la medición, buscando recopilar los datos necesarios para la siguiente etapa, donde se permita cuantificar los parámetros.

Se tomaron 25 corridas de cada diseño y se procedió a recopilar datos, las mediciones arrojadas en la evaluación de los adaptadores se realizaron a través de la herramienta de Minitab llamada “*Process Capability Sixpack*” la cual está basada en las pruebas de estabilidad, normalidad y capacidad del proceso y que arroja gráficos simples.

Basado en las gráficas de capacidad de Minitab, como en las que se evaluaron en el caso expuesto en la parte de arriba se encontró como factores principales de variabilidad de la resistencia a:

1. Área total de contacto entre pin de contacto y terminal de conector del arnés; área medida a través de cantidad de puntos de contacto entre los componentes mencionados.
2. Fuerza de contacto entre pin de contacto y terminal de conector, medida a través de la distancia de empalme de dichos puntos de contacto.

Se evaluó la capacidad de los adaptadores dando como resultado las siguientes gráficas de la Figura 3-13 y la Figura 3-14.

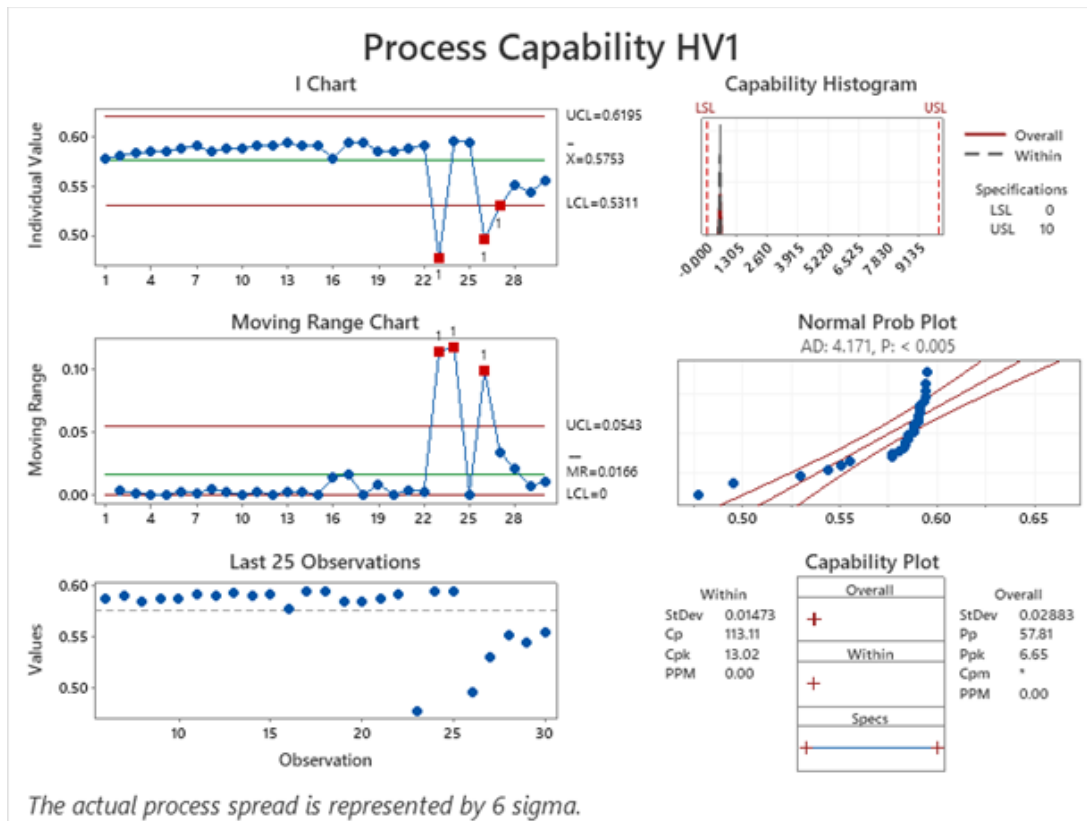


Figura 3-13: Análisis de capacidad de pin circular plano

En la Figura 3-13 se muestra la gráfica análisis de capacidad de pin circular plano donde la media nominal en el primer diseño se obtuvo un valor de resistencia promedio de 0.5753 mΩ con 3 puntos fuera de los límites de control siendo en su mayoría adecuados dentro de los límites.

En la Figura 3-14 se muestra el Análisis de capacidad para el segundo diseño con el pin plano, se obtuvo un valor de resistencia promedio de 0.7407 mΩ, con solo un punto fuera de los límites de control (punto rojo en la Figura 3-14) y los demás puntos se aprecian cerca del límite de control central.

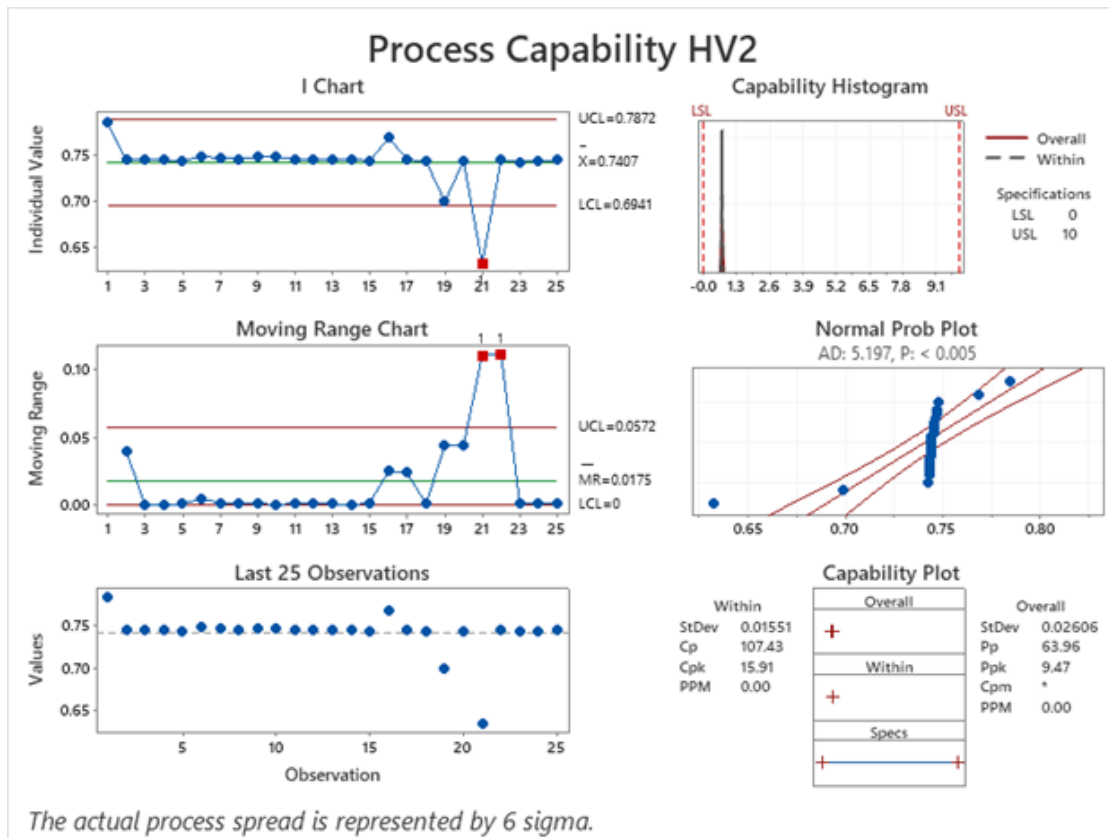


Figura 3-14: Análisis de capacidad de pin plano

En ambos diseños no hay normalidad en las gráficas de medición conforme a un valor de p de 0.05.

Los valores de CP, CPK, PP y PPK, con un valor de referencia en 1.33, se encuentran adecuados a la capacidad del proceso. Los puntos fuera de los límites de control en ambos diseños pueden ser porque el operador haya colocado con diferente presión el conector dentro del adaptador durante las corridas o algún otro factor, como ruido dentro del desarrollo del experimento. Los resultados clave de este análisis muestran que los resultados tienden a estar dentro de los valores centrales, por lo que se les consideró reproducibles en ambos experimentos y que sostiene que ambos diseños son predecibles. El porcentaje de repetibilidad es decir la variación entre cada inserción sin tomar los puntos fuera de control mencionados por el ruido del experimento serían de alrededor del 6% para el pin circular con valor de resistencia promedio de 0.7407 mΩ como se muestra en la gráfica de la Figura 3-13, y 5.5% para el pin plano con valor de resistencia promedio de 0.5753 mΩ del de la gráfica de la Figura 3-14.

3.3 Etapa 2: Diseño de la solución

La fase 1 de la metodología permitió la definición e identificación de las causas y factores que afectan la variación de la resistencia en los adaptadores de prueba para arneses de alto voltaje. Con esta información, se procede al diseño de la solución.

El material y muestras que se eligieron en la siguiente propuesta de diseño son materiales que cumplan con la idea de manipular ambos factores área y fuerza de contacto a través del traslape. A su vez, esta selección facilitó el ensamble y manipulación durante la experimentación, además de que también se disponía de suficientes piezas en el stock al momento de hacer el diseño, en dado caso de requerirse remplazos o para descartar que la muestra fuera defectuosa.

3.3.1 Propuesta de diseño

Se realizó el diseño con el apoyo del software Solid Edge generando a partir de ideas para la manipulación de los factores que tendrían que ser modificados. Como primeros pasos se seleccionó la muestra y el archivo CAD de un arnés de alto voltaje promedio mostrado en la Figura 3-15.

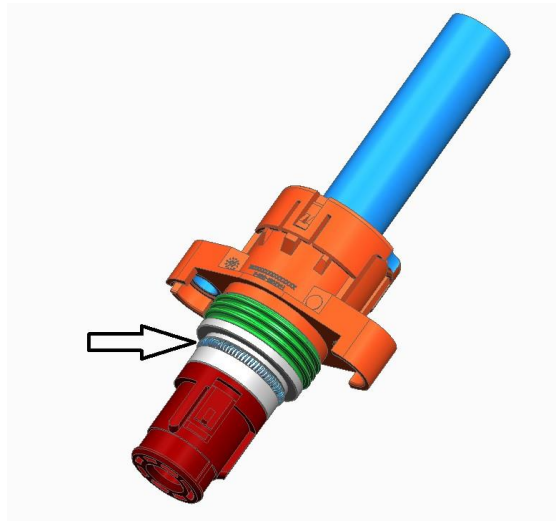


Figura 3-15: Conector con cable de muestra de arnés

Se seleccionó, de igual forma, un pin de contacto de prueba promedio usado en la mayoría de las pruebas de alto voltaje como el mostrado en la Figura 3-16, el cual es el recomendado por el proveedor basado para la mayoría de las formas de la terminales de los conectores de la empresa.

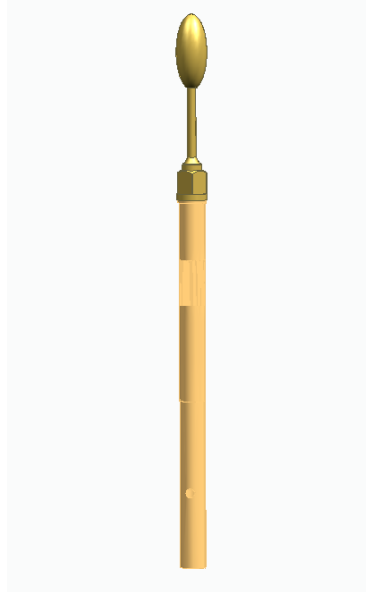


Figura 3-16: Pin de contacto de prueba

Se diseñó un dispositivo donde se pudiera variar los dos principales factores identificados:

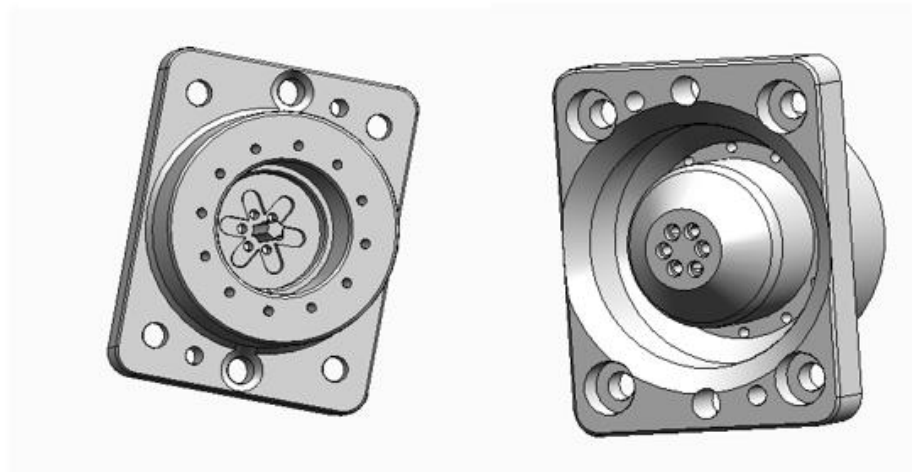
1. Área de contacto que se traduce a puntos o pines de contacto
2. Fuerza de contacto que se traduce a milímetros de traslape entre pin de contacto y terminal metálica de la muestra en el conector promedio de arnés de alto voltaje

A partir de la idea de cubrir los factores que afectan la respuesta y que el diseño sea funcional, se conceptualizó la solución mediante la propuesta de diseño de diseñar un dispositivo con una base fija y otra base móvil para controlar el traslape de distancia de contacto y la posibilidad de insertar y remover cierta cantidad de pines para modificar el área a través de puntos de contacto.

