



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Calidad de tensión eléctrica como parámetro esencial en reproducción de modos de falla durante pruebas de vida en lavadoras domésticas.

Tesis

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

Presenta:

Ing. Jesús Esqueda Buenrostro

Dirigido por:

M.I. Eric Leonardo Huerta Manzanilla

Querétaro, Qro. Abril de 2018.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Calidad de tensión eléctrica como parámetro esencial en reproducción de modos de falla durante pruebas de vida en lavadoras domésticas.

Tesis

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

Presenta:

Ing. Jesús Esqueda Buenrostro

Dirigido por:

MI Eric Leonardo Huerta Manzanilla

MI Eric Leonardo Huerta Manzanilla
Presidente

MI Arturo Escoto García
Secretario

MI Javier García Pérez
Vocal

MAP Agustín Martínez Rodríguez
Suplente

MC Luis Alfredo Lucia Mendoza
Suplente

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad

Firma
Firma
Firma
Firma
Firma
Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Abril 2018



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Calidad de tensión eléctrica como parámetro esencial en reproducción de modos de falla durante pruebas de vida en lavadoras domésticas.

Tesis

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

Presenta:

Ing. Jesús Esqueda Buenrostro

Dirigido por:

MI Eric Leonardo Huerta Manzanilla

MI Eric Leonardo Huerta Manzanilla
Presidente

MI Arturo Escoto García
Secretario

MI Javier García Pérez
Vocal

MAP Agustín Martínez Rodríguez
Suplente

MC Luis Alfredo Lucia Mendoza
Suplente

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad

Firma
Firma
Firma
Firma
Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

RESUMEN

Este trabajo propone dos métodos de pruebas de vida acelerada (ALT) para incrementar de forma efectiva la reproducción de modos de falla, enfocándose en las variaciones de tensión eléctrica que se presentan en los suministros de los hogares, en la validación de componentes electrónicos de lavadoras domésticas; de tal manera que cuando el producto es liberado a producción, se hayan detectados y corregidos los modos de falla potenciales que afecten su funcionamiento durante su vida útil.

La metodología y procedimientos de prueba que actualmente son usados para la validación de los productos, sólo integran a la tensión eléctrica nominal y estable ($120V \pm 10V$) como mecanismos de falla, pero no logran reproducir las condiciones reales a las que son expuestos en el mercado mexicano. Por lo anterior, no se tiene una evaluación confiable que asegure que, bajo las condiciones reales de campo, las lavadoras son capaces de presentar buen desempeño en su ciclo normal de vida.

Los métodos de prueba propuestos están basados en conceptos de confiabilidad aplicada, tales como las pruebas ALT (prueba de vida acelerada) y ADT (prueba de degradación acelerada), las cuales tienen como objeto reducir tiempos de evaluación asegurando la inclusión de mecanismos de falla y parámetros de prueba adecuados. Los métodos mencionados constan de una prueba de envejecimiento a la tarjeta electrónica de la lavadora en donde se incluyeron factores tales como humedad, temperatura y tensión eléctrica como mecanismos de desgaste; y como prueba complementaria se desarrolló una prueba ADT que incluye como mecanismos de falla las variaciones en tensión eléctrica, ángulo de posición de la tarjeta, y solución líquida conductora para entender las afectaciones del fenómeno “arco eléctrico” en el diseño de las tarjetas electrónicas.

El diseño de las pruebas ALT y ADT, se realizó utilizando técnicas estadísticas para determinar las condiciones idóneas en donde se llevarían a cabo los procedimientos. En la metodología se incluyeron análisis estadísticos descriptivos, así como un diseño de experimentos 2^2 , y un experimento posterior basado en análisis de Superficie de Respuesta quedando como un Diseño Central

Compuesto. Lo anterior definió condiciones y parámetros de prueba ideales para reproducción oportuna de modos de falla.

Finalmente se plantean los métodos de prueba propuestos como documentos oficiales para su aplicación en pruebas de vida de tarjetas electrónicas de lavadoras en todos los diseños desarrollados por la empresa.

(Palabras clave: ALT, ADT, confiabilidad, mecanismo de falla, modo de falla, diseño de experimentos, tarjeta electrónica, arco eléctrico, lavadora).

SUMMARY

This paper proposes two accelerated life test methods (ALT and ADT) in order to increase an effective failure modes reproduction during test, specifically focusing on voltage variations that may occur in electric supplies of households, also in the validation of electronic components of domestic washing machines; in such a way that when the product is released to production, all potential failure modes, affecting its operation during its useful life, have been detected and corrected.

The methodology and test procedures that are currently used for the validation of products, only integrate failure mechanisms such as the voltage rating and stable ($120V\pm 10V$), which fails to reproduce the actual conditions found in the Mexican market. Therefore, you cannot have a reliable assessment that ensures that even with actual field conditions, washing machines are able to present good performance in its lifecycle with users.

The proposed test methods are based on the application of reliability concepts, such as ALT (accelerated life test) and ADT (accelerated life test), which are intended to reduce evaluation time ensuring the inclusion of appropriate test parameters and failure mechanisms in the washer's design. The mentioned methods consist of an aging test to the electronic board of the washer where we included factors such as humidity, temperature and voltage as mechanisms of wear; and as further proof developed a test ADT that includes, as failure mechanisms, variations in voltage, angle position of the electronic board, and conductive liquid solution to understand the effects of the phenomenon of "electric arc" in the design of electronic boards.

For the design of ALT and ADT tests, it was needed the use of statistical techniques to determine the conditions for carrying out the procedures. Descriptive statistical analysis, as well as a design of experiments 2^2 , and a subsequent experiment based on analysis of response surface and as a Central composite design were included in the methodology. The above was used to define test conditions and ideal test parameters in order to increase the reproduction of failure mode in reasonably time.

Finally, the test methods proposed, defined as official documents, are in use for electronic board life testing of washing machines in all the designs developed by the company.

(Keywords: ALT, ADT, reliability, failure mechanism, failure mode, design of experiments, electronic board, electric arc, washing machine).

DEDICATORIAS

A mis padres Arturo y Beatriz, de quienes he aprendido todo lo que soy y que reflejan el mejor ejemplo a seguir en mi vida. Para ellos mi amor, mis cuidados y el más grande respeto por darme la oportunidad de ser educado dentro y fuera del seno familiar.

A mi novia Maggie, fuente primordial de motivación e inspiración, y en quien veo reflejado continuamente el deseo de ser mejor. Origen fundamental del anhelo de estudiar un posgrado. Para ella, todo mi amor y admiración.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Arturo y Beatriz, por todo su amor y comprensión, y de quienes siempre he recibido su apoyo incondicional tanto en el ámbito personal como profesional.

A mi empresa Mabe, por siempre brindar a sus empleados oportunidades de crecimiento y seguir impulsando el conocimiento en la industria.

A Ma. C. Julieta Puig Osorio, Gerente de laboratorio del producto de la empresa Mabe, quien siempre me brindó su apoyo para gestionar mis tiempos y recursos necesarios en el desarrollo de los experimentos que fueron parte de esta tesis.

Al M.I. Eric Leonardo Huerta Manzanilla quien, además de fungir como mi asesor de tesis, logró transmitirme el interés por la investigación y me brindo continuamente su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A todos mis maestros y compañeros de Maestría, quienes contribuyeron de sustancialmente en mi formación académica y crecimiento profesional, y así mismo, hicieron de este proyecto una experiencia enriquecedora en todos los sentidos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo otorgado durante esta maestría y por su contribución continua al avance tecnológico y el desarrollo del país.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	4
SUMMARY.....	6
DEDICATORIAS	8
AGRADECIMIENTOS.....	9
TABLA DE CONTENIDOS	10
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
ÍNDICE DE FIGURAS	15
1. INTRODUCCIÓN.....	19
1.1. ENFOQUE GENERAL / ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	19
1.2. ESTADO DEL ARTE: REVISIÓN DE LA LITERATURA.	21
1.2.1. Ciclos continuos (Procedimiento de prueba de ingeniería de GE, 2011). 25	
1.2.2. Confiabilidad de electrónicos (Procedimiento de prueba de ingeniería de GE, 2013).	25
2. OBJETIVO.....	30
2.1. JUSTIFICACIÓN	30
2.2. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	31
2.3. HIPÓTESIS	31
2.4. OBJETIVOS.....	31
2.4.1. Objetivo general.....	31
2.4.2. Objetivos particulares.	31
2.5. IMPACTOS	32
3. METODOLOGÍA.....	33
3.1. DESCRIPCIÓN DE PRODUCTO/COMPONENTE AL QUE VA DIRIGIDO EL ESTUDIO Y FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LOS FENÓMENOS ESTUDIADOS.	35
3.1.1. Funcionamiento de tarjeta electrónica de la lavadora:.....	36

3.1.2.	Fundamentación teórica de los fenómenos estudiados.....	40
3.2.	DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE TEMPERATURA AMBIENTE Y TENSIÓN ELÉCTRICA REPRESENTATIVOS DE LA CD. DE QUERÉTARO.	46
3.2.1.	Monitoreo de temperatura ambiente y tensión eléctrica	46
3.2.2.	Población objetivo y localización de viviendas.	47
3.2.3.	Tamaño y descripción de muestras.....	51
3.2.4.	Equipos y materiales utilizados en el monitoreo.	52
3.2.5.	Estudio de la variación de los sistemas de medición de tensión eléctrica y temperatura ambiente.....	55
3.2.6.	Resultados y análisis de variables monitoreadas.	60
3.3.	PRUEBA DE VIDA ACELERADA (ALT) PARA EL ENVEJECIMIENTO DE TARJETAS ELECTRÓNICAS Y REPRODUCCIÓN DE CORTO ELÉCTRICO CAUSADO POR PRESENCIA DE FENÓMENO DE MIGRACIÓN ELECTROQUÍMICA (ECM).	62
3.3.1.	Lugar y ubicación donde se llevó a cabo la prueba de vida acelerada. 62	
3.3.2.	Descripción de equipos de control y medición utilizados en prueba de vida acelerada.	63
3.3.3.	Descripción / preparación de muestras y suministros de prueba de vida acelerada.....	65
3.3.4.	Condiciones de prueba y diseño de experimentos para prueba de vida acelerada.....	66
3.4.	PRUEBA DE ARCO ELÉCTRICO EN TARJETAS ELECTRÓNICAS PARA LA REPRODUCCIÓN DE CORTO ELÉCTRICO INDUCIDO POR LA PRESENCIA DE ARCO ELÉCTRICO.	71
3.4.1.	Lugar y ubicación en donde se llevó a cabo la prueba de arco de eléctrico.	72
3.4.2.	Descripción de equipos de control y medición utilizados en prueba de arco eléctrico.	72
3.4.3.	Descripción / preparación de muestras y suministros de prueba de arco eléctrico.	74
3.4.4.	Condiciones de prueba y diseño de experimentos para prueba de arco eléctrico.	76
4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	82
4.1.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE PRUEBA DE VIDA ACELERADA.....	82

4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE LA PRUEBA DE ARCO ELÉCTRICO.	85
5. CONCLUSIONES.....	93
5.1. PRUEBA DE VIDA ACELERADA (ALT)	93
5.2. PRUEBA DE ARCO ELÉCTRICO.	94
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
7. ANEXOS.....	99
7.1. CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS DE RUIDO (ELABORACIÓN PROPIA, 2016). 99	
7.2. ÍNDICE DE LLAMADAS DE SERVICIO (SCR) EN LAVADORAS CALCULADO A ENERO 2017 (ELABORACIÓN PROPIA, 2017).....	100
7.3. ACUERDO DE CONFIDENCIALIDAD.	101
7.4. BUENAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS (MUESTRAS Y MATERIALES).....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de prueba de los métodos actualmente usado.	26
Tabla 2. Rangos de voltajes en el servicio entregados por PacifiCorp.....	27
Tabla 3. Bajas tensiones normalizadas para México (NMX-J-098-ANCE-1999, “Sistemas eléctricos de potencia – suministro – tensiones eléctricas normalizadas ”)	28
Tabla 4. Tabla de voltajes máximo, mínimo y promedio medido con equipo Fluke 43B 1ra. Prueba (Ramírez, 2012).	28
Tabla 5. Códigos de falla relacionados al % SCR de tarjeta electrónica (creación propia con datos de la empresa).....	39
Tabla 6. Viviendas seleccionadas para monitoreo de temperatura y tensión eléctrica (Creación propia).	51
Tabla 7. Especificaciones técnicas de equipo de medición de tensión eléctrica...	54
Tabla 8. Especificaciones técnicas de equipo de medición de temperatura ambiente.	54
Tabla 9. Mediciones realizadas para el estudio Gage R&R del sistema de medición de tensión eléctrica	55
Tabla 10. Mediciones realizadas para el estudio Gage R&R del sistema de medición de temperatura ambiente.	58
Tabla 11. Resultados de mediciones de tensión eléctrica en viviendas de la Cd. de Querétaro.	60
Tabla 12. Resultados de mediciones de temperatura ambiente en viviendas de la Cd. de Querétaro.....	61
Tabla 13. Especificaciones técnicas de equipos de control y medición para prueba de vida acelerada.	64