Este dispositivo es un ensamble electromecánico que consta de dos piezas maquinadas, una para la parte fija mostrada en la Figura 3-17 a), y una parte la parte interna móvil mostrada en la Figura 3-17 b).



a)



b)

Figura 3-17: Piezas maquinadas del dispositivo de prueba a) parte fija, b) parte móvil

Estas partes serían ensambladas una encima de otra para modificar la altura y poder manipular el área y el traslape de distancia de contacto.

Modificación de área de contacto

Para modificar el área de contacto, se instalaron pines de prueba sobre la parte móvil. Para poder realizar mediciones mientras se variaba el número de pines, buscando alcanzar mayor área

con los puntos de contacto seleccionados. Es importante mencionar que es necesario tener un par de puntos de contacto como mínimo, es decir 2 pines, debido al método utilizado para la medición de cuatro polos, ya que las medidas de resistencia son muy pequeñas.

Tomando en cuenta esto, en la Figura 3-18 se muestra el diseño con varias cavidades para poder insertar pines de prueba e ir variando el número de pines para generar varias configuraciones, buscando hacer pruebas con diferentes arreglos y evaluar los resultados).

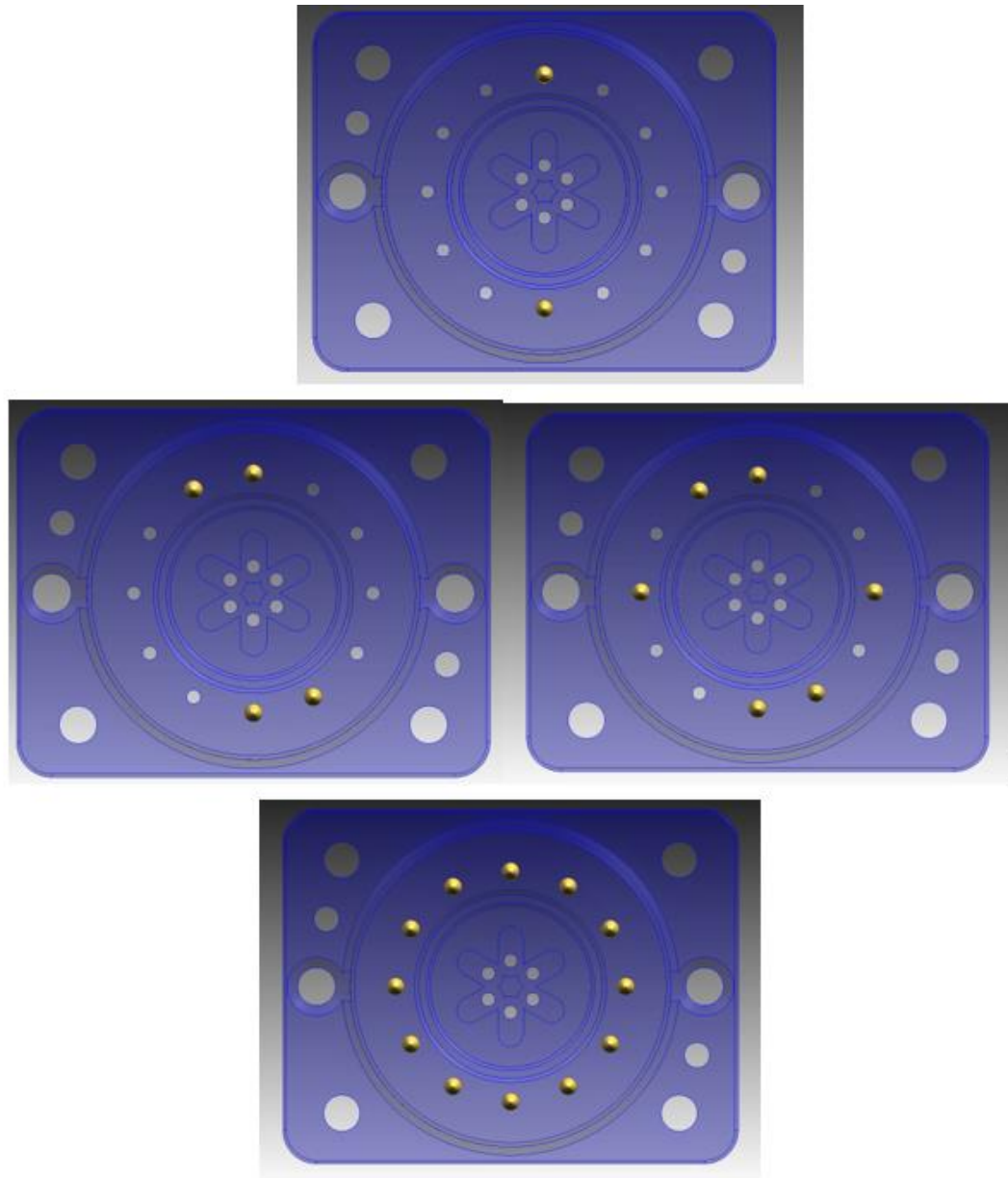


Figura 3-18: Inserción de diferentes pines sobre parte móvil

Modificación del traslape de distancia de contacto

Para modificar el traslape de distancia de contacto, se realizó con una variación de las alturas, lo cual se tradujo en un traslape mínimo en la altura del límite inferior y un traslape máximo en la altura superior del dispositivo. Para lograr esto, en su parte interna se cuenta con un arreglo mecánico que como se muestra en la Figura 3-19, mediante tornillos, puede subir o bajar la parte móvil vista internamente en color morado, que es la que contiene los pines de prueba. Dependiendo de la altura, se varía el traslape entre pin y la terminal. Se añadieron unos seguros de sujeción para sostener el conector del arnés, esto con la finalidad de mantenerlo fijo a lo largo de las pruebas.

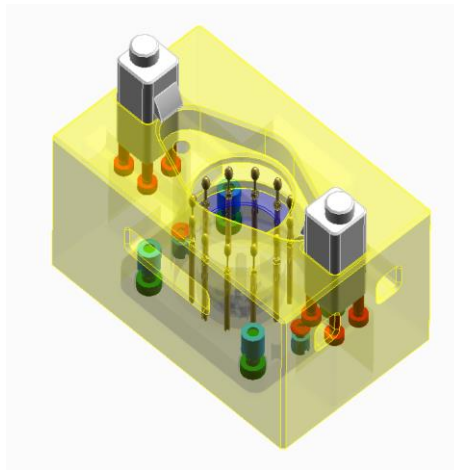


Figura 3-19: Ensamble parte fija y móvil

En la Figura 3-20 se muestra el dispositivo con el conector insertado, este es sujetado por los seguros. Los pines hacen contacto con el conector, se sueldan con cables y son guiados a la máquina de medición de alto voltaje

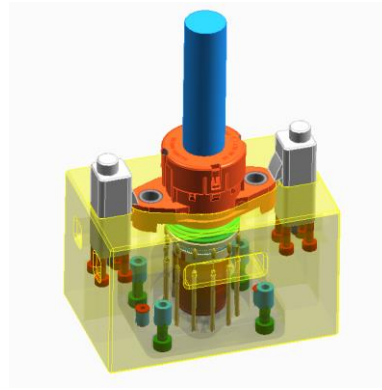


Figura 3-20: Ensamble final representando arnés entro del dispositivo

Para este pin se realiza un traslape horizontal, el proveedor de los pines recomienda no flexionarlos más de 0.7 mm, por lo que este valor representaría el traslape máximo. En las vistas de corte de sección de la Figura 3-21 se pueden apreciar los traslape de los pines contra la terminal del conector, dependiendo de la altura de la parte móvil del dispositivo; se ilustra un a) traslape bajo (0.02mm), b) medio (0.37mm) y c) alto (0.7mm), basado en la recomendación del fabricante. Para que esta medida fuera alcanzada, se modifica la separación entre el block móvil y el bloque fijo.

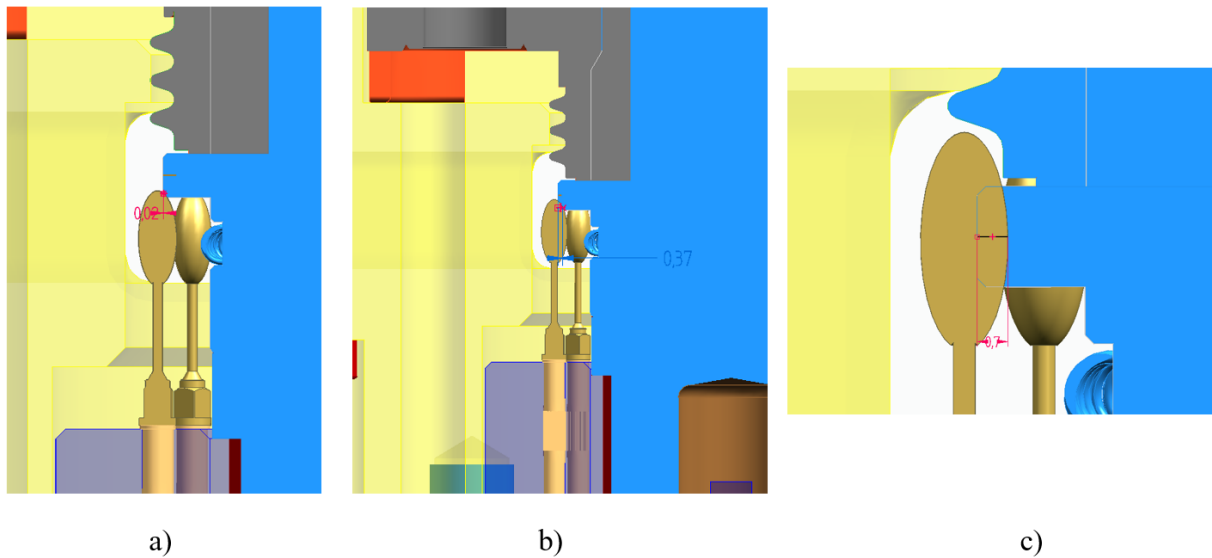


Figura 3-21: Diferentes traslapes de pin con terminal de conector

En la siguiente vista de corte de sección de la Figura 3-22, se puede apreciar como el conector está introducido en el dispositivo de prueba y está sujeto por los seguros, y como en este

caso existe un traslape de los pines contra la terminal del conector, la cual está a la mitad de la recomendación del fabricante con 0.37mm, para que esta medida fuera alcanzada, se separó el block móvil 2.7mm de la base del bloque fijo.

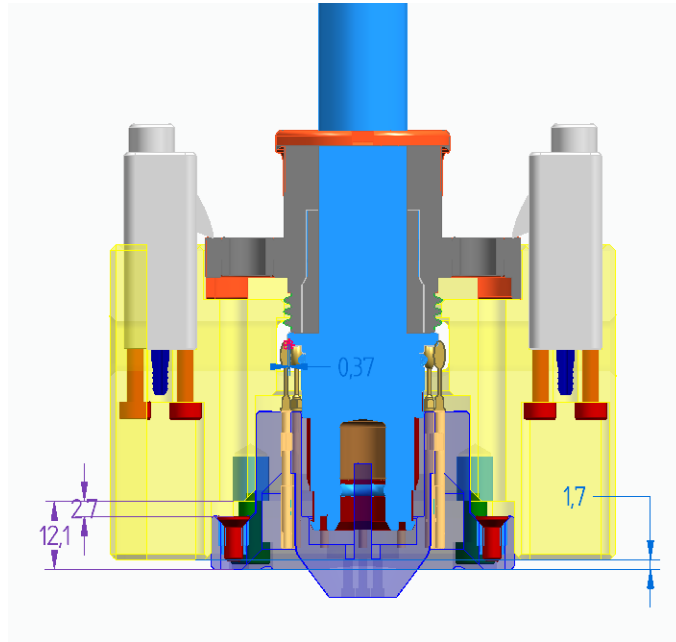


Figura 3-22: Vista de sección de dispositivo de prueba con conector
Fuente: Elaboración propia

En conjunto, con estos elementos del ensamble se obtuvo un diseño donde se puede variar la fuerza de contacto de cada pin a través del traslape, así como el área de contacto a través de cantidad de puntos de contacto.

3.3.2 Validación experimental del diseño

Para evaluar los factores de entrada, se consideraron los límites inferiores y superiores que se pueden controlar en el dispositivo, tanto para el área como para la fuerza. Se manipularon diferentes configuraciones para monitorear la respuesta.

3.3.3 Aproximar el prototipo a las condiciones ideales para obtener la menor resistencia usando el mínimo número de experimentos o pruebas

Para este apartado, se evaluaron los factores identificados en el apartado 1 (área de contacto y fuerza tangencial) usando la herramienta del Diseño de Experimentos (DoE), con la ayuda del software Minitab. Esta técnica es utilizada para diseñar las condiciones ideales del adaptador, buscando que pueda cubrir las necesidades del cliente con una mayor confiabilidad, reduciendo la variabilidad y aproximando la respuesta a un valor deseado, usando el mínimo número de experimentos. Se justifica el uso de la herramienta porque el resultado depende de una gran cantidad de ajustes y niveles en las variables que se mencionan, las cuales se deben ajustar para optimizar la respuesta del adaptador.

En la Tabla 3-2 Niveles que pueden ser utilizados para cada factor se presentan los niveles para controlar la variable de traslape de distancia de contacto, puesto que se puede modificar el traslape de los pines que realizan contacto con el conector del arnés en 3 niveles. También es posible modificar el área a partir del número de pines con que se hace contacto a la terminal en 6 niveles, por lo que los factores con sus respectivos niveles posibles a modificar son:

Área de contacto	Traslape de distancia de contacto
6 pares de pines	3 alturas propuestas
2	tangencial
4	mitad
6	fondo
8	
10	
12	

Tabla 3-2 Niveles que pueden ser utilizados para cada factor

Diseño factorial completo 2 x 3

Para conocer los efectos de los factores de manera general, se realizó un diseño de experimentos de tipo *diseño factorial completo 2 x 3*, el propósito de usar esta herramienta con estos niveles es obtener la mejor combinación de los dos factores que se están evaluando con niveles alto, medio y bajo como se muestra en la Tabla 3-3, y así, evaluar el comportamiento de la resistencia y verificar la aproximación que se acerque más al valor real de la muestra

Traslape de distancia de	
Área de contacto	contacto
6 pares de pines	3 alturas propuestas
2	tangencial
6	mitad
12	fondo

Tabla 3-3: Niveles utilizados para cada factor en un DoE 2 X 3

Tomando en cuenta que hay dos factores a modificar y que el tema central es desarrollar un diseño de experimentos lo más amplio posible. En primera instancia, se realizó un tipo de diseño factorial completo de tres niveles factoriales. Basado en la gráfica de diseño de experimentos de Minitab mostrada en la Figura 3-23 indica que se requiere de un diseño de base 2, 4 para que este se considere factorial completo.

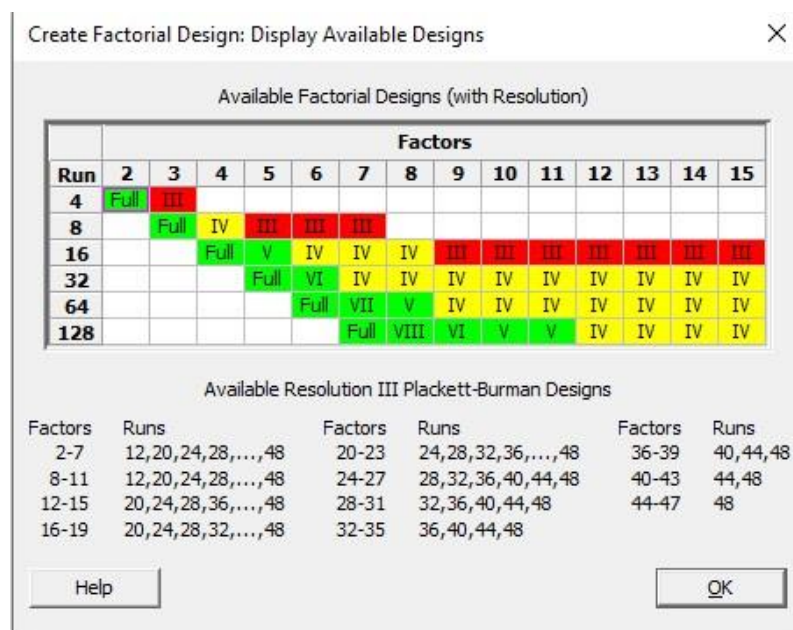


Figura 3-23: Opciones de configuración de diseño factorial

Continuando con el experimento en Minitab, se deben dividir los factores. Ambos factores son del tipo numérico como se muestra la configuración de la Figura 3-24, puesto que el tipo de dato permite hacer las divisiones en dichos términos.

Factor	Name	Type	Low	High
A	Distancia de c	Numeric	0.01	0.7
B	Puntos pares	Numeric	1	6

Figura 3-24: Configuración inicial en Minitab para DoE completo 2 x 3

En la Tabla 3-4 para el primer factor, se tiene como nivel bajo el punto tangencial y como nivel alto 0.7 mm de empalme, que es, la cantidad máxima de empalme propuesta por el proveedor de los pines. Para el segundo factor se especifica un nivel bajo de 1 par y nivel alto 6 pares de puntos de contacto, propuestas por el diseño físico.

Núm. factor	Factor	Nivel			
1	Distancia de contacto (Traslape)	Traslape de contacto	#1	#2	#3
			Tangencial	.35mm	0.7 mm
2	Puntos pares de contacto (área)	Cantidad de pares	#1	#2	#3
			1	4	6

Tabla 3-4: Experimento DoE factorial completo de con 2 factores y 3 niveles

Como se trata de predecir el comportamiento de la respuesta para el diseño factorial completo, es necesario evaluar al menos en 2 puntos en cada factor y esto sería suficiente para poder predecir el comportamiento matemático de la salida y poder correr el experimento en Minitab. Sin embargo, es posible realizar mediciones con más puntos centrales entre los niveles alto y bajo establecidos para obtener una respuesta más precisa, ya que se mejoraría la resolución

de la respuesta. Inicialmente, se realizó este experimento con diez réplicas, es decir, diez repeticiones del experimento, para minimizar el error experimental; dieciséis puntos centrales, para un mejor acercamiento a la curvatura y apreciación de la variabilidad. Se realizó el experimento en un solo bloque, puesto que todo el experimento se llevó a cabo en un mismo momento dentro de un cuarto aislado con temperatura y humedad constante y así, asumiendo que no había variaciones que pudieran afectar el experimento y que los otros factores que previamente habíamos mencionado en la lluvia de ideas no afectarían sustancialmente la respuesta, quedando como se muestra en la Figura 3-25.

Design Summary			
Factors:	2	Base Design:	2, 4
Runs:	56	Replicates:	10
Blocks:	1	Center pts (total):	16
All terms are free from aliasing.			

Figura 3-25: Resumen de la configuración del DoE completo 2 x 3

En total, se ejecutaron cincuenta y seis corridas, donde se fue registrando el resultado del valor de la resistencia y una vez que se completaron las corridas, se ejecutó el programa, dando los siguientes resultados:

Resultados del diseño factorial completo

Procediendo con el análisis del modelo en Minitab, el primer resultado que arroja es el nivel de predicción que tiene el experimento mostrado en la Figura 3-26. El modelo representa un porcentaje de confianza de 99.91% en la respuesta explicada por el modelo, con un 99.90 % de predicción para nuevas observaciones.

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.607607	99.92%	99.91%	99.90%

Figura 3-26: Resumen del modelo DoE completo 2 x 3

Ecuación de regresión

Se considera aceptable un modelo a partir de un resultado por encima del 80%, por lo que el cálculo en que se resume el modelo es el siguiente: a pesar de que el factor de predicción sea alto, se deben analizar, a profundidad, los datos restantes y los gráficos estadísticos para corroborar la información utilizada por el programa para hacer los cálculos matemáticos. En la Figura 3-27 se muestra la ecuación de regresión que describe el comportamiento de la resistencia calculada por Minitab.

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{Resistencia} = 938.595 - 1.9904 \text{ puntos pares de contacto} - 47.478 \text{ distancia de contacto} - 2.957 \text{ puntos pares de contacto} * \text{distancia de contacto} - 7.975 \text{ Ct Pt}$$

Figura 3-27: Ecuación de regresión del DoE completo 2 x 3

Grafica de Pareto

La información de la Figura 3-28 señala que el factor de el traslape de distanciade contacto es el que tiene mayor presencia en lo largo de las corridas del experimento. Sin embargo, Minitab pone una línea auxiliar marcada con un 2.0. Esta línea punteada indica que todo lo que esté a su derecha afecta la respuesta significativamente; la información que arroja es que, tanto cada factor A y B, como la su interacción entre ellos, AB tiene afectación en la respuesta significativamente.

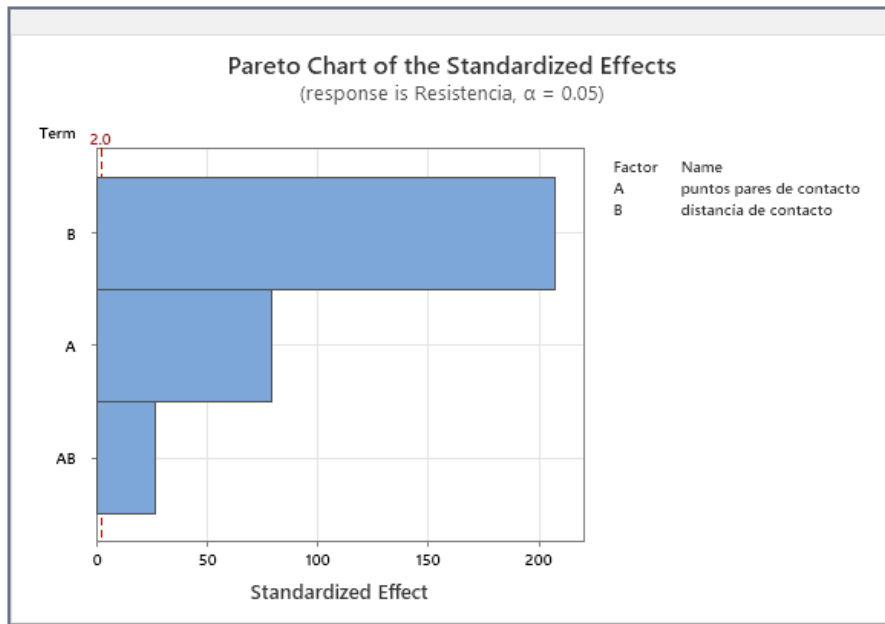


Figura 3-28: Gráfica de Pareto del DoE completo 2 x 3

Análisis de regresión por Coeficientes codificados

La información de la Figura 3-28 podría ser la buscada, pero tendría que analizarse con más detalle. En la tabla de coeficientes codificados de la Figura 3-29 muestra los coeficientes o efectos estimados de cada factor en el modelo de regresión y como afectan a la respuesta calculada por Minitab. Se puede observar que el efecto más significativo en la gráfica es el factor de *distancia de contacto*, con un valor decreciente de -39.9 unidades (marcado en rojo en la Figura 3-29); valor medido desde el punto más alto al bajo del mismo factor. Este factor se considera importante en el diseño de experimentos porque es el valor que decrece mayormente entre los 3 factores representados en la tabla por Minitab; el factor que le sigue es el de los puntos pares de contacto con -15.2 y al final el factor de interacción con un valor de -5.1 unidades.