Tabla 14. Lista de suministros para prueba de vida acelerada.	65
Tabla 15. Diseño de experimentos: Prueba de vida acelerada a tarjetas.	69
Tabla 16. Diseño de experimentos: resultados de prueba de vida acelerada.	70
Tabla 17. Especificaciones técnicas de equipos de control y medición para prueba de arco eléctrico.	73
Tabla 18. Lista de suministros para prueba de arco eléctrico.	74
Tabla 19. Diseño de experimentos: Prueba de arco eléctrico a tarjetas.	79
Tabla 20. Diseño de experimentos: resultados de prueba de arco eléctrico..	80
Tabla 21. Configuración de prueba vida acelerada para el mercado mexicano. ...	93
Tabla 22. Configuración de prueba de arco eléctrico para el mercado mexicano. 94	
Tabla 23. Registros de tensiones eléctricas (estudio realizado por la empresa)...	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales componentes contribuidores del SCR a enero 2017 (creación propia con datos de la empresa).....	35
Figura 2. Esquema de componentes externos que controla la tarjeta electrónica (creación propia con información de la empresa).....	36
Figura 3. Diagrama de bloques funcionales de la tarjeta electrónica (creación propia con información de la empresa)	37
Figura 4. Componentes propensos a sufrir daños por corto eléctrico.	38
Figura 5. Componentes y circuitos que presentan corto eléctrico o daño por efecto del mismo.....	39
Figura 6. Corto eléctrico y efecto del mismo ocasionado por agua en un conector RJ45.....	41
Figura 7. Formación de dendrita como efecto de ECM.	42
Figura 8. El arco eléctrico (foto publicada por okdiario.com).....	43
Figura 9. Diagrama de experimentos desarrollados en la etapa de metodología.	46
Figura 10. Viviendas de particulares habitadas que cuentan con lavadora doméstica en la Cd. de Querétaro (INEGI, 2010).....	47
Figura 11. Cantidad de personas registradas en el padrón electoral de la ciudad de Querétaro (IEEQ, 2014).	48
Figura 12. Ejemplo de gráfico de monitoreo de la tensión eléctrica obtenido con equipo HOB0 plug load logger UX120-018 (creación propia condatos obtenidos).....	53
Figura 13. Instalación de equipos de medición en lavadoras	53

Figura 14. Medidores de temperatura y tensión eléctrica usados para el monitoreo de variables.	54
Figura 15. Porcentajes de variación resultantes del estudio Gage R&R del sistema de medición de tensión eléctrica.	56
Figura 16. Reporte gráfico de estudio Gage R&R del sistema de medición de la tensión eléctrica.	57
Figura 17. Porcentajes de variación resultantes del estudio Gage R&R del sistema de medición de temperatura ambiental.	59
Figura 18. Reporte gráfico de estudio Gage R&R del sistema de medición de la temperatura ambiente.	59
Figura 19. Mesas de prueba del Laboratorio de Confiabilidad a nivel sistema en la empresa.	62
Figura 20. Equipos de control y medición para prueba de degradación acelerada (de arriba abajo y de izquierda a derecha: multímetro, cronómetro, cámara subzero y variac).....	64
Figura 21. Identificación de muestras para experimento.	66
Figura 22. Diagrama de parámetros para definición de condiciones de prueba de vida acelerada.	68
Figura 23. Acomodo de tarjetas electrónicas dentro de cámara de prueba.	68
Figura 24. Tensión de salida tomada del transistor.	70
Figura 25. Equipos de control y medición para prueba de arco eléctrico (de arriba a abajo y de izquierda a derecha: fuente de energía, campana de laboratorio, multímetro, disp. de sujeción, cronómetro y medidor de ángulos).	73
Figura 26. Referencia de suministros de prueba de arco eléctrico.	75

Figura 27. Acomodo y zona de rociado en muestras de prueba de arco deléctrico.	78
Figura 28. Cortos y daños observados en muestras después de prueba de arco eléctrico (1).....	80
Figura 29. Cortos y daños observados en muestras después de prueba de arco eléctrico (2).....	81
Figura 30. Gráfico de efectos principales entre Temperatura y Tensión de entrada.	83
Figura 31. Gráfico de interacciones entre Temperatura y Tensión de entrada.....	83
Figura 32. Gráfico de cubo entre Temperatura y Tensión de entrada.....	84
Figura 33. Valores de p y modelo de regresión de la variable Y “tensión eléctrica de salida”	84
Figura 34. Análisis de los cuadrados medios.	85
Figura 35. Gráfico de dispersión de la relación del tiempo de corto o daño en tarjeta con la tensión eléctrica de entrada.....	87
Figura 36. Gráfico de dispersión de la relación del tiempo de corto o daño en tarjeta con el ángulo de posición de ensamble..	87
Figura 37. Prueba de normalidad para los residuales del experimento de arco eléctrico.....	88
Figura 38. Gráficos de dispersión e historgrama de los residuos del experiemnto de arco eléctrico.	89
Figura 39. Estadísticos de los coeficientes estimados.	90
Figura 40. Tabla de ANOVA de experimento.	90

Figura 41. Ajuste de modelo considerando sólo X_1 y X_1^2 en análisis de superficie de respuesta.....	91
Figura 42. Gráfico de contorno para identificación de niveles de X_1 y X_2 óptimos.	92
Figura 43. Función de densidad tensión eléctrica (estudio realizado por la empresa).	99
Figura 44. Total SCR en lavadoras expuestas en México.....	100
Figura 45. Principales componentes que afectan mayormente al SCR.	100
Figura 46. Extracto de Convenio General de Colaboración entre la empresa y UAQ (elaboración de la UAQ, 2016)	101

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Enfoque general / Antecedentes del problema

En la actualidad, los fabricantes de electrodomésticos, principalmente de lavadoras domésticas como parte de este estudio, requieren desarrollar productos de alta calidad que garanticen altos niveles de confiabilidad. Esto ha impulsado a desarrollar métodos de prueba en donde se someten dichos productos a condiciones de envejecimiento simuladas en laboratorio para determinar medidas que incrementen la confiabilidad de los sistemas, materiales y componentes de sus diferentes artículos.

Los métodos precisados se conocen comúnmente como pruebas de vida convencionales, pruebas de vida aceleradas (ALT) y pruebas de degradación acelerada (ADT), los cuales consisten en someter a condiciones controladas al producto para caracterizar la degradación de sus funciones y sus efectos sobre la vida útil del mismo, y con esto, calcular la confiabilidad esperada con los usuarios finales.

Ante el incremento en los últimos años de la integración de componentes eléctricos y electrónicos en las lavadoras, tales como tarjeta electrónica de control, bomba de drenado, motor impulsor, etc., las pruebas aceleradas mencionadas anteriormente han tenido que irse adecuando de acuerdo a las condiciones eléctricas a las que son expuestos, dado que estos componentes son susceptibles a fluctuaciones en parámetros de la energía eléctrica tal como la tensión eléctrica, como factor principal. Por lo anterior, resulta ser de suma importancia realizar métodos de prueba vinculados con las variaciones en la tensión eléctrica que realmente representen las condiciones normales de uso, de manera que se garantice el correcto funcionamiento de los equipos.

Esta investigación se enfoca en el estudio de aquellas variables que pueden afectar de forma directa la confiabilidad de la tarjeta electrónica de control, que forma parte de los componentes eléctricos que conforman la construcción de

una nueva plataforma de lavadoras producida a partir del año 2015 por una empresa dedicada a la fabricación de electrodomésticos en México. En particular, el estudio tiene como objeto definir los niveles adecuados de la tensión eléctrica, así como otras posibles variables involucradas (temperatura ambiental, humedad relativa y posición de las tarjetas en el diseño) que afectan significativamente la confiabilidad de las tarjetas electrónicas, de tal modo que aplicando la metodología de pruebas ALT y ADT sea posible reproducir el modo de falla “quemada o en corto” de la tarjeta bajo condiciones de prueba de laboratorio.

El presente trabajo se encuentra estructurado en cinco capítulos. El capítulo 1 contiene la información referente a la Introducción, y revisión de la literatura o mejor conocido como Estado del Arte, sección en la que se exponen aquellos trabajos de investigación recientes relacionados a las metodologías de evaluación de la confiabilidad, y las afectaciones de condiciones eléctricas, tales como la variación de la tensión eléctrica y el fenómeno de arco eléctrico, en la confiabilidad de las tarjetas electrónicas y algunos otros componentes electrónicos. Siguiendo con el capítulo 2, se revisarán las hipótesis, los objetivos y resultados esperados durante el desarrollo de la investigación.

El capítulo 3 engloba la Metodología utilizada para abordar este tema tomando en cuenta aquellos sistemas de medición utilizados para monitorear la tensión eléctrica eficaz (RMS), así como los métodos de experimentación para las pruebas de vida acelerada y arco eléctrico implementadas, y seguido del análisis estadístico requerido durante la investigación. Enseguida, en el capítulo 4 se aborda la sección de Resultados y Análisis Estadísticos, en donde de manera objetiva se analizaron los resultados finales de la experimentación y se discutieron las mejoras obtenidas, de tal forma que fueran implementadas en el proceso de evaluación de la empresa. Por último, en el capítulo 5, se cuenta con la sección de Conclusiones y Aportaciones en referencia a la aplicación de pruebas ALT/ADT para las tarjetas eléctricas de lavadoras de uso doméstico.

1.2. Estado del arte: Revisión de la literatura.

La creciente lucha en los mercados globales ha provocado que día con día las compañías sean más competitivas y eficientes en el desarrollo de nuevos productos. Uno de los retos más importantes, para dichas compañías, es el reducir el “tiempo para su introducción en el mercado” (por sus siglas en inglés TTM) en la implementación de sus productos. De esta manera, se pretende lograr la satisfacción de las necesidades del consumidor ofreciéndole productos funcionales, seguros y confiables, en el periodo de tiempo más corto posible (De Carlo et al., 2014).

Aun realizando estos esfuerzos, es común que los fabricantes lleguen a experimentar un mayor número de reclamos por garantías que el esperado, afectando no sólo sus finanzas, sino también, su imagen frente a sus clientes. La causa más frecuente tiene que ver con omisiones o errores durante el proceso de evaluación de confiabilidad del diseño (Meeker et al., 2009). En el proceso de desarrollo de un nuevo producto, se tiene una etapa conocida como diseño de prueba, y si ésta es omitida o no es diseñada correctamente, se podría tener como resultado una pobre calidad en el producto, debido a que ciertas características de los modos de falla de interés pueden no ser detectados (Yadav et al., 2006). Como consecuencia de lo anterior, estos errores provocan la falta de inclusión de mecanismos de falla (para reproducir la mayor cantidad de modos de falla posibles) y una mala selección de niveles de esfuerzo en las condiciones de prueba.

Hoy en día, la evaluación de los productos, a través del uso de técnicas tradicionales de pruebas de vida, es decir, por medio de solamente monitorear los tiempos de falla, no es suficiente para determinar su confiabilidad en tiempos razonables durante el proceso de diseño. Por lo que, con el fin de obtener resultados de confiabilidad en tiempos más cortos, investigadores han mezclado pruebas de vida convencionales con el uso de pruebas aceleradas (ALT) y pruebas de degradación acelerada (ADT) en el proceso de evaluación (De Carlo et al., 2014).

Como parte de los esfuerzos para predecir la confiabilidad de un producto, se usan esas pruebas tradicionales o aceleradas, con el fin de simular condiciones de prueba representativas, y así, caracterizar los posibles modos de falla de un producto (Nelson, 1974); (Meeker et al., 2009).

Desde hace varias décadas se han aplicado pruebas ALT en diferentes sectores de la industria. Nelson (1974) fue el primero en introducir la teoría de las pruebas de vida acelerada y demostró su validez, pero también existen múltiples estudios previos y posteriores que hablan de la aplicación de pruebas ALT en diferentes materiales y productos. Las tres referencias que a continuación se muestran son un ejemplo claro de las diferentes aplicaciones en donde se ha hecho uso de pruebas ALT durante los años 60's y 70's. La primer referencia tiene que ver con la infinidad de trabajos realizados para acelerar la vida de aislamientos eléctricos, a través del envejecimiento por temperatura, los cuales se pueden encontrar en una compilación de referencias realizada por Goba (1969). También se tiene otra aplicación de pruebas aceleradas para dispositivos electrónicos de estado sólido, la cual fue presentada por Peck (1971). Por último, se encuentran los métodos utilizados por (McCallum J., Thomas R. E., 1973) para la realización de pruebas aceleradas en celdas de baterías espaciales.

En cuanto a estudios recientes de pruebas aceleradas, se encuentran aquellos realizados por Escobar and Meeker (2006), quienes presentaron una revisión de los modelos utilizados en pruebas aceleradas, con el fin de determinar los niveles de estrés adecuados y entender la relación entre la vida normal y el sobre-estrés de los componentes o productos evaluados.

En los últimos años la literatura también presenta un importante desarrollo de las pruebas ADT, que aunadas a la aplicación de pruebas ALT, complementa las necesidades del mercado y los consumidores: desarrollar y manufacturar productos de alta confiabilidad en el menor tiempo posible. Dentro de los estudios de pruebas ADT recientes que se han realizados en otros campos de la ingeniería, tal como la electrónica, podemos encontrar el de Chen et al. (2011) quienes desarrollaron un

modelo de degradación estadístico para evaluar la confiabilidad de un conector eléctrico para la industria aeroespacial; la aplicación de ADT en micro electrónicos avanzados para sistemas aeroespaciales realizado por White et al. (2013); la determinación de la duración óptima en los pasos de estrés durante pruebas de vida presentado por Fard and Li (2009); el estudio realizado para incrementar el índice de uso de un relevador compacto para acelerar su mecanismo de falla por Yang and Zaghati (2006), entre otros.

A pesar que las pruebas ALT y ADT han sido aplicadas en distintos materiales, componentes, y productos para diferentes ramas de la industria, no se tienen muchas referencias en cuanto a su aplicación en electrodomésticos, específicamente en lavadoras de ropa domésticas. Entre los estudios recientes que son de interés se encuentran el de Borgia et al. (2013) en donde se aborda el uso de pruebas aceleradas y consideraciones necesarias para su aplicación en los electrodomésticos, y como continuación de este estudio De Carlo et al. (2014) se enfoca particularmente en aplicar las pruebas aceleradas al sistema de oscilación (canasta, tina y el resto de los componentes involucrados en el sub ensamble) de una lavadora de ropa doméstica.

También se menciona el estudio realizado por Park et al. (2006) en donde hacen uso de pruebas ALT para su implementación en la evaluación de confiabilidad de la bomba de drenado de una lavadora. El estudio resulta de particular interés ya que sugiere una mezcla interesante de técnicas, posiblemente aplicables a este tema de investigación, para la evaluación de componentes. Los autores sugieren que, para determinar la confiabilidad de un componente de forma poco costosa y en menos tiempo, es importante llevar a cabo pruebas escalonadas bajo ciertas condiciones ambientales de estrés, para entender claramente los límites de operación bajo los cuales la parte en cuestión desempeña su función, y así, usando los límites identificados, complementar la evaluación de la bomba de drenado con la realización de pruebas aceleradas.