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		911.100	0.096	9483.60	0.000
puntos pares de contacto	-15.2000	-7.6000	0.0961	-79.11	0.000
distancia de contacto	-39.9000	-19.9500	0.0961	-207.66	0.000
puntos pares de contacto*distancia de contacto	-5.1000	-2.5500	0.0961	-26.54	0.000
Ct Pt		-7.975	0.235	-33.89	0.000

Term	VIF
Constant	
puntos pares de contacto	1.00
distancia de contacto	1.00
puntos pares de contacto*distancia de contacto	1.00
Ct Pt	1.00

Figura 3-29: Tabla de coeficientes codificados del DoE completo 2 x 3

El error estándar del coeficiente estima la variabilidad entre las estimaciones del coeficiente que se obtendrían si se tomaran las muestras de la misma población una y otra vez, es decir, entre más bajo sea el error, más confiable es el efecto o factor. En este caso todos los factores y la interacción poseen el mismo error estándar con 0.0961, el cual se considera aceptable, ya que tener una variación de 0.0961 unidades no representa un cambio significativo para el efecto más grande de -39.9 unidades.

El valor de T, mostrado también en la Figura 3-29, es una relación entre el coeficiente y su error estándar, por lo que su valor de T es alto entre más diferente de cero sea, en los resultados los valores mostrados de T son significativos e incluso es mayormente significativo el valor distancia con -207.66.

Para el valor de P en la misma tabla, la hipótesis nula en un diseño de experimentos esta señalada por el valor de α , cuando se supera el valor propuesto de α en este caso de 0.05 se dice la hipótesis nula se rechaza y que el factor no tiene relación significativa con el valor de la respuesta medida durante el experimento. Para este diseño de experimentos todos los factores e interacciones son valores significativos para el valor de la respuesta resistencia.

En la gráfica de Pareto anteriormente mostrada de la Figura 3-28, el factor más significativo es de la distancia o traslape y a su vez en esta gráfica de coeficientes codificados representa una estimación de decremento mayor comparado contra el traslape y la interacción de ambos factores con un valor de -19.95.

Gráfica de efectos principales de la resistencia

Con los datos del modelo, se procedió a obtener la gráfica de efectos o factores principales en la medición de la respuesta o resistencia como se muestra en la Figura 3-30. Esta gráfica tiene como objetivo identificar las tendencias de los factores.

Se aprecia como la información en esta gráfica concuerda con la tabla de coeficientes codificados, ya que el valor resistencia para el factor distancia en la gráfica va de desde alrededor de 930 hasta 890m Ω lo que significa una variación de -40m Ω , coincidente con la variación de -39.9m Ω de variación que se mostró en la tabla de coeficientes codificados. En el caso de los puntos pares o área de contacto, la variación oscila alrededor de los -15.2 unidades, con los valores de 900 a 920m Ω aproximadamente, por lo que la afectación es menor.

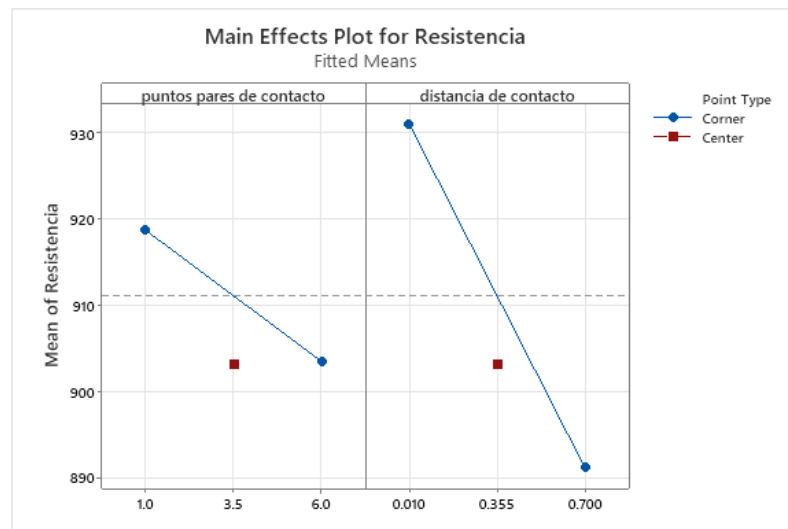


Figura 3-30: Gráfica de efectos principales de la resistencia del DoE completo 2 x 3

Gráfica de interacción

Adicionalmente, se generó la gráfica de interacción AB mostrada en la Figura 3-31, donde se analiza la interacción de los 2 factores contra la respuesta siendo la resistencia.

Teniendo en consideración que el valor buscado en el diseño de experimentos tiene como propósito que se obtenga la combinación de factores que provean el menor valor de la resistencia, se observó que alcanza el valor más bajo en $880\text{m}\Omega$ cuando se tiene un traslape de 0.7 mm (ver línea verde punteada en la Figura 3-31) y el área de contacto mayor de 6 puntos pares de contacto (ver eje horizontal en la gráfica en la Figura 3-31); sin embargo, como en el caso anterior, no arroja valores en los puntos centrales, por lo que no está generando información concluyente.

Cabe resaltar que la gráfica de la Figura 3-31, a pesar de no haber generado información concluyente, proporcionó información muy relevante para este estudio, ya que, no generó información en los puntos centrales de las gráficas, razón por la cual este experimento, a pesar de tener una información completa y correcta en las gráficas de Pareto y la tabla de coeficientes codificados, debería generar divisiones en los puntos centrales para que la información pueda considerarse confiable, mostrando una tendencia y continuidad en la gráfica de los efectos o factores, tanto individuales como con sus interacciones, en los niveles alto medio y bajo.

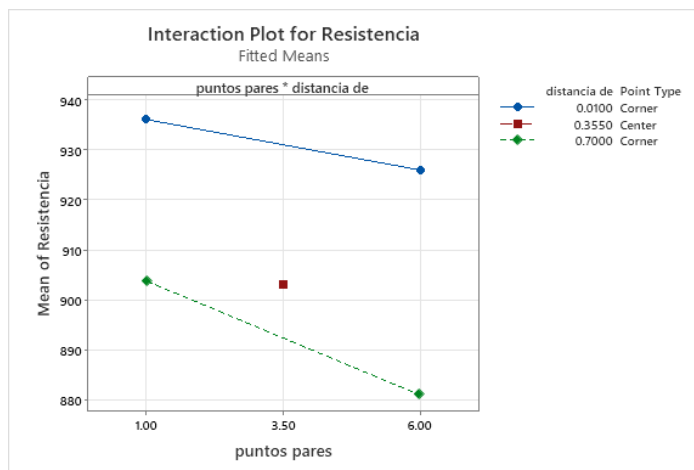


Figura 3-31: Gráfica de interacción del DoE completo 2×3

La gráfica mostró que la información de los factores que están interviniendo en la medición de la resistencia; sin embargo, en los puntos centrales no define la causa de las variaciones por

completo, razón por la cual se debiera de separar en más puntos centrales para obtener información en valores intermedios.

Conclusión del diseño factorial completo 2 X 3

Como no se conoce con exactitud que la solución que brinde este experimento sea suficiente, porque la solución obtenida no brindó una información clara del comportamiento de la resistencia en los puntos centrales de los factores evaluados, es necesario proponer otro experimento de más afinidad en los puntos centrales, como es el caso de usar por completo los niveles totales que permite el prototipo en el factor área, y volver a evaluar gráficas y resultados con la nueva configuración del experimento.

Se procedió entonces a elaborar un DoE de tipo diseño factorial completo multinivel para brindar más información entre estos puntos centrales, ya que se puede capturar un mayor rango intermedio de valores entre el factor área, y que, para este caso específico, el prototipo utilizado permite ampliar ese factor y así proporcionar más información en ese factor factores y sus interacciones.

Diseño factorial completo multinivel

Los diseños factoriales completos multinivel se utilizan en situaciones complejas en las que se requieren analizar los factores con más de dos niveles de significancia. Esto sucede comúnmente cuando en alguno de los factores necesita más información.

Debido a que no se pudo saber con certeza lo que sucedió en los puntos centrales en el experimento anterior, se tomaron los 6 niveles del factor 2 de puntos pares de contacto y se organizó un nuevo conjunto de valores, que se muestra en la Tabla 3-5.

Núm. factor	Factor	Nivel						
1	Distancia de contacto (Traslape)	Traslape de contacto	1	2	3			
			Tangencial	.35mm	0.7 mm			
2	Puntos pares de contacto (área)	Cantidad de pares	1	2	3	4	5	6
			1	2	3	4	5	6

Tabla 3-5: Experimento Diseño factorial completo multinivel

En la Figura 3-32 se muestra la configuración del nuevo experimento donde se tomaron tres réplicas, es decir, tres repeticiones del experimento para minimizar el error experimental y no cargar demasiada información. Con los seis niveles en el área o puntos de contacto, y los tres niveles en el área se requiere una corrida base de dieciocho muestras; con esto, se pudo averiguar qué sucede con mayor claridad en los puntos centrales y apreciar la curvatura o proyección de la respuesta.

Design Summary

Factors: 2 Replicates: 3
Base runs: 18 Total runs: 54
Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 6, 3

Figura 3-32: Resumen del experimento diseño factorial completo multinivel

Resultados del diseño factorial completo

Procediendo con el análisis del modelo en Minitab el primer resultado que arroja es el nivel de predicción que tiene el experimento mostrado en la Figura 3-33. El modelo predice que se puede alcanzar un porcentaje de confianza de 99.81% en la respuesta explicada por el modelo, con un 99.71 % de predicción para nuevas observaciones.

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.971825	99.87%	99.81%	99.71%

Figura 3-33: Resumen del modelo del DoE completo multinivel

Ecuación de regresión

La ecuación de regresión es más compleja a la anterior, debido a que se le agregaron más niveles para cada factor. El resultado del cálculo en que se resume el modelo es el siguiente de la Figura 3-34.

Regression Equation

Resistencia = 905.056 + 13.389 puntos pares de contacto_1 + 7.278 puntos pares de contacto_2
 - 1.944 puntos pares de contacto_3 - 7.611 puntos pares de contacto_4
 - 5.833 puntos pares de contacto_5 - 5.278 puntos pares de contacto_6
 + 24.167 distancia de contacto_1 + 0.556 distancia de contacto_2
 - 24.722 distancia de contacto_3
 - 6.278 puntos pares de contacto*distancia de contacto_1 1
 - 2.000 puntos pares de contacto*distancia de contacto_1 2
 + 8.278 puntos pares de contacto*distancia de contacto_1 3
 - 3.167 puntos pares de contacto*distancia de contacto_2 1
 + 0.778 puntos pares de contacto*distancia de contacto_2 2
 + 2.389 puntos pares de contacto*distancia de contacto_2 3
 + 2.389 puntos pares de contacto*distancia de contacto_3 1
 + 6.000 puntos pares de contacto*distancia de contacto_3 2
 - 8.389 puntos pares de contacto*distancia de contacto_3 3
 + 2.389 puntos pares de contacto*distancia de contacto_4 1
 + 5.000 puntos pares de contacto*distancia de contacto_4 2
 - 7.389 puntos pares de contacto*distancia de contacto_4 3
 + 2.611 puntos pares de contacto*distancia de contacto_5 1
 - 2.111 puntos pares de contacto*distancia de contacto_5 2
 - 0.500 puntos pares de contacto*distancia de contacto_5 3
 + 2.056 puntos pares de contacto*distancia de contacto_6 1
 - 7.667 puntos pares de contacto*distancia de contacto_6 2
 + 5.611 puntos pares de contacto*distancia de contacto_6 3

Figura 3-34: Ecuación de regresión del DoE completo multinivel

Gráfica de Pareto

En el grafico de Pareto de la Figura 3-28 (primer experimento), se observaba que el factor distancia o traslape de contacto es el que tenía mayor presencia en lo largo de las corridas del experimento.

Para este experimento, la línea punteada auxiliar, mostrada en la Figura 3-35 de Minitab, con valor de 2.03, indica que la respuesta se ve modificada significativamente nuevamente por cada factor A y B como la su interacción entre ellos, pero en este caso tienen el mismo valor de significancia.

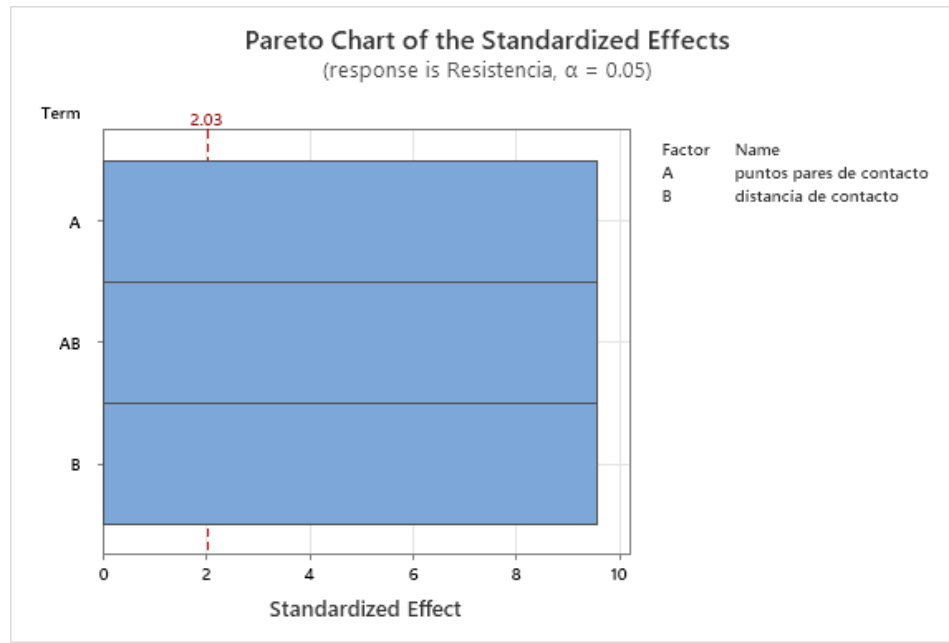


Figura 3-35: Gráfica de Pareto del DoE completo multinivel

Gráfica de efectos principales de la resistencia

Se obtuvo la gráfica de interacción de los dos factores contra la respuesta de la Figura 3-36, en este gráfica ahora es posible observar la proyección de la resistencia en los puntos centrales; en este experimento sí se logran apreciar las curvaturas y líneas continuas que forman el área y distancia con relación a la resistencia. En el análisis por separado, el valor cercano al valor real de la muestra durante las corridas se obtuvo cuando se seleccionaron los factores de traslape o distancia en la posición 3, la cual está valorada en 0.7mm.

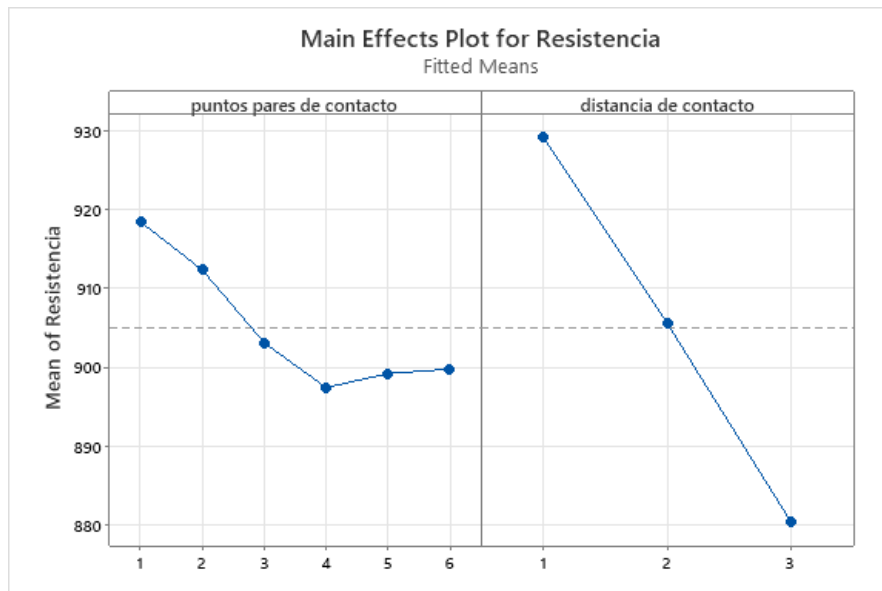


Figura 3-36: Gráfica de efectos principales de la resistencia del DoE completo multinivel

Gráfica de interacción

Del mismo modo que en el experimento anterior, en la Figura 3-37 se muestra la nueva gráfica de interacción, donde se puede observar que la interacción de los 2 factores ahora es continua durante todas las corridas del experimento y alcanza un valor menor de la respuesta, alrededor de los 867 mΩ cuando se tiene un traslape en la posición 3 de 0.7 mm y el área de contacto de 4 puntos pares de contacto y no de la mayor área de contacto como se tenía en la gráfica anterior. En esta gráfica se ha alcanzado el valor más cercano al valor real de la muestra.

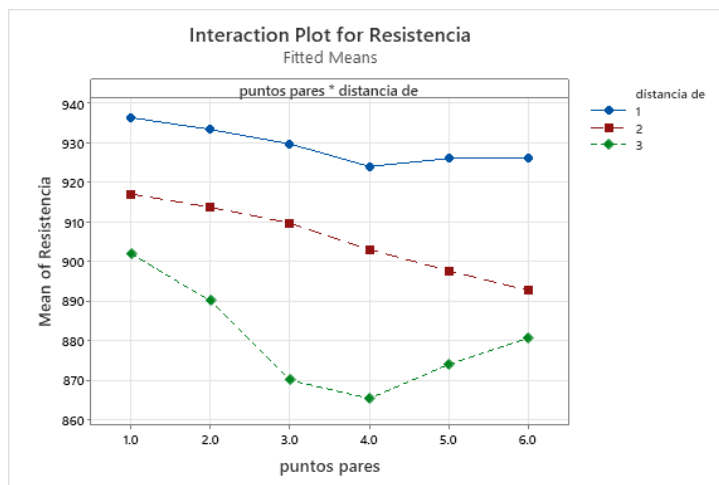


Figura 3-37: Gráfica de interacción del DoE completo multinivel

Optimización de la respuesta

Con los resultados obtenidos en el paso anterior, se procedió a optimizar el resultado para la resistencia más cercana al valor real. En este caso se muestra la información en la Figura 3-38, Minitab usa el valor más pequeño encontrado dentro del experimento, por lo que los parámetros se configuran a 865mohms, dando como resultado que la situación ideal sería usar 4 pares y estar a la distancia más profunda, de 0.7mm. La respuesta que se estaría esperando es de 865.333mΩ, con un intervalo de confianza y de predicción del 95%, basado en los datos procesados, el valor podría caer entre 863.057mΩ y 867.609mΩ.

Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
puntos pares de contacto	4			
distancia de contacto	3			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Resistencia	865.333	0.561	(864.195, 866.471)	(863.057, 867.609)

Figura 3-38: Optimización de la respuesta del DoE completo multinivel

Conclusión del diseño factorial completo multinivel

Cuando se expandió el área de contacto en el experimento, se amplió la información de las interacciones, e incluso se concluyó que no necesariamente se requiere de mayor contacto y mayor fuerza para alcanzar la resistencia más baja. Esta respuesta es más confiable, basada en los resultados de las gráficas de interacción, que son continuas en los valores intermedios para este experimento, por lo que se procedió a una evaluación final con un análisis de regresión con la técnica de Coeficientes codificados donde se evalúan los factores por coeficientes y los respectivos errores estándar, valores T, y valores P para cada variable.

3.3.4 Análisis de regresión por Coeficientes codificados

Inicialmente, se tenía considerado realizar la evaluación final por medio de un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la variación entre las variables estudiadas; sin embargo, analizando las características y propósitos de este trabajo, se concluyó que un análisis de regresión por coeficientes codificados generaría información más confiable, por lo que se decidió utilizar esta técnica.

En el análisis ANOVA el principal interés es comprobar si existe una variabilidad entre diferentes grupos, mediante la comparación de las medias de los diferentes grupos y así, evaluar únicamente el impacto de un conjunto de entradas con respecto a otro conjunto de entradas en la variable de salida.

Para este diseño de experimentos se buscó entender el efecto de las variables de entrada (el área y la fuerza de contacto) y la generación de un modelo que permitiera explicar su interacción contra la salida (resistencia), para poder ser manipulada hacia una optimización. Por esta razón, se optó por usar el análisis de coeficientes codificados y así modelar una relación a través del método de regresión representando a los factores de entrada en un nivel alto y bajo con su respectivo efecto. Este enfoque es conveniente en la optimización de procesos debido a que se simplifica la interpretación modelos complejos y su optimización del modelo.

Figura 3-39 presenta la tabla de coeficientes codificados para este nuevo experimento. Esta tabla muestra más términos que el experimento anterior, debido a que se agregaron nuevas entradas en el factor *puntos pares de contacto*; mientras que en el experimento anterior se evaluaban solamente los puntos alto y bajo, para este experimento se agregan 3 niveles más, correspondientes al punto medio y a dos puntos intermedios. Estos puntos están representados por los valores 1 a 5 en el rubro *puntos pares de contacto* de la tabla.

Se muestra que, nuevamente, el efecto más significativo es el factor de *distancia de contacto*, ahora con un valor creciente de 24.167 unidades (marcado en rojo en la Figura 3-39). Este factor se considera importante en el diseño de experimentos porque es el valor que crece mayormente entre los factores representados en la tabla por Minitab; el factor que le sigue es el de los puntos pares de contacto en la variación 1 con 13.389, entre todos los demás resultados

mostrados por la tabla el factor menos significativo es el que resulta de la interacción de los factores en el punto 2, 2, marcado en un cuadro azul en la tabla, con un valor de 0.778 unidades.

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	905.056	0.132	6843.59	0.000	
puntos pares de contacto					
1	13.389	0.296	45.28	0.000	1.67
2	7.278	0.296	24.61	0.000	1.67
3	-1.944	0.296	-6.58	0.000	1.67
4	-7.611	0.296	-25.74	0.000	1.67
5	-5.833	0.296	-19.73	0.000	1.67
distancia de contacto					
1	24.167	0.187	129.21	0.000	1.33
2	0.556	0.187	2.97	0.005	1.33
puntos pares de contacto*distancia de contacto					
1 1	-6.278	0.418	-15.01	0.000	2.22
1 2	-2.000	0.418	-4.78	0.000	2.22
2 1	-3.167	0.418	-7.57	0.000	2.22
2 2	0.778	0.418	1.86	0.071	2.22
3 1	2.389	0.418	5.71	0.000	2.22
3 2	6.000	0.418	14.35	0.000	2.22
4 1	2.389	0.418	5.71	0.000	2.22
4 2	5.000	0.418	11.96	0.000	2.22
5 1	2.611	0.418	6.24	0.000	2.22
5 2	-2.111	0.418	-5.05	0.000	2.22

Figura 3-39: Tabla de coeficientes codificados del DoE completo multinivel

El valor de T, mostrado en el rubro *distancia de contacto*, también en la Tabla de la Figura 3-39, arroja un valor de 129.21 indicando que la distancia de contacto sigue siendo un valor significativo. En el caso del valor de P, puesto que todos los factores e interacciones son menores a 0.05, se comprueba que se trata de valores significativos. La excepción se presenta nuevamente en la interacción 2 ,2, con un valor de 0.071, lo que significa que no hay variabilidad significativa en ese punto y que el resultado se encontraría fuera de ese punto de interacción, por lo que se puede descartar.

Resumen del análisis de regresión en el diseño factorial completo multinivel

Teniendo la información de las tabla de coeficientes codificados y las gráficas completas y continuas en toda la evaluación del proceso se considera que el experimento es confiable y que la información encontrada es confiable en el experimento, por lo que se puede realizar una relación.