Otro estudio muy importante por mencionar, aunque no fue aplicado directamente a una lavadora, es el trabajo de Xie and Lu, (2016), el cual está relacionado directamente a pruebas de degradación aplicadas en tarjetas electrónicas (PCB) grado FR-4 para analizar y determinar su confiabilidad. El enfoque de este trabajo se centra en los mecanismos de falla necesarios para producir un corto eléctrico en las tarjetas. Xie y Lu determinan una prueba ADT usando como mecanismos de falla la temperatura ambiente, la humedad relativa y la influencia de la tensión eléctrica como factores esenciales para provocar el fenómeno de Migración Electroquímica (ECM, por sus siglas en inglés) entre los componentes metálicos usados en las soldaduras y circuitos del PCB, y eventualmente producir un corto eléctrico.

Es en presencia de los mecanismos de falla antes mencionados (temperatura, humedad y tensión eléctrica) es como se provoca la formación de “dendritas” (fenómeno ECM), que son filamentos muy pequeños que crecen conforme se va transportando iones entre los metales del PCB. La degradación en los materiales de aislamiento y crecimiento de las dendritas desembocan finalmente en un corto eléctrico. Basado en el análisis del fenómeno ECM, la tensión eléctrica de operación es la fuerza impulsora para la transportación de iones y la formación de “dendritas” (Xie and Lu, 2016).

Por último, en el método IEC 60112:2013 “Método de determinación de los índices de resistencia y de prueba a la formación de caminos conductores de los materiales aislantes sólidos” (IEC 60112, 2003), también se hace uso de mecanismos de falla para inducir un arco eléctrico y determinar sus efectos. En este método se describe un ensayo eléctrico realizado en los materiales aislantes sólidos de equipos o componentes, aplicando alternadamente tensiones eléctricas, de tal forma que se pueda determinar las partes que puedan sufrir un incendio. El fenómeno del arco eléctrico se caracteriza por una descarga luminosa que sucede cuando una corriente eléctrica fluye a través de un medio o material no conductor en el espacio entre dos electrodos. Si este fenómeno se presenta continuamente

por un periodo de tiempo considerable, puede provocar que los materiales a su alrededor se calienten, carbonicen, y finalmente inicien la propagación de fuego.

Partiendo de la información revisada anteriormente, no se cuenta con estudios previos en referencia a la aplicación de pruebas ADT y/o ALT en las tarjetas electrónicas de las lavadoras de ropa de uso doméstico, sin embargo, con base en los estudios y métodos mencionados anteriormente, así como los métodos o protocolos de prueba propios, se tienen las guías necesarias a considerar en la evaluación de confiabilidad de estos productos.

La empresa cuenta con métodos propios para determinar la confiabilidad de las lavadoras y sus componentes, todos éstos desarrollados por su más grande aliado estratégico en Estados Unidos de Norteamérica. Entre estos métodos se encuentran la prueba de “Ciclos continuos” y las pruebas de “Confiabilidad de electrónicos”.

1.2.1. Ciclos continuos (Procedimiento de prueba de ingeniería de GE, 2011).

Fue desarrollado en los 90's, también conocido en español como prueba de ciclos continuos (General Electric, 2011), y tiene como finalidad validar la confiabilidad de las lavadoras en un periodo de 10 años simulados, simulando condiciones de uso normales que pueden encontrarse en campo. En la Tabla 1, se muestran las principales condiciones de prueba de este procedimiento.

1.2.2. Confiabilidad de electrónicos (Procedimiento de prueba de ingeniería de GE, 2013).

Está compuesto por una serie de métodos de prueba que son usados para evaluar la confiabilidad y calidad de ensamblajes electrónicos. Específicamente se usan sólo 2 tipos de pruebas de confiabilidad, conocidas como prueba de vida acelerada y prueba de vida altamente acelerada (ALT y HALT por sus siglas en

inglés). Tienen como objetivo el acelerar modos de falla tales como corrosión, sobre esfuerzo mecánico, y degradación de las propiedades de los diferentes componentes en interacción, lo anterior se logra usando como mecanismos de falla la temperatura ambiente, humedad relativa y vibración. Los niveles utilizados en pruebas ALT y HALT (General Electric, 2013) utilizados para componentes electrónicos de una lavadora se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de prueba de los métodos actualmente usado.

Parámetro de Ruido (KNP como fue definido en diagrama P)	Configuración como entrada de prueba (Configurar a este nivel)
Prueba ciclos continuos	
A. Tensión Eléctrica	120 VCA \pm 10%
B. Temperatura de Agua	Caliente 71.1° \pm 15 F, Fria 60° \pm 15 F
C. Dureza de Agua	5 -15 granos/galón
D. Altura de Drenaje	42" \pm 6"
Prueba ALT y HALT	
A. Temperatura ambiente	120°C a 160°C
B. Humedad relativa	50% a 85° RH
C. Vibración	10 a 55 Grms
D. Tensión eléctrica	120 VCA \pm 10%

Como se puede apreciar en la tabla anterior, tanto el el procedimiento de prueba “Ciclos continuos” como “Confiabilidad de electrónicos”, consideran como una de las condiciones de prueba, el nivel de tensión eléctrica (V) en el suministro de energía, el cual debe encontrarse controlado en el rango de 120 VCA \pm 10%, de tal manera que representa verazmente la condición de los suministros eléctricos que se pueden encontrar en los países de América del Norte. De acuerdo a la declaración realizada por la compañía de energía PACIFIC CORP (PacifiCorp 1C.2.1, 2011) se muestra evidencia de que los rangos de tensión eléctrica entregados para los estados del centro del país, se encuentran dentro de los requeridos por la norma ANSI C84.1 Electric Power Systems And Equipment - Voltage Ratings 60 Hz (ANSI C84.1-2011, 2011), tal y como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Rangos de voltajes en el servicio entregados por PacifiCorp

Tensión nominal en el servicio	Rango B Mínimo	Rango A Mínimo	Rango A Mínimo	Rango B Mínimo
Una Fase				
120/240, 3 cables	110/220	114/228	126/252	127/254
Tres Fases				
240/120, 4 cables	220/110	228/114	252/126	254/127
208Y/120,4 cables	191/110	197/114	218/126	220/127
480Y/277,4 cables	440/254	456/263	504/291	508/293
2.4 a 34.5 kV % del nominal	0.95	0.975	1.05	1.058
Arriba de 34.5 kV	Ver el manual de ingeniería en su sección 1B.3.			

Sin embargo, los valores de tensión eléctrica que consideran estos procedimientos de prueba (120 VCA \pm 10%) no cubren con los rangos que entrega el sistema eléctrico de algunas regiones de México. A pesar de que la norma mexicana NMX-J-521/1-ANCE-2012, “Aparatos electrodomésticos y similares – Seguridad – Parte 1: Requisitos generales” (ANCE, 2012), menciona que todos los aparatos eléctricos deben construirse para que funcionen correctamente y con seguridad, son los diferentes fabricantes quienes definen los niveles de tensión y frecuencia a los cuales se realizan las pruebas, y si bien esas condiciones son elegidas de acuerdo a los lineamientos de la norma, es decir, utilizando las más desfavorables para el aparato en cuestión, éstas son definidas dentro de los rangos de operación ideales, de tal forma que no siempre contemplan variaciones instantáneas o continuas que se presentan en los suministros de energía de los hogares.

También se conoce que el nivel de tensión eléctrica suministrado en los hogares de México debería estar normalizado, de acuerdo a los lineamientos de la norma mexicana NMX-J-098-ANCE-1999, “Sistemas eléctricos de potencia – suministro – tensiones eléctricas normalizadas” (ANCE, 1999), en la que se menciona que la tensión eléctrica de servicio en los suministros de energía debe estar entre 108 VCA a 126 VCA, como se muestra en la Tabla 3, sin embargo, se

tienen estudios que han demostrado que estos rangos no se cumplen en diferentes ubicaciones de la nación y en periodos de tiempo determinados durante el día.

Tabla 3. Bajas tensiones normalizadas para México (NMX-J-098-ANCE-1999, “Sistemas eléctricos de potencia – suministro – tensiones eléctricas normalizadas ”)

Clasificación	Tensión eléctrica nominal del sistema (1) VCA			Tensión eléctrica de servicio VCA		Tensión eléctrica nominal de utilización VCA (3)
	1 fase 3 hilos	3 fases 3 hilos	3 fases 4 hilos	máximo	mínimo	
Baja tensión	120/240 -- -- --	.- - -- -- 480	.- - 220 Y/127 480 Y/277 --	126/252 231/133,3 504/291 504	108/216 198/114,3 432/249,4 432	115/230 208 Y/120 460 Y/265 460

En el estudio realizado por Ramírez (2012), se respalda lo anterior ya que él monitoreó y analizó la calidad de la energía eléctrica en el Laboratorio de Automatización de la Facultad de Ingeniería de la UAQ, encontrando una variación en la tensión eléctrica que va de los 89.5 VCA a los 137 VCA (ver Tabla 4).

También algunos estudios recientes (realizados por la empresa (ver Anexos: caracterización de parámetros de ruido), muestran que en diferentes partes de la república mexicana se tienen variaciones picos de tensión eléctrica que van desde los 65 VCA hasta casos extremos de 322 VCA en viviendas en Mérida, Yucatán, evidenciando que la calidad de la energía eléctrica es menor a aquella con la que se cuenta en países norteamericanos y en condiciones controladas de laboratorio.

Tabla 4. Tabla de voltajes máximo, mínimo y promedio medido con equipo Fluke 43B 1ra. Prueba (Ramírez, 2012).

Fase	Voltaje Máximo	Voltaje Mínimo	Voltaje Promedio
A	137.8 VCA	89.5 VCA	128.65 VCA
B	137.7 VCA	123.4 VCA	130.55 VCA
C	137.5 VCA	127.7 VCA	132.6 VCA

Es conocido que las interrupciones, las variaciones de tensión eléctrica, los picos de corriente, etc., suelen desgastar partes eléctricas y electrónicas hasta causar fallas en las mismas (Klaić et al., 2011). Es por esto que tales condiciones mostradas en la tabla anterior, pueden afectar de manera significativa el desempeño de la tarjeta electrónica.

Con base en la literatura revisada para este trabajo de investigación, es evidente que anteriormente no se ha aplicado el principio de pruebas ALT y ADT a la tarjeta electrónica de una lavadora doméstica, ni tampoco se han considerado los niveles adecuados, al territorio mexicano, de tensión eléctrica en pruebas de vida, de tal forma que no se cuenta con evidencia clara de las afectaciones que esto conlleva sobre el componente, incluyendo el modo de falla de tarjeta con corto eléctrico que es objeto de este trabajo.

2. OBJETIVO

2.1. Justificación

Para determinar las condiciones normales de uso y acelerar la degradación en la tarjeta electrónica, es necesario determinar las situaciones en donde se ubicarán los productos con el usuario final, variables tales como la tensión eléctrica, que se encuentran determinadas para el mercado norteamericano, pero que, en México, a pesar que se cuentan con normativas oficiales, no se han comprobado de forma clara que los niveles se cumplan en los hogares de la población en general. Por lo anterior, es que en México sólo se aplican métodos de prueba que incluyen parámetros de prueba referenciados a estándares norteamericanos.

De lo anterior, se observa la necesidad insatisfecha de adecuar las pruebas con variables que reflejen la realidad a la que serán expuestos los productos en el mercado mexicano, dado que los estándares y calidad de energía en cada país difiere.

Así que fue necesario, verificar por una parte qué tanto difieren las condiciones de tensión eléctrica de México en comparación con Norteamérica y cómo afectan a las tarjetas electrónicas, para con ello modificar las variables concordantes con dichos datos, y así verificar si los modos de falla (específicamente la presencia de cortos circuitos) que se generen con las pruebas de vida acelerada traen como resultado un decremento en la estimación de vida útil del producto, para así modificar con base en lo anterior las características del producto e incrementar su confiabilidad y con ello su eficiencia en un periodo mayor al que se pudo haber pronosticado con variables que no corresponden a la realidad de la zona a la cual está destinado.

Por consiguiente, la utilidad de la presente investigación será la de adecuar las variables de las pruebas aceleradas de vida para el territorio mexicano, donde se iniciará su estudio en el territorio de la Cd. de Querétaro, esto por cuestiones de logística y metodología los cuales se exponen en el apartado correspondiente, lo que ayudará a la empresa a obtener una mejora en la realización de pruebas de confiabilidad de sus productos comercializados en México, al ser que con este

trabajo no se pretende omitir o disminuir el uso de las variables, sino entenderlas o añadir otras que ayudarán a pronosticar de manera más efectiva el comportamiento de las tarjetas electrónicas durante el uso normal de la lavadora.

2.2. Preguntas de investigación

- ¿Qué mecanismos de falla deben incluirse en pruebas de laboratorio para asegurar la detección cortos eléctricos o daños en los componentes que integran las tarjetas electrónicas (PCBA) de lavadoras?
- ¿Cuáles son los niveles de tensión eléctrica, u otras variables, necesarios para desarrollar pruebas ALT y ADT efectivas para la tarjeta electrónica de las lavadoras de ropa?

2.3. Hipótesis

Al relacionar niveles altos de tensión eléctrica, en el suministro de los hogares de la cd. de Querétaro, con el diseño de pruebas de vida y degradación acelerada, se incrementará la oportunidad de reproducir cortos eléctricos en tarjetas electrónicas de lavadoras domésticas de carga superior que se comercializan en México.

2.4. Objetivos

2.4.1. Objetivo general.

Incrementar la reproducción de corto circuito, por medio de la implementación de pruebas de vida y degradación acelerada, en las tarjetas electrónicas de lavadora, considerando niveles de tensión eléctrica representativos al suministro de energía en la Cd. de Querétaro en una prueba de vida acelerada.

2.4.2. Objetivos particulares.

Generar una base de datos con registros de tensión eléctrica, en tiempo real, en viviendas que pertenecen a la ciudad de Querétaro.

2.5. Impactos

Algunos resultados esperados de esta investigación no sólo tienen un impacto en la calidad de los diseños de la empresa, sino que también generan beneficios relacionados con la mejora en el laboratorio del producto y costos por reducción de los índices de calidad.

Resultados esperados:

- Método de prueba específico para evaluar tarjetas eléctricas de lavadoras, que incluye como parámetros de prueba, los mecanismos de falla involucrados.
- Incremento en cantidad de modos de falla reproducidos en pruebas de laboratorio para retroalimentación del diseño y mejora del mismo.
- Mejora en la confiabilidad de las lavadoras domésticas que la empresa comercializa en México.

Algunos beneficios:

- Caracterización de rangos y variación de la tensión eléctrica en la ciudad de Querétaro.
- Posteriormente a la etapa de mediciones en la cd. Querétaro, el estudio servirá como base para replicarlo en el resto de los estados del territorio mexicano.

3. METODOLOGÍA

Este capítulo describe a detalle la metodología empleada para la realización del presente trabajo de investigación.

Inicialmente se describe el problema que se tenía a finales del 2016 con referencia a la calidad de los componentes electrónicos en las lavadoras, en donde se encontró un porcentaje de SCR más alto en las tarjetas electrónicas que en el resto componentes reportados. También, se hace uso de herramientas de calidad, como el diagrama de bloques funcionales y el diagrama de parámetros, para describir de forma clara los componentes que integran la tarjeta y sus funciones principales.

Posteriormente, como resultado del diagrama de parámetros, se identificaron las variables de control y ruido que están asociadas a los mecanismos de falla que pueden provocar un corto eléctrico en las tarjetas, y de esta manera, fueran consideradas a ser integradas en pruebas experimentales. El sistema de medición definido para llevar a cabo el monitoreo y registro de las variables más importantes, es analizado a fondo para asegurar la confiabilidad de las mediciones durante toda la etapa de experimentación.

Las mediciones de tensión eléctrica y temperatura, realizadas en diferentes partes de la ciudad de Querétaro, permitió entender y definir las variaciones en el suministro eléctrico y temperatura ambiental presentes en las viviendas analizadas. Los rangos identificados sirvieron para diseñar dos pruebas ALT/ADT que de manera precisa son capaces de reproducir desgaste y cortos circuitos inducidos a los componentes que integran las tarjetas electrónicas.

En la parte de “experimentación” de este capítulo primeramente se realizó un diseño de experimentos con base en los niveles encontrados de temperatura y tensión eléctrica en la ciudad de Querétaro (tanto niveles altos y bajos son incluidos). El diseño consistió en envejecer las tarjetas electrónicas por 150 horas, usando temperaturas ambientales de 60°C y 85°C, con tensión eléctrica de 90VCA y 145VCA, y todo bajo condiciones de humedad relativa controlada (85%RH). Lo

anterior con el objetivo de provocar desgaste en los circuitos y componentes eléctricos de las tarjetas.

Como complemento del experimento mencionado arriba, también se llevó a cabo un segundo experimento, en el que se incluyeron variables tales como la variación en la tensión eléctrica de entrada, ángulo de posicionamiento de la tarjeta en el ensamble dentro de la lavadora, y todo bajo un ambiente saturado de solución de agua con 25% de detergente líquido, para inducir el fenómeno de arco eléctrico de forma más rápida y poder reproducir el modo de falla “corto eléctrico” de manera efectiva. En este diseño de experimento se consideraron tanto niveles altos de las variables en cuestión, así como los puntos medios y estrella de un diseño central compuesto de 2 factores.

En la última etapa del capítulo, se realizó el análisis de los resultados obtenidos utilizando herramientas estadísticas para encontrar el modelo estadístico óptimo que asegure una mejora en la reproducción de fallas en bajo condiciones de prueba en laboratorio, así como la identificación de las variables significativas que presentan mayor afectación a la vida de las tarjetas de control de la lavadora.

3.1. Descripción de producto/componente al que va dirigido el estudio y fundamentación teórica de los fenómenos estudiados.

En el año 2015 la empresa lanzó al mercado de forma exitosa una nueva plataforma de lavadoras que actualmente es vendida en Estados Unidos de Norteamérica, Canadá y México. La plataforma cuenta con atributos especiales (control electromecánico, 13 diferentes ciclos de lavado automático, y con tecnología ahorra-agua) que ayudaron a que sea un producto mercadeable y rentable para la compañía, sin embargo, a inicios del año 2017 se muestra que en uno de los indicadores de calidad de la empresa (% Service Call Rate, en lo posterior SCR) se han reportado hallazgos relacionados a la confiabilidad de algunos componentes electrónicos y eléctricos que son usados en la construcción del producto. Dentro de los componentes que presentan hallazgos, se aprecia que la tarjeta electrónica de control es la que contribuye con el mayor % de SCR, la cual muestra un 0.86% reportado durante el primer año de exposición de las lavadoras en México (ver Figura 1). El resto de los componentes reportados, si bien son temas que también deben resolverse, no representan un porcentaje alto en el SCR ni tampoco serán parte de este trabajo de investigación.

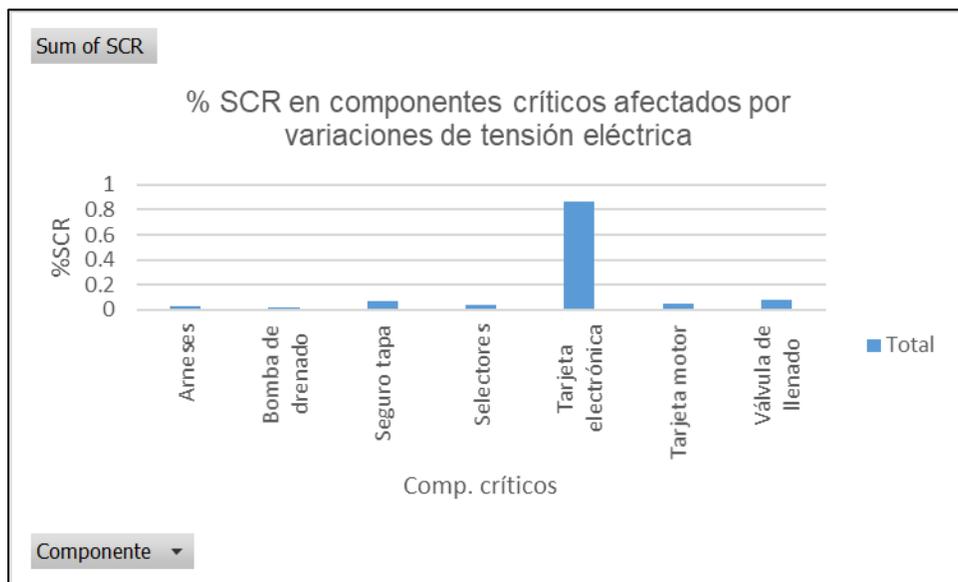


Figura 1. Principales componentes contribuidores del SCR a enero 2017 (creación propia con datos de la empresa).

La planeación, diseño de pruebas, y diseño de experimentos se llevaron a cabo por el equipo de laboratorio de confiabilidad de la empresa dentro de las instalaciones de su Centro de Tecnología, el cual está ubicado en la ciudad de Querétaro.

3.1.1. Funcionamiento de tarjeta electrónica de la lavadora:

Como se muestra en la Figura 2, la tarjeta electrónica PSAL164960 está interconectada a diferentes componentes, que no son propiamente parte del ensamble tarjeta (PCBA), a través de arneses de cables para el envío de señales eléctricas. Entre estos componentes se encuentran el motor, las válvulas de agua caliente y fría, la bomba de drenado, el termo-actuador, y el seguro de la tapa, todos ellos controlados por la tarjeta durante la operación de la lavadora.

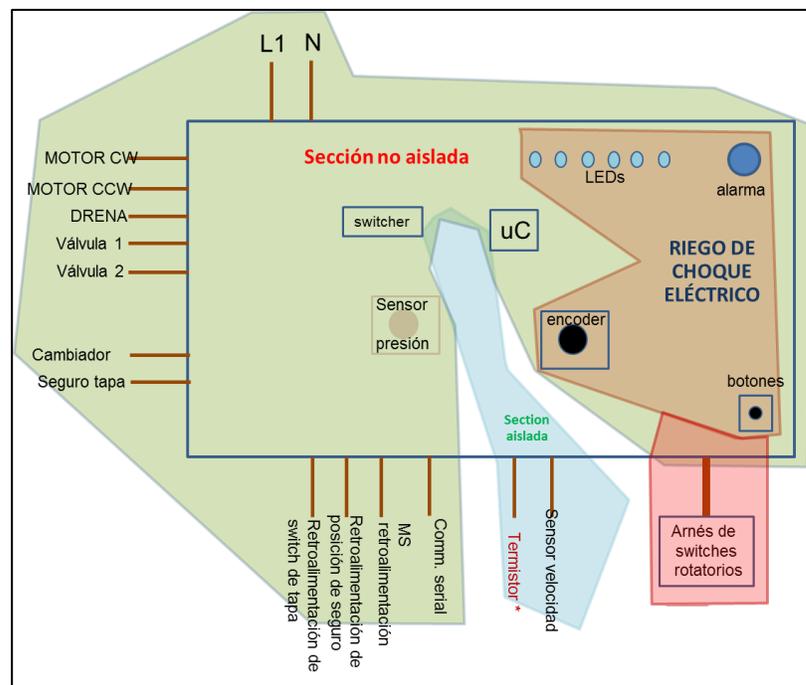


Figura 2. Esquema de componentes externos que controla la tarjeta electrónica (creación propia con información de la empresa)

Algunos de los componentes eléctricos de las tarjetas que sufren daños por sobre cargas durante su exposición en campo, son los que integran la fuente de poder, tales como capacitores, resistencias eléctricas, diodos, y condensadores.

También se cuenta con evidencia de daños por corto eléctrico en relevadores, triac y entre las pistas de los circuitos, aunque los mecanismos de falla son diferentes a los presentados por envejecimiento de los componentes.

En el diagrama de bloques funcionales presentado en la Figura 3 se aprecia que los componentes mencionados son partes críticas en la construcción del ensamble, ya que éstas son de vital importancia para su correcto funcionamiento, si alguna de ellas llegará a fallar, se perderían funciones por completo.

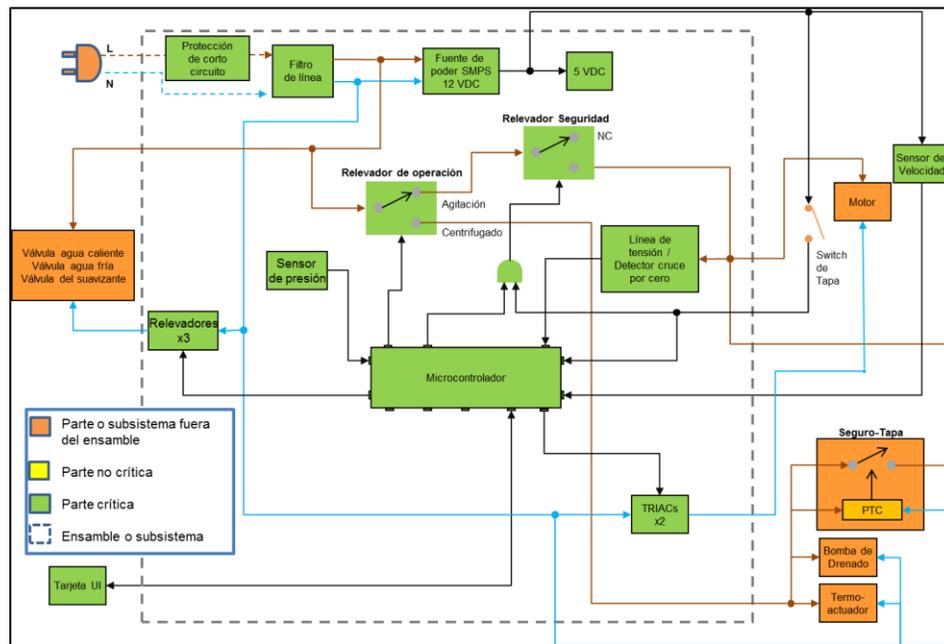


Figura 3. Diagrama de bloques funcionales de la tarjeta electrónica (creación propia con información de la empresa)

Los componentes anteriormente mencionados (ver Figura 4), tienen funciones específicas dentro del ensamble tarjeta electrónica (PCBA), como la fuente de poder, la cual tiene como funciones el convertir la corriente eléctrica alterna que viene de la calle (por lo general 120 VCA o 220 VCA), en un flujo de corriente directa, así como de reducir la tensión eléctrica que oscila entre los 5 VCD y 12 VCD, y redistribuirlo a cada parte del circuito y componentes de una tarjeta. Básicamente es la encargada de suministrar energía a todos los dispositivos internos de la tarjeta e inclusive, a algunos externos.

También se menciona al triac, el cual es un componente electrónico semiconductor que sirve para controlar la corriente alterna. Este dispositivo se configura para controlar el porcentaje de señal que se proporciona al motor.

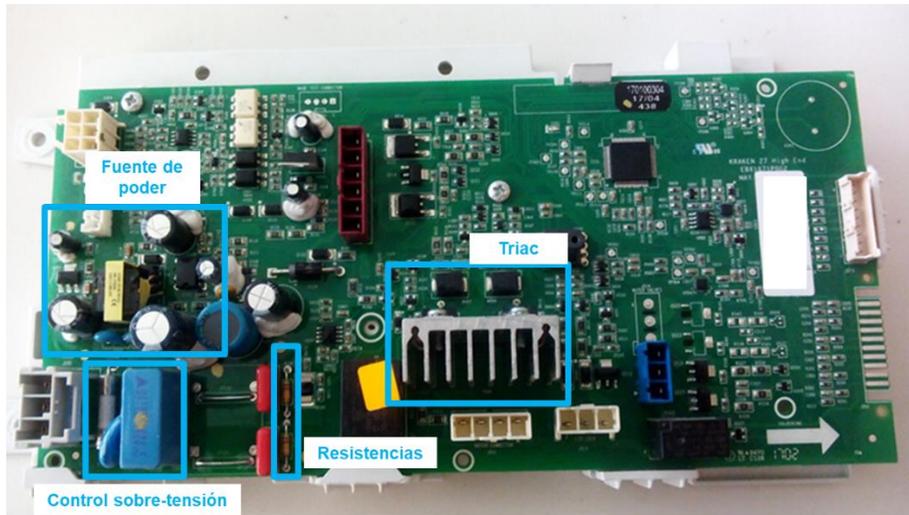


Figura 4. Componentes propensos a sufrir daños por corto eléctrico.