Valor nominal en $m\Omega$	Valor obtenido por el experimento en $m\Omega$	Porcentaje de diferencia
850	867	2%

Tabla 3-6: Resumen del análisis de regresión en el diseño factorial completo multinivel

3.4 Etapa 3: Estandarización del proceso

Una vez que se identificaron los factores que afectan la variabilidad en la resistencia y se logró generar un método que permita minimizar esta variabilidad, el paso restante consiste en desplegar esta información al personal involucrado en estas tareas y estandarizar las operaciones para asegurar que los objetivos deseados se mantengan. Para lograr esto, se procedió a generar una actualización de la instrucción de trabajo y, posteriormente, un plan de implementación para los empleados y nuevas actividades que estén relacionados con el producto.

3.4.1 Generación de la actualización en la instrucción de trabajo

La instrucción de trabajo antigua propone hacer contacto a no más de lo recomendado por el proveedor con valor de 0.7mm. y utilizando solo un par de pines .

En esta nueva instrucción de trabajo, se propone tomar en consideración que, cuando se use este tipo de pin al hacer contacto en la terminal metálica del conector se deberá considerar el uso de 4 pares de pines con el traslape máximo de 0.7mm, siempre y cuando la forma de muestra lo permita de lo contrario hacer uso de la mayor cantidad de pines que pudieran hacer contacto con la muestra. Con estas acciones, se podrá cumplir con el requerimiento del cliente, de obtener la mejor lectura aproximada al valor real de la muestra.

3.4.2 Desarrollo de procedimientos estándar

El procedimiento para estandarizar las operaciones desarrolladas en este trabajo de tesis se formalizó mediante el desarrollo de una instrucción de trabajo. Las actividades para desarrollar son presentadas en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 3-40.

Diagrama de flujo

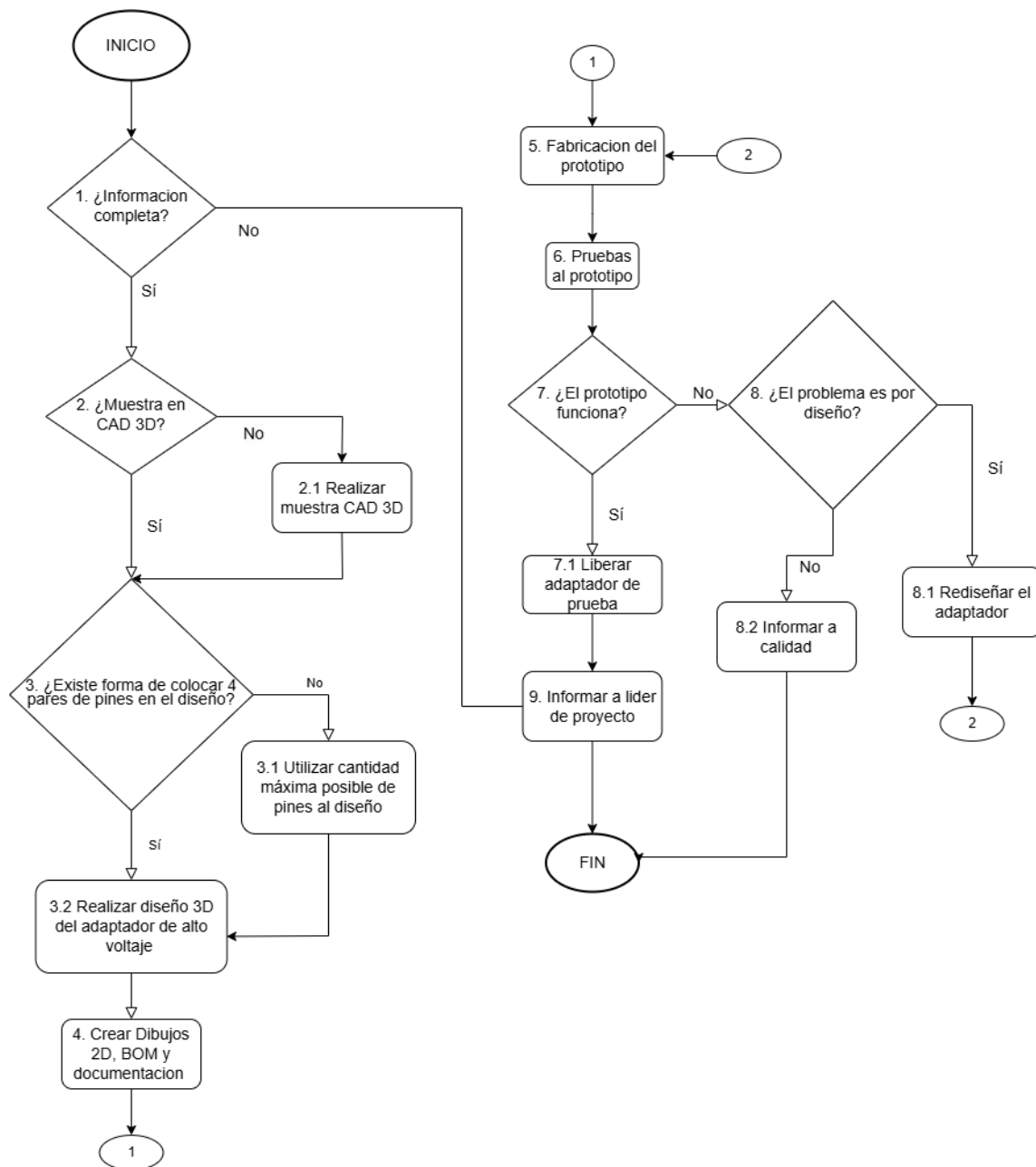


Figura 3-40: Instrucción de trabajo del diseño de un adaptador de alto voltaje

Diseño de un adaptador de alto voltaje

A continuación, se explican las actividades del procedimiento presentado en el diagrama de flujo de la Figura 3-40.

INICIO DE PROCESO

1. ¿Información completa?: El líder de proyecto entrega la información correspondiente al diseño del adaptador de prueba:

- Dibujo 2D del conector
- Documento de requerimientos de cliente
- 5 muestras físicas del conector para el adaptador de prueba

Verificar que esta información esté completa. Sí no:

1.1. Informar a líder de proyecto: Reportar al líder del proyecto sobre la información faltante. Ir a fin de proceso.

2. ¿Muestra en CAD 3D?: Buscar en la nube de la empresa la muestra 3D CAD del conector para el adaptador de prueba, en caso de que no se encuentre:

2.1 Realizar muestra CAD 3D: Dibujar la muestra en un archivo 3D CAD o escanearla para obtenerla por ingeniería inversa, la forma en que el equipo de diseño considere sea la mejor opción

3. ¿Existe forma de colocar 4 pares de pines en el diseño?: Establecer la cantidad de pines que van a ser usados en el adaptador, si el conector permite la inserción de 4 pares de pines agregarlos como cantidad máxima, en caso de que por algún motivo no se puedan utilizar los 4 pares de pines ir a 3.1

3.1. Utilizar cantidad máxima posible de pines al diseño: Determinar la cantidad máxima de pines que se va a utilizar en el diseño.

4. Realizar el diseño 3D del adaptador de alto voltaje: Con base en el documento de requerimientos del cliente, realizar el diseño 3D del adaptador de prueba de alto voltaje, cubriendo todos los puntos requeridos.

- Verificar que no existan interferencias indeseadas en el ensamble.
- Eliminar los riesgos de fabricación y operación del adaptador de prueba.

5. Crear Dibujos 2D, lista de materiales o bill of materials (BOM) y documentación: Establecer claramente la representación en dibujos 2D para la manufactura de las piezas y ensamble final del adaptador utilizando el sistema de dimensionamiento geométrico y tolerancias (GD&T).

- Documentar la información de los componentes necesarios para la fabricación del prototipo, generando los números de parte y descripción correspondientes

- Generar el BOM.
- Cargar Dibujos 2D y BOM en la carpeta del proyecto o en su ruta en SAP proporcionada por el líder del proyecto, así como subir información que pueda ser relevante en algún siguiente.

6. Fabricación del prototipo: Informar mediante un correo al departamento de compras y producción que toda la información necesaria para producir el adaptador ha sido cargada correctamente y puede disponer de la información para la compra partes y maquinados. Los departamentos involucrados se encargarán de la fabricación del prototipo.

7. Pruebas al prototipo: El equipo de diseño es informado mediante correo electrónico que el departamento de producción ha realizado el ensamble del adaptador de prueba para que, en conjunto con el equipo de diseño y calidad, realicen pruebas de funcionamiento basadas en los requerimientos del cliente y su posible fallo.

8. ¿El prototipo funciona?: En función de los resultados de las pruebas del prototipo, con representación de los equipos de diseño y producción, evaluarán cuidadosamente que el prototipo cumpla el punto 7; estos representantes poseen la autoridad para determinar si el prototipo cumple con las pruebas del punto 7 ir a 9, sí no:

8.1. ¿El problema es por diseño?: Cuando el prototipo no cumple con las pruebas del punto 7. Los representantes o representante de los equipos de diseño, producción y calidad determinaran la causa del fallo en el adaptador.

Si el problema es definido por diseño:

8.1.1 Rediseñar el adaptador: El equipo de diseño realiza un rediseño al adaptador con la información de la causa raíz del punto 6.0. Cuando el diseño haya sido modificado, informar del cambio a los departamentos de compras y producción de su nueva fabricación. Ir al punto 6.0.

Sí no:

8.1.2 Informar a calidad: El equipo de diseño envía un correo al departamento de calidad con la información obtenida del punto 7.0. Ir a fin de proceso.

9. Liberar adaptador de prueba: El, o los representantes de los equipos de diseño, producción y calidad firmarán un documento en donde se exprese la conformidad del funcionamiento del prototipo, basado en los requerimientos del cliente.

10. Informar a líder de proyecto: El equipo de diseño envía un correo al líder del proyecto informando que el adaptador ha sido liberado. Adjuntar los resultados de las pruebas realizadas en el punto 7.

FIN DE PROCESO

3.4.3 Propuesta de plan de implementación

Como se señaló en el alcance de esta tesis, los resultados obtenidos deben de ser analizados y autorizados por el corporativo a fin de que puedan ser implementados en las líneas de producción como parte de los procesos de la empresa. Esta acción puede implicar un periodo largo de tiempo, sin embargo, con los resultados obtenidos, se espera que esta autorización pueda obtenerse en corto tiempo, debido a que cuenta con el aval de la sede nacional. Siguiendo los procesos establecidos en la compañía. A continuación, se muestra el plan de implementación presentado al corporativo con la finalidad de presentar la manera en que el proceso desarrollado se pondrá en marcha. La Figura 3-41 presenta el cronograma con las actividades requeridas para la implementación del nuevo proceso y posteriormente se presenta una breve explicación de cada una de las actividades.

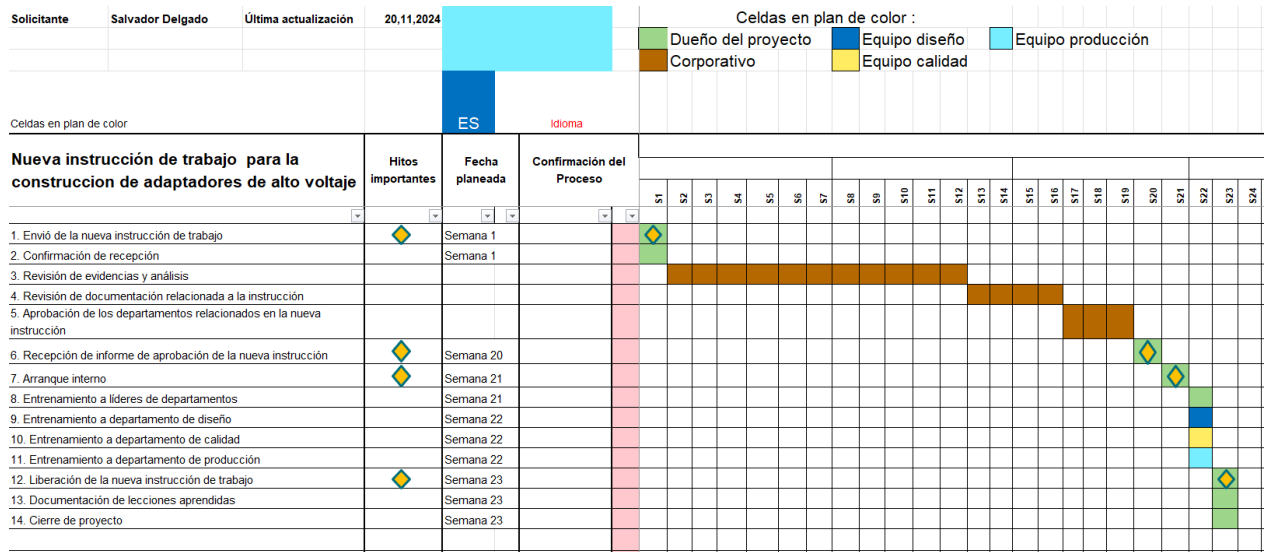


Figura 3-41: Diagrama de Gantt del plan de implementación

Descripción de actividades

1. *Envío de la nueva instrucción de trabajo:* En esta actividad se recopilan los documentos y las firmas necesarias para presentar la nueva instrucción de trabajo. Con estos documentos, se realiza el envío al corporativo para su análisis. Esta actividad implica normalmente una semana de duración.