Estos componentes son afectados directamente por sobre cargas de tensión eléctrica y corriente, que llegan directamente a ellas en porcentajes más altos a los que pueden soportar, causando la pérdida total tanto del circuito como de varios de los componentes que la componen. Ocurre generalmente cuando hay pérdida de energía total y luego ésta llega con más intensidad.

Modos de falla asociados a condiciones de Campo.

En concordancia con lo mencionado anteriormente, los principales códigos de falla reportados en la empresa, con referencia a las tarjetas, se muestran en la Tabla 5. A pesar de que la descripción de fallas reportada por el personal de servicio no es tan detallada, posteriormente fue corroborado directamente con los técnicos de servicio, que en los 3 modos de falla reportados se observó en la mayoría de los casos que había presencia de carbón en algunos componentes o zonas de la tarjeta (fuente de poder y diodos o resistencias periféricas a la misma) esto como evidencia de que en cierto momento se presentó el fenómeno de arco eléctrico o corto eléctrico.

Tabla 5. Códigos de falla relacionados al % SCR de tarjeta electrónica (creación propia con datos de la empresa)

ID	Falla
2161	Tarjeta electrónica lav. Quemada o en corto
2163	Tarjeta electrónica lav. No funciona en lavado
2592	Tarjeta electrónica dañada

Algunas de las fallas reportadas en Campo se muestran en la Figura 5, en las cuales se aprecia claramente daños permanentes en los componentes eléctricos, así como en las pistas que conforman los circuitos de los PCBA's.

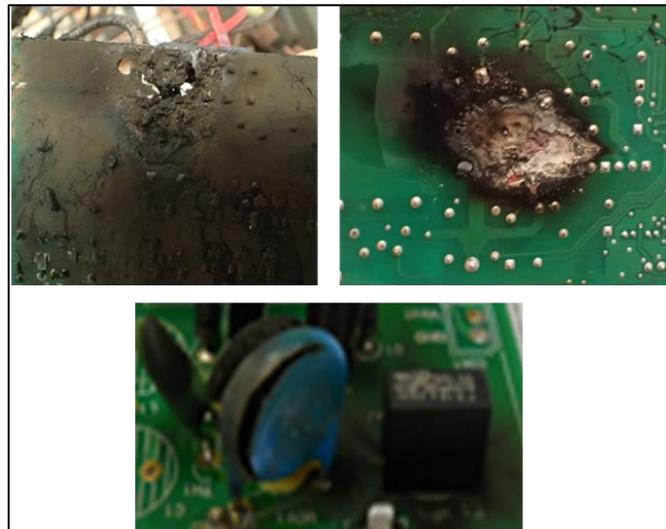


Figura 5. Componentes y circuitos que presentan corto eléctrico o daño por efecto del mismo.

Los modos de falla de Campo no pudieron ser reproducidos de forma efectiva durante el proceso de evaluación debido a que la plataforma de lavadoras fue evaluada bajo procedimientos de confiabilidad “ciclos continuos”, “ALT” y “HALT” (General Electric, 2011-2013) sin considerar las condiciones eléctricas que se presentan en los hogares de los usuarios finales en México, debido al enfoque único que se tenía hacia el mercado norteamericano durante el proceso de evaluación.

La mala calidad de la tensión eléctrica y la incorrecta selección de niveles puede traducirse en un bajo índice de reproducción de modos de falla (lograr que

las fallas se presenten intencionalmente bajo condiciones controladas) durante las pruebas de vida, especialmente en componentes tan sensibles como la tarjeta electrónica.

El enfoque de este estudio está exclusivamente relacionado a asegurar la reproducción de modos de falla con el uso de pruebas ALT y/o ADT, mas no a eliminar o reducir el % de SCR actual en las tarjetas electrónicas.

3.1.2. Fundamentación teórica de los fenómenos estudiados.

3.1.2.1 Fenómeno de corto eléctrico.

Se denomina corto eléctrico o cortocircuito al fallo en un aparato o línea eléctrica por el cual la corriente eléctrica pasa directamente del conductor activo o fase al neutro o a tierra en sistemas monofásicos de corriente alterna, entre dos fases o igual al caso anterior para sistemas polifásicos, o entre polos opuestos en el caso de corriente continua. Es decir, es un defecto de baja impedancia entre dos puntos de potencial diferente y produce arco eléctrico, esfuerzos electrodinámicos y esfuerzos térmicos.

El corto eléctrico se produce normalmente por los fallos en el aislante de los conductores¹, cuando estos quedan sumergidos en un medio conductor como el agua o por contacto accidental entre conductores² aéreos por fuertes vientos o rotura de los apoyos (Figura 6).

Debido a que un corto eléctrico puede causar importantes daños en las instalaciones eléctricas e incluso incendios en los productos eléctricos, éstos están normalmente dotados de fusibles o interruptores termo magnéticos con el fin de proteger a las personas y los objetos. Además, cabe señalar que en sistemas de corriente alterna se producen por diferencia en ángulos de desfase eléctrico.

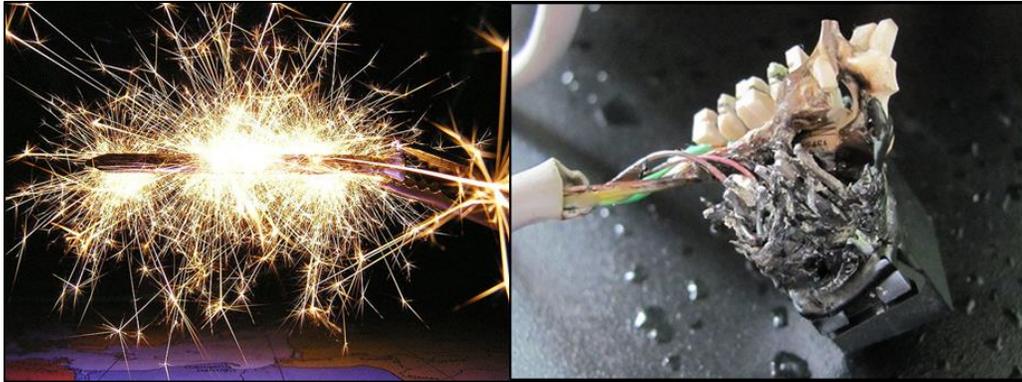


Figura 6. Corto eléctrico y efecto del mismo ocasionado por agua en un conector RJ45.

Según Jellesen et al. (2010), existen 4 causas principales que pueden provocar un corto eléctrico en una tarjeta eléctrica (PCBA), pueden presentarse por calor, daños eléctricos, variaciones de tensión eléctrica, o daños físicos (impacto o presencia de humedad).

La primera causa más común cuando una PCBA puede fallar es a través del calor. La mayoría de sus componentes son particularmente sensibles al calor, y aún más aquellas tarjetas que se encuentran en el interior de compartimentos en donde la temperatura puede llegar a ser bastante caliente. Conforme pase el tiempo, esto puede provocar que la PCBA falle definitivamente.

Una segunda causa común de fallo de la tarjeta es el daño eléctrico. Comúnmente esto ocurre durante el mantenimiento o servicio de un producto, como, por ejemplo, cuando se instalan nuevos dispositivos periféricos. Durante el mantenimiento, si el técnico tiene electricidad estática acumulada en sus manos, eso se puede descargar en la tarjeta eléctrica echándola a perder.

La tercera causa está relacionada a las subidas de tensión eléctrica, tales como las creadas por variaciones súbitas en el suministro eléctrico, o como cuando un relámpago pega en una línea eléctrica. Esto generalmente se puede evitar utilizando un protector de sobretensión, pero algunas subidas son lo suficientemente potentes como para doblegar al protector contra sobretensiones y provocar un corto que destruya la tarjeta.

La última causa frecuente de fallo de la tarjeta es el daño físico. Esto puede ocurrir debido al daño producido por el agua o por un impacto físico real. Aunque las tarjetas están normalmente bien protegidas, un golpe lo suficientemente fuerte o la introducción de agua en ella pueden hacer que falle.

3.1.2.2 Fenómeno de migración electroquímica (ECM).

La migración electroquímica es caracterizada por el movimiento de iones de metal entre conductores metálicos adyacentes, para formar dendritas. Los parámetros de control en este fenómeno son los abajo listados.

- Condensación o humedad alta, medida como % de humedad relativa.
- La presencia de iones de metal en movimiento.
- Un gradiente de potencial alto, expresado en voltios por largo de unidad de (V/cm).

Las altas temperaturas pueden también agravar el problema. Los iones de metal hidratados, siendo estos con cargas positivas, migrarán hacia el cátodo, formando una dendrita, la cual tiene una estructura como de aguja o ramita de un árbol como se muestra en la Figura 7. La dendrita el primordial indicador del fenómeno ECM.

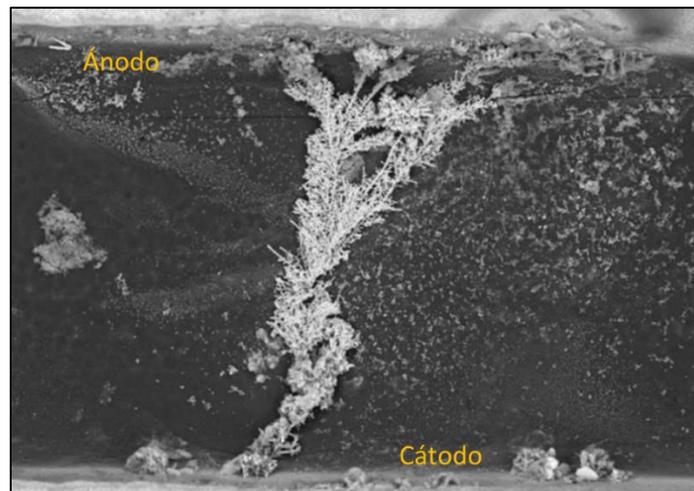


Figura 7. Formación de dendrita como efecto de ECM.

3.1.2.3 Fenómeno de arco eléctrico.

El 35.1% de los hogares en México poseen instalaciones eléctricas inadecuadas y, por lo tanto, tienen un riesgo mayor de que se pueda presentar un desperfecto en las mismas (Puszkar y Gómez, 2013).

Uno de los desperfectos se trata de presencia de arco eléctrico en las instalaciones o en los aparatos que son alimentados. El arco eléctrico se caracteriza por una descarga luminosa que sucede cuando una corriente eléctrica fluye a través de un medio o material no conductor en el espacio entre dos electrodos (ver Figura 8).

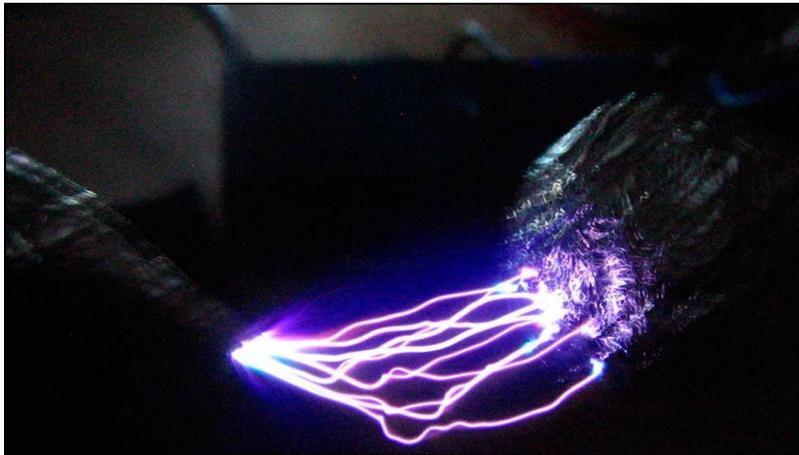


Figura 8. El arco eléctrico (foto publicada por okdiario.com)

A pesar de que el arco eléctrico tiene varias aplicaciones, por ejemplo, como fuente de iluminación en lámparas de descarga o como generador de calor en el proceso de soldado de metales, cuando ocurre de forma imprevista, puede representar un riesgo para los usuarios finales de componentes eléctricos.

Cuando la energía eléctrica que se transfiere en un arco eléctrico entra en contacto con un ser vivo, puede ocasionar quemaduras graves, fallas en el sistema circulatorio e incluso la muerte. Si el arco eléctrico se presenta de forma sostenida por un periodo de tiempo largo, éste puede provocar que algunos materiales inflamables cercanos a la fuente puedan ser incendiados por efecto de las altas temperaturas generadas durante el fenómeno.

En el año 2009 UL inició una investigación especial con el fin de promover la seguridad de los consumidores. El trabajo de investigación busca usar datos paramétricos, generados por la observación de un gran número de incidencias (>100 mil) de arcos eléctricos, para construir un modelo estadístico que permita caracterizar el comportamiento y la formación de los mismos. Este proceso ha logrado identificar a la distribución logarítmica normal como el modelo probabilístico que se puede usar para predecir la corriente pico y otras variables del arco eléctrico.

El experimento realizado implica la división del evento de arco eléctrico en unidades pequeñas (por ejemplo, un medio ciclo cuando se analizan arcos eléctricos de corriente eléctrica alterna en instalaciones residenciales). Para cada una de estas observaciones se registran parámetros numéricos, los cuales son indexados a una variedad de condiciones ambientales; toda esta información se analiza con herramientas estadísticas para entender cómo se comporta el fenómeno de arco eléctrico.