2. *Confirmación de recepción:* Se recibe un correo de parte del corporativo donde se notifica la recepción de la solicitud.
3. *Revisión de evidencias y análisis:* El corporativo revisa la información enviada. En este periodo aún es posible recibir solicitudes de parte del corporativo acerca de posible información para ratificar los resultados planeados.
4. *Revisión de documentación relacionada a la instrucción:* El corporativo revisa la información acerca de la investigación de los procesos y procedimientos a utilizar en la nueva instrucción de trabajo.
5. *Aprobación de los departamentos relacionados en la nueva instrucción:* Si todo es resulta satisfactorio, el corporativo envía el documento de aprobación de la propuesta a los departamentos involucrados. Los puntos 3, 4 y 5 son las actividades que demandan más tiempo ya que es en ellas en donde se realiza la autorización para la modificación de procesos en la planta.
6. *Recepción de informe de aprobación de la nueva instrucción:* Ya con la aprobación recibida, se analiza si existen observaciones a la propuesta original. Se estudian los procedimientos aprobados y se preparan las actividades para la instauración de la nueva instrucción de trabajo.
7. *Arranque interno:* Se notifica a todo el personal de los departamentos involucrados de la próxima implementación de una nueva instrucción de trabajo. Se coordinan actividades con los líderes involucrados de los departamentos de diseño, producción y calidad.
8. *Entrenamiento a líderes de departamentos:* Se brinda un entrenamiento a los líderes acerca de la nueva instrucción de trabajo. Este entrenamiento está diseñado para que los mismos líderes puedan ofrecer el entrenamiento a los empleados a su cargo.
9. *Entrenamiento a departamento de diseño:* El líder de diseño organiza un entrenamiento para su equipo de trabajo acerca de la nueva instrucción de trabajo, así como las funciones específicas que debe desempeñar en los próximos diseños de adaptadores de alto voltaje. Se proporciona la capacitación correspondiente.
10. *Entrenamiento a departamento de calidad:* Por su parte, el líder de calidad organiza e imparte el entrenamiento correspondiente a las actividades que surgen a partir de la nueva instrucción de trabajo que atañen a su departamento.

11. *Entrenamiento a departamento de producción:* Finalmente, el de producción realiza las actividades de entrenamiento correspondientes a su departamento referentes a la nueva instrucción.
12. *Liberación de la nueva instrucción de trabajo:* Una vez aprobada la instrucción de trabajo, y ya que todo el personal se encuentra listo a desempeñar las nuevas funciones que esto implica, se procede a establecer una fecha límite para que el nuevo proceso corra bajo la nueva instrucción de trabajo.
13. *Documentación de lecciones aprendidas:* Se recopila y documenta la información de utilidad para futuros proyectos relacionados a nuevas instrucciones de trabajo.
14. *Cierre de proyecto:* Se termina el proceso.

Hitos

1. *Envío de la nueva instrucción de trabajo:* Esta actividad es considerada hito porque con ella se inicia el proceso de autorización. Debe ser completada a más tardar al final de la semana 1 para evitar atrasos.
2. *Recepción de informe de aprobación de la nueva instrucción:* Se considera a esta actividad como hito ya que hasta que se reciba la recepción de aprobación de la instrucción de trabajo no se puede avanzar en los siguientes pasos, incluso si alguna información extra pudiese llegarse a pedir, pudiera retrasar la fecha planeada.
3. *Arranque interno:* Se considera un hito a esta actividad ya que, a partir de esta fecha, se coordinará, con los líderes de los departamentos, las actividades necesarias para empezar a utilizar la nueva instrucción de trabajo.
4. *Liberación de la nueva instrucción de trabajo:* Se considera un hito debido a que, en esta actividad, se notifica al corporativo sobre el cierre del proceso de solicitud de nueva instrucción de trabajo, lo que implica la notificación de la implementación de la instrucción de trabajo, por lo que ya puede ser auditado en la próxima auditoria.

3.5 Resultados

Para comprobar la optimización del proceso elaboración de adaptadores de prueba para arneses eléctricos de alto voltaje se evaluaron los resultados finales del DoE completo multinivel de la sección del capítulo 3.3, donde se señaló que para obtener la menor lectura de resistencia por contacto entre adaptador de prueba y arnés eléctrico de alto voltaje se deben configurar los factores de puntos pares de contacto en el nivel 4 y distancia de contacto en el nivel 3 como se muestra en el cuadro verde de la Figura 3-42.

Multiple Response Prediction				
Variable	Setting			
puntos pares de contacto	4			
distancia de contacto	3			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Resistencia	865.333	0.561	(864.195, 866.471)	(863.057, 867.609)

Figura 3-42 Optimización de la respuesta del DoE completo multinivel

En la Figura 3-43 se muestra el adaptador físico configurado con los factores para la resistencia óptima, los valores que se obtuvieron de la máquina de resistencia por medio del banco de pruebas de la empresa donde se realizó el experimento fueron de 866mΩ, el cual cae dentro de los valores de predicción óptima de Minitab como se muestra en el cuadro azul de la Figura 3-42.

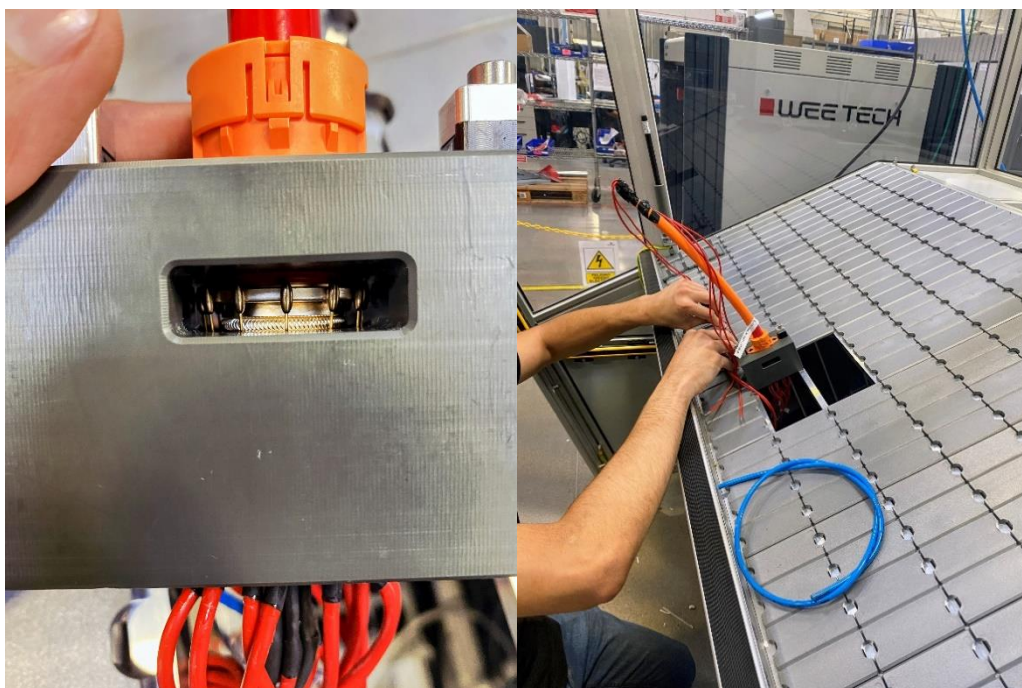


Figura 3-43 Configuración de la optimización de la respuesta en el modelo físico

Para continuar con la comprobación del experimento, como se muestra en la Tabla 3-7 se procedió a realizar mediciones de resistencia eléctrica variando los factores de entrada con los mismos niveles propuestos en el DoE completo multinivel de la sección 3.3 en la Tabla 3-2; siendo la distancia de traslape con 3 niveles y los puntos de contacto con 6 niveles. Al realizar las configuraciones con el adaptador en físico permitió generar datos describiendo el comportamiento de la señal de respuesta, siendo en este caso la resistencia eléctrica.

Distancia de traslape	Puntos de contacto (Área) en mΩ					
	1 par	2 par	3 par	4 par	5 par	6 par
1.Tangencial (0,001mm)	935,65	933,5	930,25	924,15	926,5	926
2.Central (0,35mm)	917,15	913,3	909,45	903,75	895,65	893
3.Fondo (0,7mm)	900,2	890,35	871,4	866	875,05	880,95

Tabla 3-7 Tabla de valores de entrada y salida en el adaptador físico

Los resultados de la Tabla 3-7 se graficaron y se muestran en la Figura 3-44, los cuales se comportan como la gráfica del diseño propuesto por Minitab de la Figura 3-37: Gráfica de interacción del DoE completo multinivel de la sección 3.3. Gráficamente nuevamente se muestra el valor de resistencia mas bajo con un valor de $866\text{m}\Omega$ por lo que se comprueba el diseño de experimentos al comprobar el punto mas bajo de resistencia en la configuración optima.

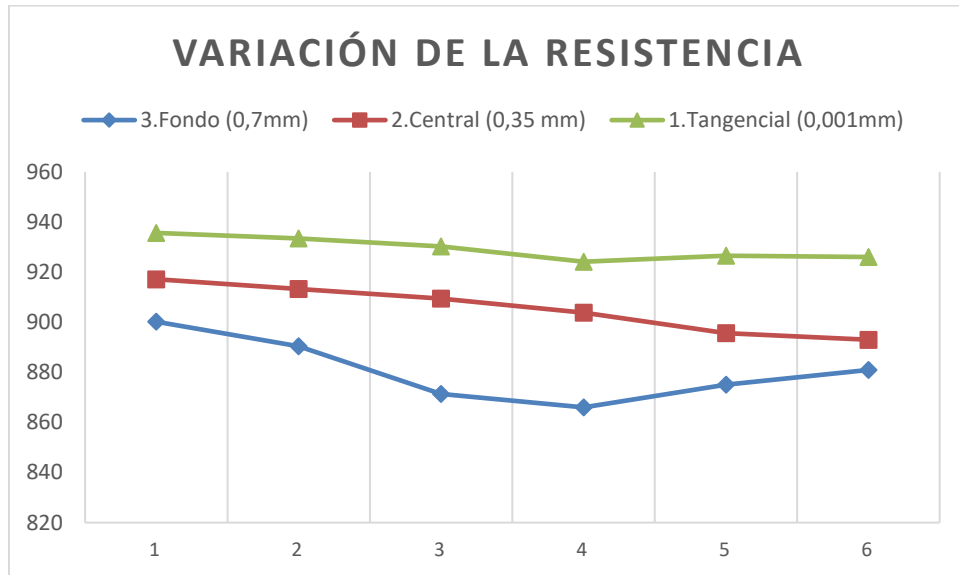


Figura 3-44 Gráfica de la tabla de valores físicos en $\text{m}\Omega$

Otro factor que se comprobó es la repetibilidad del procedimiento el cual rondaba anteriormente en el 6 % entre inserciones como se mostró en la sección 3.2, en la Figura 3-45 se muestran los valores tomados 20 veces con los mismos niveles propuestos en el DoE completo multinivel de la sección 3.3 en la Tabla 3-2. La nueva variación de la respuesta optima con la configuración correspondiente de los puntos pares de contacto en el nivel 4 y la distancia de contacto en el nivel 3 fue de $866\text{m}\Omega \pm 1\text{m}\Omega$ lo que indica un 2% de variación, por lo que se logro disminuir 4% comparado con el procedimiento inicial.

Tangencial	1 par	2 par	3 par	4 par	5 par	6 par	Central	1 par	2 par	3 par	4 par	5 par	6 par	Fondo	1 par	2 par	3 par	4 par	5 par	6 par
posicion 1	937	933	928	924	926	926	posicion 2	917	913	909	902	900	892	posicion 3	902	890	870	865	874	880
	936	933	930	924	926	926		916	914	910	903	899	893		902	890	870	865	874	881
	936	934	931	924	926	926		918	914	910	904	894	893		902	890	870	866	874	881
	936	934	930	924	927	926		918	913	910	903	897	894		902	890	870	866	876	881
	936	934	931	924	927	926		918	913	910	903	897	893		902	889	871	865	875	881
	936	933	930	924	926	926		917	913	910	903	897	893		902	890	871	865	875	880
	936	934	930	924	926	926		917	913	910	903	897	894		901	890	871	865	876	882
	936	934	931	924	926	926		917	913	910	904	896	893		900	890	871	866	876	882
	936	934	930	924	926	926		917	914	910	904	896	893		900	890	872	867	875	881
	936	934	931	924	926	926		917	913	910	904	896	893		900	890	872	866	875	881
	935	934	930	924	926	926		917	913	910	904	895	892		899	890	872	866	874	881
	935	934	930	925	927	926		917	913	909	904	896	893		900	891	872	866	875	881
	936	934	931	925	927	926		917	914	908	904	895	893		899	891	872	866	876	881
	935	933	930	925	927	926		917	913	910	904	894	893		899	890	872	866	876	881
	935	933	930	925	927	926		918	913	909	904	895	893		899	891	872	866	875	881
	936	933	930	924	927	926		918	913	909	904	894	893		899	891	872	866	875	881
	935	933	931	924	927	926		917	913	909	904	892	893		899	891	872	867	875	880
	935	933	931	924	927	926		917	914	909	905	896	893		899	891	872	867	875	881
	935	933	930	924	927	926		917	914	909	905	894	893		899	891	872	867	875	881
	935	933	930	923	926	926		916	914	908	905	893	893		899	891	872	867	875	881
Promedio	935,65	933,5	930,25	924,15	926,5	926		917,15	913,3	909,45	903,75	895,65	893		900,2	890,35	871,4	866	875,05	880,95
Desv. St.	0,587143	0,512989	0,71635	0,48936	0,512989	0		0,587143	0,470162	0,686333	0,71635	1,926956	0,458831		1,321881	0,587143	0,820783	0,725476	0,686333	0,510418
max	937	934	931	925	927	926		918	914	910	905	900	894		902	891	872	867	876	882
min	935	933	928	923	926	926		916	913	908	902	892	892		899	889	870	865	874	880
Delta	2	1	3	2	1	0		2	1	2	3	8	2		3	2	2	2	2	2
Distancia 0,001 mm							Distancia 0,35 mm							Distancia 0,7 mm						

Figura 3-45 Repetibilidad en mediciones físicas en $m\Omega$

En definitiva, los resultados obtenidos fueron satisfactorios al poder controlar los factores para minimizar la respuesta resistencia eléctrica y al minimizar la variabilidad en la repetibilidad.

Conclusiones

El trabajo desarrollado está enfocado en la problemática de variación de resistencia eléctrica por contacto en la elaboración de adaptadores de prueba para arneses eléctricos de alto voltaje para la verificación de arneses eléctricos automotrices para una empresa ubicada en la ciudad de San Luis Potosí. La problemática inicial buscaba lograr mediciones correctas en los arneses eléctricos validados mediante los adaptadores de prueba en sus bancos de prueba.

Para el éxito de este trabajo, se propusieron 3 objetivos específicos

En el primer objetivo se planteó realizar un análisis de los procesos de la elaboración de los adaptadores de prueba para arneses de alto voltaje con la finalidad de identificar los principales factores que generaban la variación de resistencia. En la sección 3.2 se realizó este análisis, con el fin de encontrar las causas de variación de la resistencia. Para este efecto, se diseñó un prototipo que permitiera variar tanto el área como la fuerza de contacto y, por medio de un diseño de experimentos, se realizó el análisis con lo que se logró establecer una óptima configuración que permitiera minimizar estas variaciones, dando como resultado que los principales factores de variación de la resistencia eléctrica por contacto entre los adaptadores y el arnés fueran el área y la fuerza de contacto, con lo cual se cumplió el objetivo específico 1.

El segundo objetivo específico consistía en desarrollar una guía de diseño para realización de adaptadores de alto voltaje para el proceso de producción que permita alcanzar los requerimientos del cliente. Para este objetivo se diseñó una instrucción de trabajo para sostener los resultados dentro de la organización en el nuevo proceso de elaboración de adaptadores de prueba para arneses de alto voltaje.

El tercer objetivo específico consistía en implementar la guía de diseño en el proceso del diseño de adaptadores de alto voltaje. Para lograr la estandarización del proceso, con la guía de diseño desarrollada, se estandarizaron las nuevas operaciones para asegurar que los objetivos deseados se mantengan mediante la actualización de la instrucción de trabajo y el diagrama de flujo. Se desarrollo el plan de implementación presentado al corporativo con la finalidad de presentar la manera en que el nuevo proceso desarrollado se pondrá en marcha con las actividades requeridas para su implementación.

Con el cumplimiento de los objetivos específicos se puede afirmar que se dio cumplimiento al objetivo general, el cual buscaba disminuir las variaciones de resistencia eléctrica por contacto en la elaboración de adaptadores de prueba para arneses eléctricos de alto voltaje para asegurar el cumplimiento con las exigencias del cliente. Con la metodología desarrollada, es posible determinar el número de pines necesario y la fuerza de contacto necesaria del adaptador de prueba que se debe aplicar a los arneses para alcanzar la mínima medición de la resistencia. En las pruebas realizadas se pudo aproximar a un +2% de variación contra la medida nominal (variando de 850 a 866m Ω) comparado contra las variaciones iniciales, que rondaban un 34 % con la metodología anterior.

Otro factor que la metodología solucionó fue la repetibilidad del proceso de fabricación de los adaptadores de prueba el cual rondaba anteriormente en el 6 % entre inserciones, con el nuevo proceso se disminuyó esta variación de resistencia eléctrica a un 2% sobre la medida nominal con un valor de 866m Ω $\pm$ 1m Ω .

Gracias a que la mejora continua es parte constante de la organización se facilitó la implementación de este trabajo por la cooperación de sus integrantes.

La hipótesis a la problemática señalaba que las variaciones en las mediciones de la resistencia eléctrica por contacto entre los adaptadores de alto voltaje y los arneses son afectadas por la cantidad de área de contacto y la fuerza de presión que tienen los pines del adaptador de prueba contra las terminales de los conectores del arnés; con el cumplimiento de los objetivos, se logró demostrar la hipótesis, confirmando que las variaciones sí eran afectadas por el área de contacto y por la fuerza de presión que tienen los pines del adaptador de prueba contra las terminales de los conectores del arnés.

Con el desarrollo de este trabajo, se da solución a la problemática que presentaba la compañía, alcanzando resultados fiables y comprobables

Gracias a que la mejora continua es un estandarte para la organización, se facilitó la implementación de este trabajo con la cooperación de sus integrantes. Esta metodología se encuentra en proceso de validación por parte del corporativo, por lo que es cuestión de tiempo para que sea formalmente implementarse en el área de trabajo correspondiente.

Referencias

- Aitken, O., Rodriguez, J.-A., & Vinson, P. (2012). Modelling of Spring Type Electrical Contacts. *26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012)* (págs. 130-133). Beijing, China: IEEE.
- AVERY DENNISON CORPORATION. (2025). *Engineered Fasteners*. Obtenido de AVERY DENNISON: <https://fastener.averydennison.com/en/home/technologies/engineered-fasteners.html>
- Boylestad, R. L. (2004). *Introducción al análisis de circuitos*. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Centro de Ingeniería de la Calidad. (2018). *Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad R&R* . Obtenido de <https://cicalidad.com/>: <https://www.cicalidad.com/articulos/PAPER%20R&R.pdf>
- Comisión Electrotécnica Internacional. (2016). *IEC 61140 Redline version*. 3 rue de Varembe CH-1211 Geneva 20.
- Creus, A. (2011). *Instrumentación Industrial, 8a Edición*. Barcelona, España: Alfaomega.
- Dhoot Transmission. (2023). *Testing Systems (Wiring Harness)*. Obtenido de Dhoot Transmission PVT. LTD.: <https://www.dhoottransmission.com/testing-systems/>
- Emdep. (2022). *High Voltage*. Obtenido de Emdep: <https://www.emdep.com/products/high-voltage/>
- Fukuyama, Y., J. Toyoizumi, Y., Itou, T. K., & Kaneko, N. ., (2018). "Evaluation of Degradation Degree of Plated Base Metal Contacts by Impedance Measurement". *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*,, 456-459.
- Gil, S., & Rodríguez, E. (2001). *Física re-Creativa*,. Buenos Aires: Prentice-Hall.
- IBM. (2021). *Gráficos de histograma*. Obtenido de Gráficos de histograma: <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/beta?topic=types-histogram-charts>
- IBM. (2024). *¿Qué es la regresión lineal?* Obtenido de <https://www.ibm.com/mx-es/topics/linear-regression>: <https://www.ibm.com/mx-es/topics/linear-regression>
- IEA. (2023). *Global EV Outlook 2023 / Executive summary* . Obtenido de IEA, Paris: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/executive-summary>
- Ingun. (2024). *arneses*. Obtenido de ingun.com: <https://ingun.com/es-ES/soluciones/aplicaciones/arneses/>

- JCGM. (2012). *VIM Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales y términos asociados*. España: Centro Español de Metrología.
- Jiménez Castañeda, J. C., Domínguez Hernández, M. L., & Martínez Castro, C. J. (2009). Estrategias y competitividad de los negocios de artesanía en México. *Pensamiento & Gestión*, (26), 165-190. 165-190.
- Kawauchi, T., Onda, M., Matsuo, K., Kaewamura, Y., Shiotani, Y., & Sakai, N. (2014). Electrical and Electronic Systems - Harness. *Encyclopedia of automotive engineering*.
- Kuphaldt, T. R. (2006). *Lessons In Electric Circuits, Volume I – DC*. Kuphaldt: Plain-ASCII.
- Ltd, D. T. (2023). *Testing Systems (Wiring Harness)*. Obtenido de <https://www.dhoottransmission.com/>: <https://www.dhoottransmission.com/testing-systems/>
- Minitab. (2024). <https://support.minitab.com/>. Obtenido de Soporte de Minitab: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/the-anderson-darling-statistic/>
- Minitab. (2024). *Soporte de Minitab engage*. Obtenido de Análisis DOE: <https://support.minitab.com/es-mx/engage/help-and-how-to/tools/forms/form-tools/statistical-analysis/doe-analysis/>
- Opportimes. (21 de Octubre de 2016). *Opportimes*. Obtenido de Automotriz: www.opportimes.com/mexico-rompe-record-en-exportacion-de-arneses-automotrices
- QuestionPro. (2024). *QuestionPro*. Obtenido de ¿Qué es el diagrama de Pareto?: <https://www.questionpro.com/blog/es/diagrama-de-pareto/>
- Secretaría de Economía. (2016). *México cuenta con una industria automotriz en crecimiento*. Obtenido de Blog de publicaciones: https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/Estudios/Monografia_Industria_Automotriz.pdf
- Visata, O. &, & J. & Montillet, G. (2006). New Type of Electrical Contacts for High Voltage Switchgear Applications. . *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*. 10.1109/TDC.2006.1668640. .
- Wu, D. M., Luk, C. K., & Fei, W. Z. (2017). Quality Control of Low-cost Electric Machines for Electric Vehicles by DOE Assisted Six Sigma DMADV Method. *7th International Conference on Power Electronics Systems and Applications - Smart Mobility, Power Transfer & Security (PESA)*, 1-8.

XLSTAT. (2024). *XLSTAT*. Obtenido de ANOVA (ANALISIS DE LA VARIANZA):
<https://www.xlstat.com/es/soluciones/funciones/anova-ancova>

Young, H. D., & Freedman, R. A. (2020). *Física Universitaria con Física Moderna. Volumen 2*. Millau, France: Pearson.

Glosario

DoE	Diseño de experimentos
mΩ	mili Ohmio
Machine learning	Inteligencia artificial de aprendizaje automático
ANOVA	Análisis de varianza
CAD	Diseño Asistido por Computadora
BOM	Lista de materiales
CTQs	Crítico para la Calidad