Este método experimental permite, entre otras cosas, documentar la cantidad total de energía liberada por el arco eléctrico como principal indicador de la posibilidad de ignición del material combustible, así como la caracterización de la duración esperada del arco eléctrico, en relación con las condiciones de prueba. De la misma manera, se concluyó que el lapso total del arco depende del tipo de cable que se usa y la corriente; es decir, mientras más alta es la corriente, menos dura el arco eléctrico (esto se debe en parte a la carbonización acelerada del área donde se genera el arco). Asimismo, los conductores sólidos tienden a generar arcos más duraderos que los cables equivalentes de conductores trenzados.

En el estudio del fenómeno de arco eléctrico, los resultados obtenidos nos permiten cuantificar posibles riesgos relacionados con la transferencia de energía inesperada cuando se generan condiciones propicias, y así diseñar normas y requerimientos para prevenir estos riesgos para los equipos electrónicos de la lavadora.

El conocimiento de los mecanismos de falla de arco eléctrico es de vital importancia para poder reproducirlo de forma efectiva. Algunos factores que contribuyen a la formación de arcos eléctricos son:

- Aislamiento eléctrico desgastado o cableado dañados por ataques de insectos o roedores.
- Tomacorrientes de electrodomésticos desgastados.
- Daños mecánicos en cables o componentes flexibles en su manipulación.
- Envejecimiento por exposición a luz solar y ambientes muy calientes.

El arco eléctrico se puede presentar entre terminales como resultado de contaminación o calor. El arco eléctrico inducido por contaminación ocurre cuando una solución conductiva (tal como detergente, sal o cloro) genera un camino conductivo entre los pines de la terminal. El flujo de corriente a lo largo del camino conductivo puede formar una ruta de carbón en la superficie de la tarjeta electrónica hasta que pueda formar un arco eléctrico de alta corriente.

3.1.2.4 Inclusión de fenómenos de corto eléctrico, ECM y arco eléctrico en estudio.

La experimentación de este estudio se dividió en 3 etapas, en la primera se describe la metodología usada para llevar a cabo el monitoreo de temperatura ambiente y tensión eléctrica eficaz que se tiene en la Cd. de Querétaro para que, posteriormente, la información se utilizara como entrada en la definición de niveles de parámetros pruebas. Las 2 etapas siguientes, describen cómo los niveles de la etapa 1 fueron utilizados para incluirse en el diseño y desarrollo de dos nuevas pruebas, una enfocada a acelerar la vida de las tarjetas electrónicas por medio de temperatura, humedad y tensión eléctrica de entrada, y la segunda para simular condiciones de arco eléctrico durante el funcionamiento de la tarjeta. Ambas pruebas fueron definidas para reproducir el modo de falla de corto eléctrico utilizando como mecanismos de falla el fenómeno de migración electroquímica (ECM) y el arco eléctrico respectivamente (ver Figura 9).

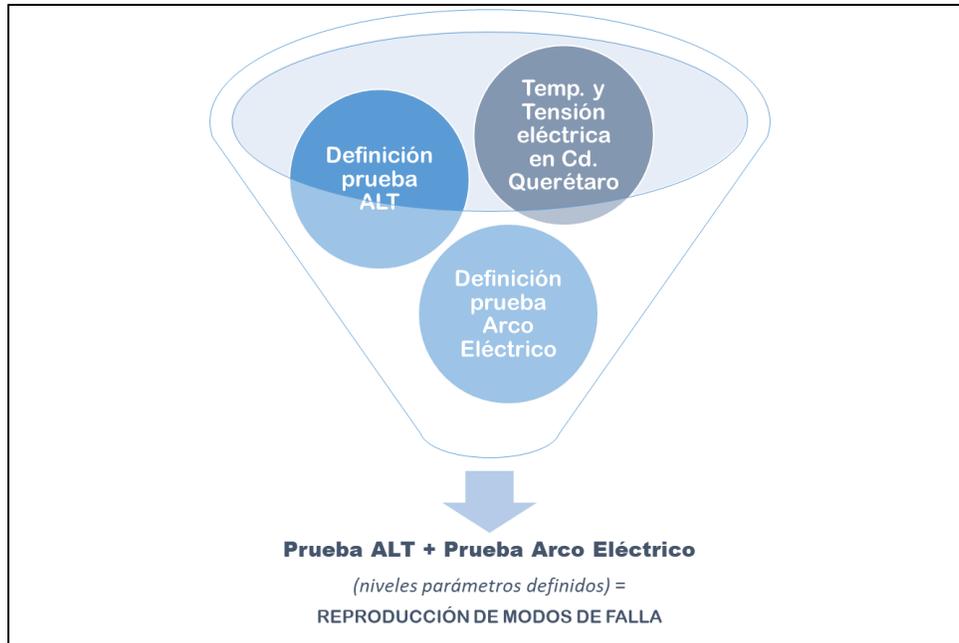


Figura 9. Diagrama de experimentos desarrollados en la etapa de metodología.

3.2. Determinación de los niveles de temperatura ambiente y tensión eléctrica representativos de la Cd. de Querétaro.

3.2.1. Monitoreo de temperatura ambiente y tensión eléctrica

Cuando los niveles de tensión eléctrica se mantienen dentro de los recomendados por lo fabricantes de electrodomésticos, entonces el riesgo de que un mal funcionamiento se presente es muy bajo. Sin embargo, los suministros que manejan tensiones eléctricas bajas frecuentemente experimentan picos instantáneos de cargas (Hand, J., Kelly, N., & Samuel, 2014) y la tensión normalmente fluctúa entre la media de lo medido en el suministro.

Sabiendo lo anterior, y como primera etapa de la metodología del estudio, fue necesario entender la circunstancia actual de la calidad de la tensión eléctrica y temperatura ambiente que se pueden presentar en la Cd. de Querétaro, y de esta manera, se caracterizaron estos parámetros para que posteriormente se integraran a pruebas de laboratorio y entender la afectación que tiene sobre las tarjetas electrónicas de la lavadora. Para tal efecto, se requirió realizar un análisis en

distintas locaciones de la ciudad, en donde se llevó a cabo el monitoreo de las variables en cuestión para determinar las zonas idóneas en donde se tienen las condiciones que mejor representan su comportamiento en la ciudad.

3.2.2. Población objetivo y localización de viviendas.

Como segunda etapa para determinar la variación de la tensión eléctrica, el estudio se enfocó solamente en la ciudad de Querétaro, para facilitar la logística de proceso y acorde con los recursos destinados para el proyecto. Dicho lo anterior, para la selección de las localidades y viviendas en donde se llevó el proceso de medición, fue necesario identificar aquellas viviendas de particulares que cuentan con lavadora doméstica y analizar los índices de población por secciones para tomar una muestra representativa de toda la ciudad

De acuerdo al banco de indicadores del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para el año 2010, de la cantidad de viviendas de particulares habitadas que contaban con servicio de energía eléctrica en la ciudad de Querétaro (201,096 viviendas), sólo 158,646 disponían de una lavadora doméstica (INEGI, 2010). Ver Figura 10.

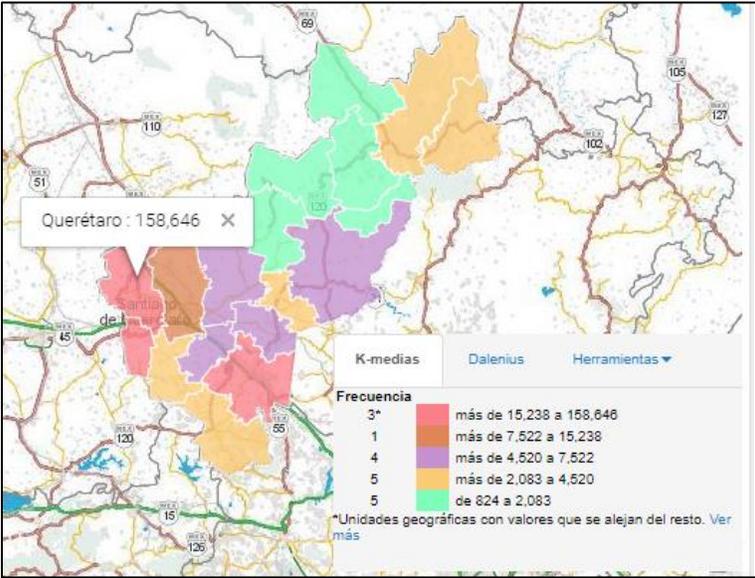


Figura 10. Viviendas de particulares habitadas que cuentan con lavadora doméstica en la Cd. de Querétaro (INEGI, 2010).

Para la definición de localidades y zonas, con base en la población que cuenta con lavadora, se dividió la ciudad en diferentes secciones de acuerdo a la división distrital que usa el Instituto Electoral del Estado de Querétaro (IEEQ). Como se muestra en la Figura 11, la división está conformada por 15 distritos electorales en todo el estado, de los cuales sólo 6 de ellos forman parte de la capital del estado, y de acuerdo al último corte realizado en el padrón electoral a finales del año 2014, se tenía un total 582,143 personas registradas. Corte del Padrón Electoral y Lista Nominal al 31 de diciembre de 2014 (IEEQ, 2014).

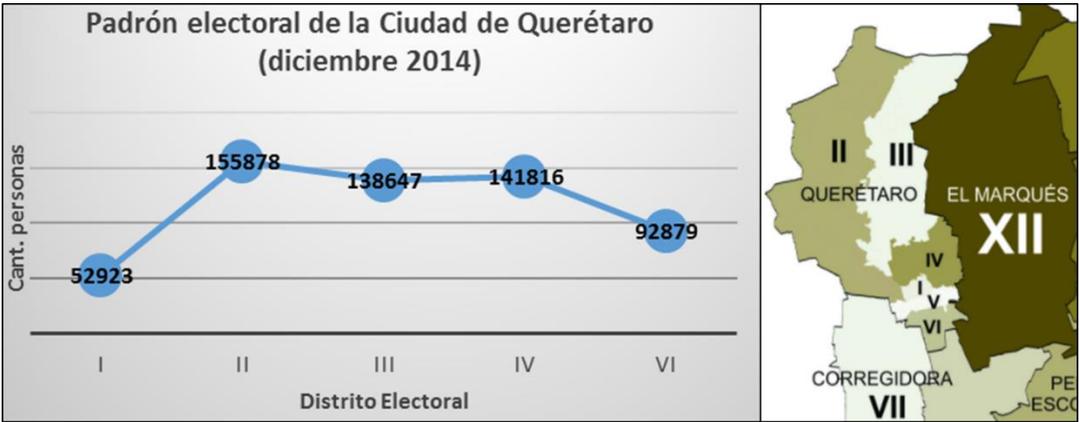


Figura 11. Cantidad de personas registradas en el padrón electoral de la ciudad de Querétaro (IEEQ, 2014).

Con base en lo anterior, el monitoreo de las variables de interés fue definido para solamente 3 de los 6 distritos de la ciudad, con el fin de asegurar la integración de las zonas con mayor población y obtener una representatividad de al menos la zona centro para completar un panorama general de la ciudad.

Los 3 distritos seleccionados fueron el Distrito I, II y III, de los cuales se tomó al menos una localidad o colonia de cada zona de las que se listan en la parte de abajo, para llevar a cabo la selección de viviendas en donde se llevó el monitoreo.

Localidades disponibles para toma de muestras:

- **Distrito I**
 - **Zona A.** Las Gemas, El Cerrito, Lindavista, fraccionamientos: (Villas del Parque, Claustros del Parque y Parques del Álamo), Conjunto Habitacional Lomas de Lindavista, La Trinidad, Residencial bosques, Rinconada Jacarandas, y Rinconada de los Álamos.
 - **Zona B.** Centro.
- **Distrito II**
 - **Zona A.** Bosques del Chamizal, Fraccionamientos Sonterra: (Cipreses, Villa Nápoles I y II, Paseo Natura, Natura I y II, Villas de Sonterra I, Cedros, Luna, Bosques de Sonterra, Abetos y Fresnos), Condominios Viñedos: (Maipo, Toscana, Abruzas, Lombardía, Calabria, Piamonte, Biarritz, Rain, La Rioja, Franconia, Priorarto, Loira, Jura, Borgonia, Provenza, Valdepeñas, Navarra, Terra Alta, Alsacia, Sicilia, San Juan, Curico, Aconcagua, Mancha, Madeira, Salta y Venetto), Santa Maria Magdalena, San Sebastián, El Higo, Tonatiuh 2^a, 3^a y 4^a Sección, Rancho Bellavista, El Tintero II, Valle El Mezquital, La Alborada, fraccionamientos: (Arcángel 1 y 2, Sonterra Y Viñedos), La Colmena, Taller De Maquinados, La Cuadra, El Rincón (Rancho El Rincón), Satélite (Granja Satélite), y Avícola Don Jose.
- **Distrito III**
 - **Zona A.** Luis Donaldo Colosio, Leyes De Reforma, 5 De Febrero, 15 De Mayo, 10 De Abril, Independencia, Lomas Del Pedregal 2^a Sección, Paraíso, Loma Bonita, Ampliación Loma Bonita, Jardines De Jurica, Prados De Loma Bonita, Huertas De Jurica, Condominios: (Guadalupe Amor, Jaime Sabinés, Carmen Alardín, Andres Henestrosa, Elena Garro Y Hugo Arguelles), Fraccionamientos: (Eduardo Loarca Castillo 3, 4, 5

6, 7, 8, 9 Y 10 Condominio Ruben Salazar Mellen), Eduardo Loarca Castillo (Condominios: Carlos Orellana, German Dehesa, Catalina Dulche, Fernando Cacotela, Carlos Monsivais, Rosalio Solano, Julia Guzman, Elvira De La Mora, Jorge Ibarquengoitia, Renato Leduc y Gustavo Alatraste), Eduardo Loarca Castillo 11 (Condominio Isabel Arvide), Eduardo Loarca Castillo 12 (Condominio Emilio Carballido), Condominios: (Hugo Iriart, Cirilo Conejo Roldan y Jaime Sabines).

- **Zona B.** Real De Juriquilla, Provincia Juriquilla, La Acequia Blanca, Bordo La Lagartija, La Troje, Fraccionamientos: (Villas Del Mesón, Toliman, La Cañada, Balcones De Juriquilla, Jurica Misiones, Privada De Los Portones, Juriquilla Santa Fe, Jockey Club, Caletto, Los Naranjos I, II y III, Altavista Juriquilla, Punta Juriquilla, Paraíso Diamante, La Herradura, Villas La Solana, Nuevo Paraíso, Mayoral 1 y 2, Jurica San Francisco, Paraíso, Puerta Paraíso, El Faro, Jurica Acueducto, Cumbres Del Lago, Real Del Lago, Juriquilla Campestre, Juriquilla Lomas, Privada Juriquilla, Fuentes De La Villa Rica, Alta Rica, Gran Puerta Paraíso, Gran Puerta Paraíso 2, Rinconada Santini Juriquilla, La Rica, La Muralla, Villa Capri 1ª y 2ª Sección, Ecológico La Rica, Valle Juriquilla, Rincón Del Angel, Juriquilla Hacienda Grande, Habitarea Towers, Capricho 2, Colinas De Juriquilla, Vive Hacienda Grande, La Condesa), Condominios: (La Cañada, La Cima, La Escondida, Terrazas Vista Lago, La Joya, Vista Lago, Balcones De Juriquilla, El Rincón De Balcones Y Mirador Del Lago), Residenciales: (Jardines De Juriquilla, Paseo Del Piropo, Los Encinos, Residencial La Luna Y Fraccionamiento Paraíso), Juriquilla Santa Fe: (Condominios: Puerta Santa Fe II, Jardines Santa Fe, Villa Toscana y Lomas De Santa Fe), Fraccionamiento Juriquilla Santa Fe: (Torres

Premier, Rincón De Santa Fe, Ensueño, El Secreto, Dos Lunas, Villa Toscana, Azul, El Suspiro, Península, El Respiro, El Capricho, El Nuevo Capricho, Atenas, Aura, Alteza, Paseo Livornio, Azul), Residencial Juriquilla Santa Fe: (Las Lunas, El Cielo, y El Encanto), Juriquilla Santa Fe: (Condominios: Manzanares, Q Home Valley, Murano, Hacienda Juriquilla Santa Fe, Valle Juriquilla Ii, El Destino, Valle De Manzanos, Dolce Terra, Blue, La Castellana, Vive Juriquilla, El Silencio, Acua, El Delirio, Los Olivos, Quintas Las Acacias), Privada Juriquilla Santa Fe (Santa Fe), San Isidro (Fraccionamientos: San Juan, Arroyo Seco, Bella Vista, Mirador, La Arboleda, Yuca).

3.2.3. Tamaño y descripción de muestras.

En la Tabla 6 se muestran las viviendas monitoreadas, las variables seleccionadas, los equipos de medición y los periodos de tiempo definidos para llevar a cabo la caracterización de las variables.

Tabla 6. Viviendas seleccionadas para monitoreo de temperatura y tensión eléctrica (Creación propia).

Distrito	Localidad Colonia	Viviendas	Tiempo de registro	Variables Medidas
I	El cerrito	3	1 semana	Temperatura Ambiental y Tensión eléctrica (RMS)
	Rinconada Jacarandas	2		
	Centro	3		
II	Villas de Sonterra I	2		
	Condominios Viñedos	2		
	El Tintero II	2		
III	Loma Bonita	2		
	Eduardo Loarca Castillo	3		
	Jurica Santa Fe	2		
	La Troje	2		

Se seleccionaron 23 viviendas de las localidades o colonias arriba listadas, y se realizó el monitoreo de las variables de tensión eléctrica y temperatura ambiente por 1 semana desde inicios del año 2017 hasta el mes de octubre del mismo año.

Por lo tanto, fueron 23 contactos eléctricos, a donde se conectan las lavadoras seleccionadas, y que, de acuerdo al rango correspondiente a baja tensión que distribuye la Comisión Federal de Electricidad (CFE), deben presentar tensión eléctrica de servicio nominal en 120VCA. Ninguno de los contactos es modificado para evitar pérdida de evidencia al momento de las mediciones.

La medición de temperatura fue realizada con el uso de equipos automatizados con termopares posicionados dentro de la cubierta plástica de los controles de la lavadora, cercanos a la tarjeta de control. Es importante mencionar que la mayoría de las muestras se encontraban expuestas al aire libre.

3.2.4. Equipos y materiales utilizados en el monitoreo.

Los equipos y materiales utilizados para llevar a cabo las mediciones de tensión eléctrica y temperatura ambiente, en las viviendas seleccionadas, se describen en los siguientes párrafos. Todas las mediciones se realizaron cada 30 segundos para asegurar la captación de niveles sostenidos de ambas variables. Abajo, en la Figura 12 y Figura 13 se muestra un ejemplo del posicionamiento de los equipos y los gráficos obtenidos durante el proceso de medición.

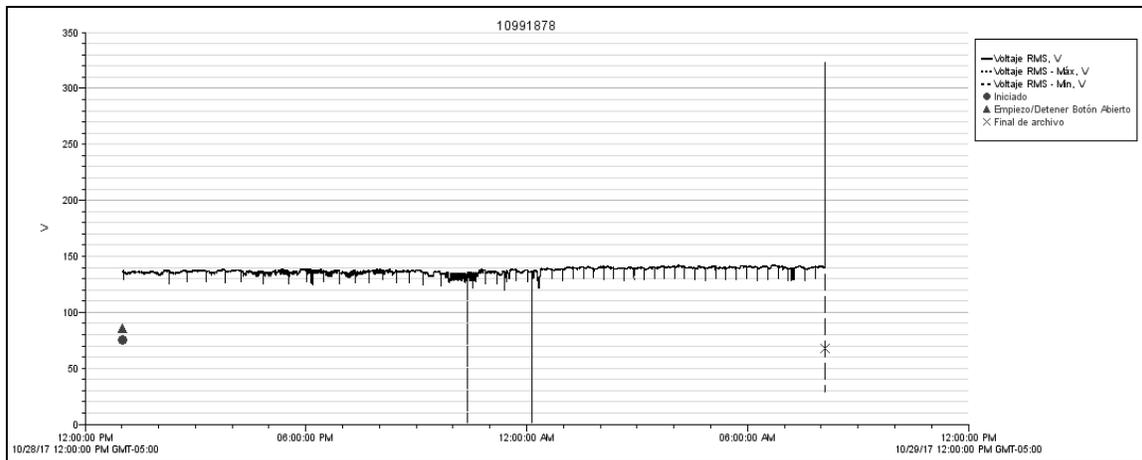


Figura 12. Ejemplo de gráfico de monitoreo de la tensión eléctrica obtenido con equipo HOBO plug load logger UX120-018 (creación propia con datos obtenidos)



Figura 13. Instalación de equipos de medición en lavadoras

3.2.4.1 Equipo utilizado para la medición de tensión eléctrica.

Para la medición de esta variable se requirieron 5 equipos de adquisición de datos (HOBO plug load logger) que cuentan con las características descritas en la Tabla 7 y Figura 14.

3.2.4.2 Equipo para medición de temperatura ambiental.

Para la medición de la temperatura ambiental, también fueron utilizados 5 equipos de adquisición de datos modelo HOBO UX120-006M. Los equipos fueron integrados dentro de los copetes de las lavadoras, cercanos al área donde se alojan las tarjetas electrónicas. Las características de los equipos se encuentran descritas abajo (ver Tabla 8 y Figura 14).

Tabla 7. Especificaciones técnicas de equipo de medición de tensión eléctrica.

Marca:	Onset
Modelo:	UX120-018
Características del medidor de valor eficaz de tensión eléctrica:	
a. Precisión de 0.5% con una corriente continua de hasta 14 Amps; y hasta 10% arriba de 14 Amps de corriente continua.	
b. Resolución de 10 mV	
Características del medidor de valor eficaz de corriente eléctrica:	
a. Precisión de 0.5% con una corriente continua de hasta 14 Amps; y hasta 10% arriba de 14 Amps de corriente continua.	
b. Resolución de 0.1 mA.	

Tabla 8. Especificaciones técnicas de equipo de medición de temperatura ambiente.

Marca:	Onset
Modelo:	UX120-006M
Características del medidor de temperatura ambiente:	
a. Rango de operación -20° to 70°C (-4° to 158°F).	
b. Con una precisión de ±0.21°C de 0° a 50°C (±0.38°F de 32° a 122°F).	

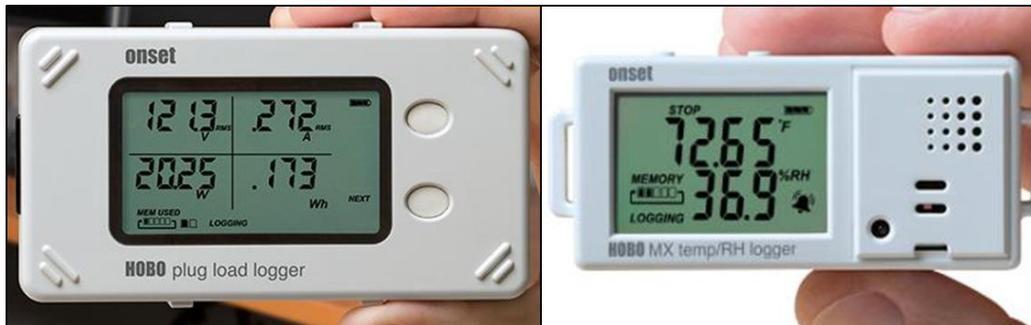


Figura 14. Medidores de temperatura y tensión eléctrica usados para el monitoreo de variables.

3.2.5. Estudio de la variación de los sistemas de medición de tensión eléctrica y temperatura ambiente.

3.2.5.1 Estudio de la variación del sistema de medición de tensión eléctrica.

Con el fin de asegurar que las mediciones de esta variable fueran confiables y de calidad, fue necesario determinar el porcentaje de la variación del sistema utilizado por medio de un estudio Gage R&R. La metodología utilizada estuvo basada en el manual de AIAG-Work Group (2010).

Este método nos permitió determinar la cantidad de variación (error) obtenido al momento de realizar las mediciones de tensión eléctrica, tomando en cuenta la variación de la medición cuando una persona usaba el mismo equipo para medir el mismo suministro eléctrico, y también la variación de la medición cuando dos o más personas usaban el mismo equipo para medir el mismo suministro eléctrico.

Para llevar a cabo el estudio de la variación se consideró únicamente un tomacorriente como objeto de medición, del cual se configuraron 6 distintos niveles de tensión eléctrica definidos como muestras. Participaron 3 operadores diferentes y realizaron 2 mediciones cada uno sobre cada muestra definida. En la Tabla 9 se muestran los datos registrados.

Tabla 9. Mediciones realizadas para el estudio Gage R&R del sistema de medición de tensión eléctrica

Muestra	Operador	VCA	Muestra	Operador	VCA	Muestra	Operador	VCA
1	Jesús	126.2	3	Jesús	129.10	5	Jesús	127.90
1	Isidro	126.21	3	Isidro	129.00	5	Isidro	127.85
1	Francisco	126.3	3	Francisco	129.25	5	Francisco	127.80
1	Jesús	126.23	3	Jesús	129.05	5	Jesús	127.80
1	Isidro	126.26	3	Isidro	129.10	5	Isidro	127.90
1	Francisco	126.40	3	Francisco	129.15	5	Francisco	127.98
2	Jesús	128.55	4	Jesús	128.00	6	Jesús	127.80
2	Isidro	128.65	4	Isidro	128.13	6	Isidro	127.75
2	Francisco	128.67	4	Francisco	128.20	6	Francisco	127.97
2	Jesús	128.51	4	Jesús	128.08	6	Jesús	127.84
2	Isidro	128.70	4	Isidro	128.15	6	Isidro	127.80
2	Francisco	128.48	4	Francisco	128.10	6	Francisco	127.80

La información obtenida fue analizada con el método de ANOVA Estudio Gage R&R (cruzado) utilizando software estadístico. Los resultados indican que el porcentaje de variación total del sistema de medición es del 8.29%, en donde el mayor porcentaje de contribución es explicado por la repetibilidad en las mediciones de cada operador (7.26%), sin embargo, no representa problema ya que el porcentaje no es significativo; el resto de la variación es representada por la diferenciación entre muestras (ver la Figura 15 y Figura 16). También se observó que el equipo utilizado para la medición es adecuado, ya que es capaz de distinguir entre diferentes valores de tensión eléctrica (número de categorías igual a 16), por lo tanto, existe la certeza al detectar variaciones pequeñas en los volts medidos.

En conclusión, el porcentaje de la variación del sistema de medición fue aceptado debido a que es menor al 20%, y se tiene la confianza de obtener mediciones correctas con el uso de este método y equipo propuesto. Conforme a lo anterior, los tres operadores estaban preparados para llevar a cabo el monitoreo de la tensión eléctrica en las viviendas seleccionadas.

Gage R&R		
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.006402	0.69
Repeatability	0.004919	0.53
Reproducibility	0.001483	0.16
Operador	0.001483	0.16
Part-To-Part	0.926219	99.31
Total Variation	0.932621	100.00

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.080013	0.48008	8.29
Repeatability	0.070139	0.42083	7.26
Reproducibility	0.038505	0.23103	3.99
Operador	0.038505	0.23103	3.99
Part-To-Part	0.962403	5.77442	99.66
Total Variation	0.965723	5.79434	100.00

Number of Distinct Categories = 16

Figura 15. Porcentajes de variación resultantes del estudio Gage R&R del sistema de medición de tensión eléctrica.

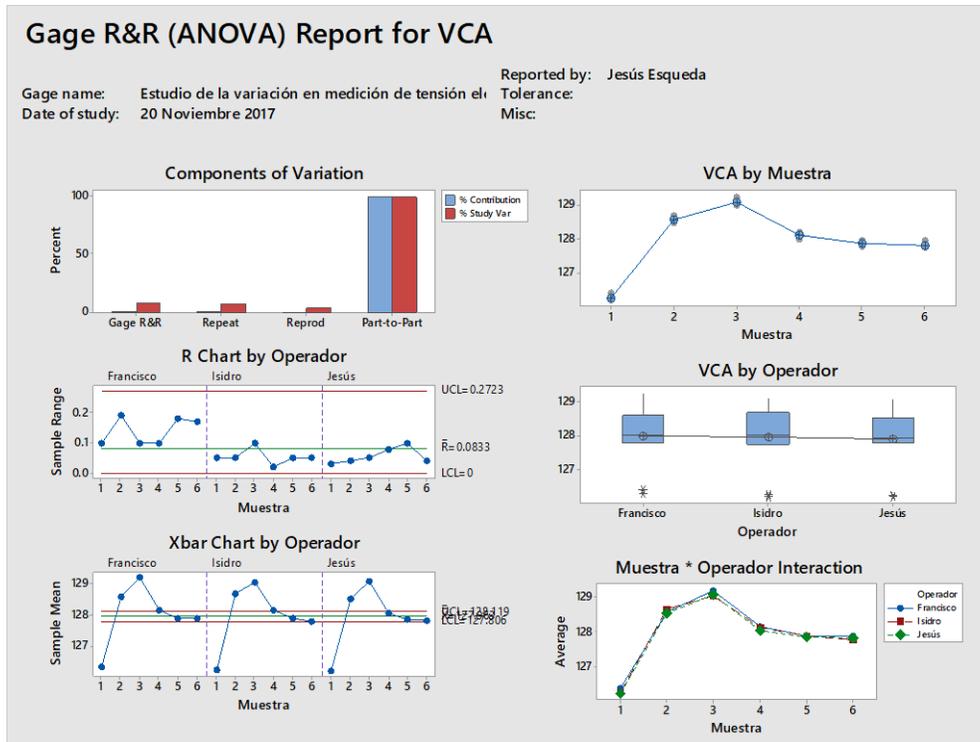


Figura 16. Reporte gráfico de estudio Gage R&R del sistema de medición de la tensión eléctrica.

3.2.5.2 Estudio de la variación del sistema de medición de temperatura ambiente.

Este estudio de variación fue sustentado con el método de “calentamiento” que actualmente utiliza la empresa para realizar pruebas de validación y certificación de secadoras (ANCE, 2013). Para la realización del estudio se tomaron 5 muestras, en las cuales 2 operadores diferentes llevaron a cabo 2 mediciones de temperatura por cada una de ellas. Las mediciones registradas se muestran en la parte de abajo (ver Tabla 10).

Tabla 10. Mediciones realizadas para el estudio Gage R&R del sistema de medición de temperatura ambiente.

Muestra1.	Operador1.	Temp. (°C)	Muestra1.	Operador1.	Temp. (°C)
1	Sandra	115.9	3	Gerardo	115.90
1	Sandra	116.5	3	Gerardo	115.40
1	Gerardo	116.3	4	Sandra	97.00
1	Gerardo	116	4	Sandra	97.50
2	Sandra	99.2	4	Gerardo	97.70
2	Sandra	99.70	4	Gerardo	97.10
2	Gerardo	99.50	5	Sandra	115.20
2	Gerardo	99.90	5	Sandra	115.80
3	Sandra	115.50	5	Gerardo	115.60
3	Sandra	115.00	5	Gerardo	115.30

Los resultados obtenidos del estudio Gage R&R se muestran en las Figura 17 y Figura 18. El porcentaje de variación total del sistema de medición de temperatura ambiente fue del 3.29%, con el mayor porcentaje de contribución identificado en la repetibilidad pero siempre siendo más significativo la diferenciación entre partes medidas (99.95%). El número de categorías fue lo suficientemente alto (42) para asegurar la realización de las mediciones, de manera efectiva, aun cuando se presente cualquier variación durante la medición de temperatura. Por lo anterior, se concluyó que el método y los equipos utilizados en el estudio son confiables.

El porcentaje de la variación del sistema de medición fue aceptado (es menor al 20%).

Gage R&R		
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.0974	0.11
Repeatability	0.0973	0.11
Reproducibility	0.0001	0.00
Operator1.	0.0001	0.00
Part-To-Part	89.9619	99.89
Total Variation	90.0593	100.00

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.31202	1.8721	3.29
Repeatability	0.31191	1.8714	3.29
Reproducibility	0.00845	0.0507	0.09
Operator1.	0.00845	0.0507	0.09
Part-To-Part	9.48483	56.9090	99.95
Total Variation	9.48996	56.9397	100.00

Number of Distinct Categories = 42

Figura 17. Porcentajes de variación resultantes del estudio Gage R&R del sistema de medición de temperatura ambiental.

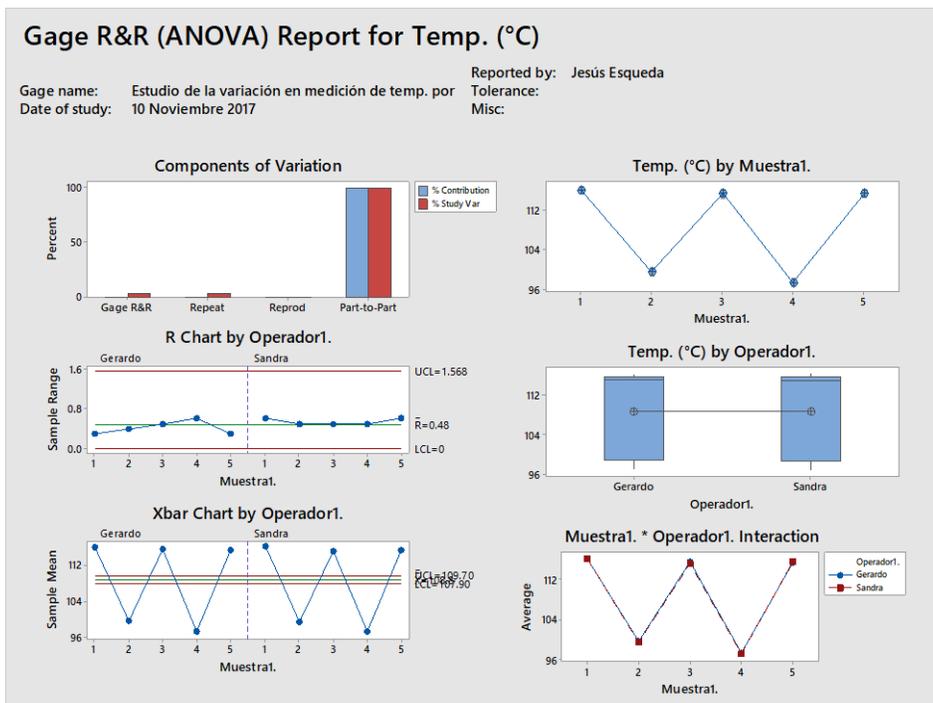


Figura 18. Reporte gráfico de estudio Gage R&R del sistema de medición de la temperatura ambiental.

3.2.6. Resultados y análisis de variables monitoreadas.

Una vez que se realizaron las mediciones en las 23 viviendas seleccionadas se tuvo la información necesaria para la definición de rangos representativos de tensión eléctrica y temperatura ambiente.

Los valores de tensión eléctrica obtenidos mostraron variaciones constantes en diferentes horarios del día, observándose mediciones de tensión sostenida en el rango de 92.56 VCA hasta 144.89 VCA, valores que demostraron una diferencia clara en contra de los parámetros de prueba están considerados en las pruebas de laboratorio actuales. Así mismo, se observaron variaciones de temperatura que van desde los 6°C a los 30.8°C, dependiendo del día y horario, sin embargo, estos valores no representan una diferencia considerable comparado con lo que se presenta en el laboratorio, ya que la temperatura ambiente no es controlada y, por lo tanto, el área de pruebas siempre se encuentra expuesta a temperaturas similares, de acuerdo a la época del año que transcurra. Los resultados se muestran en la Tabla 11 y *Tabla 12*.

Tabla 11. Resultados de mediciones de tensión eléctrica en viviendas de la Cd. de Querétaro.

RESULTADOS DEL MONITOREO DE TENSIÓN ELÉCTRICA				
Distrito	Localidad Colonia	Viviendas	Tensión Máx. (VCA)	Tensión Mín. (VCA)
	El cerrito	3	136.11	104.72
I	Rinconada Jacarandas	2	129.62	98.22
	Centro	3	142.54	119.02
	Villas de Sonterra I	2	135.17	120.81
II	Condominios Viñedos	2	140.25	117.45
	El Tintero II	2	137.55	126.26
	Loma Bonita	2	132.76	122.25
	Eduardo Loarca Castillo	3	144.89	129.01
III	Jurica Santa Fe	2	121.52	92.56
	La Troje	2	133.2	119.45
		Límites	144.89	92.56

Tabla 12. Resultados de mediciones de temperatura ambiente en viviendas de la Cd. de Querétaro.

RESULTADOS DEL MONITOREO DE TEMPERATURA				
Distrito	Localidad Colonia	Viviendas	Temp. Máx. (C°)	Temp. Mín. (C°)
	El cerrito	3	23	6
I	Rinconada Jacarandas	2	25.1	7.1
	Centro	3	25.9	10.9
	Villas de Sonterra I	2	27.8	9.3
II	Condominios Viñedos	2	26.2	13.1
	El Tintero II	2	29.8	11.9
	Loma Bonita	2	30.8	13.4
III	Eduardo Loarca Castillo	3	29.3	14.3
	Jurica Santa Fe	2	27.4	13.6
	La Troje	2	27.5	13.3
Límites			30.8	6

Comparando los niveles de tensión eléctrica usados en pruebas de laboratorio (CC, ALT y HALT) con las mediciones obtenidas de los suministros de las viviendas analizadas, se identificó un diferencial de hasta 27.4 VCA. La especificación de parámetros de pruebas en laboratorio indica que es permisible una variación de tensión de hasta un $\pm 10\%$, sin embargo, en los hogares de la Cd. de Querétaro podemos encontrar variaciones máximas de +20.7% y -22.8% con respecto a la nominal. Estas variaciones no estaban consideradas dentro de las condiciones de prueba en los laboratorios de confiabilidad de la empresa.

En cuanto a los valores de temperatura registrados se concluyó que éstos sí eran actualmente considerados en las pruebas de laboratorio, ya que el área asignada en la empresa se encuentra bajo condiciones similares al campo y no tiene un control específico del parámetro como se puede observar en la Figura 19, por lo tanto, los valores oscilan dentro de los rangos mostrados en las viviendas analizadas (6°C a 30.8°C).



Figura 19. Mesas de prueba del Laboratorio de Confiabilidad a nivel sistema en la empresa.

3.3. Prueba de vida acelerada (ALT) para el envejecimiento de tarjetas electrónicas y reproducción de corto eléctrico causado por presencia de fenómeno de migración electroquímica (ECM).

Los resultados obtenidos en el monitoreo de temperatura y tensión eléctrica realizados en las viviendas de la ciudad, fueron tomados como información de entrada para definir la prueba de vida acelerada en las tarjetas electrónicas. Esta prueba tuvo como finalidad aplicar los parámetros de esfuerzo requeridos para simular de forma asertiva las condiciones a las que son expuestas las lavadoras en Campo en la Cd. de Querétaro.

3.3.1. Lugar y ubicación donde se llevó a cabo la prueba de vida acelerada.

Simulando condiciones de tensión eléctrica (RMS) y temperatura ambiente en niveles altos es posible envejecer las tarjetas electrónicas de la lavadora, de tal forma que, se pueden reproducir cortos o daños en los componentes que las componen.

Para el diseño de prueba de vida acelerada se consideraron las recomendaciones incluidas en el trabajo realizado por Xie y Lu (2016), usando como mecanismos de falla la temperatura ambiente, la humedad relativa y la influencia de

la tensión eléctrica como factores para provocar el fenómeno de Migración Electroquímica (ECM) entre las pista y componentes de los PCBA's, y posteriormente, reproducir el modo de falla "corto eléctrico".

Nuevamente, el diseño y realización de prueba ALT fue llevada a cabo en las instalaciones de la empresa con equipos especializados utilizados para realizar pruebas de vida en componentes electrónicos de los distintos productos que comercializa. La zona se encuentra ubicada en el Distrito III de la Cd. de Querétaro, la cual también previamente había sido elegida para llevar a cabo el monitoreo de tensión eléctrica y temperatura ambiente, por lo que se asume que las condiciones ambientales de la zona (altura sobre nivel del mar y temperatura) se encuentran alineadas a la generalidad de la muestra poblacional.

3.3.2. Descripción de equipos de control y medición utilizados en prueba de vida acelerada.

Para integrar los mecanismos de falla relacionados con el fenómeno de migración electroquímica (ECM), se debe cumplir con condiciones ambientales específicas para que puedan potencialmente inducir el ECM, entre las cuales se encuentran tanto altas temperaturas como niveles altos de humedad relativa. Es por lo anterior, que para simular las condiciones prueba necesarias, la prueba se llevó a cabo en una cámara de humedad y temperatura *SUBZERO modelo ZPH-32-2-H/AC*, que tiene un rango de control de temperatura que va de -34°C a $+190^{\circ}\text{C}$, así como un rango de humedad relativa de 10% to 98%, y controles y estabilidad de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en la temperatura y $\pm 3\%$ en la humedad relativa. Para energizar las PCBA's dentro de la cámara de prueba se utilizó un regulador de tensión eléctrica (Variac) TDGC-2 de una fase, con una tensión eficaz de salida dentro del rango de 0 VCA a 145 VCA.

En cuanto a equipos de medición, se usó un cronómetro de la marca GENERAL modelo H-5670 con una resolución de 1/100 segundo, para poder medir los tiempos de reposo y de medición de tensión eléctrica de salida. Por último, se requirió el uso de un *multímetro digital de la marca KEITHLEY modelo 2000*, para realizar mediciones de tensión de salida en el transistor una vez que la fuente de

poder de la tarjeta ha realizado la reducción a 5 VCD. En la Figura 20 y Tabla 13 se muestran los equipos utilizados.



Figura 20. Equipos de control y medición para prueba de degradación acelerada (de arriba abajo y de izquierda a derecha: multímetro, cronómetro, cámara subzero y variac)

Tabla 13. Especificaciones técnicas de equipos de control y medición para prueba de vida acelerada.

	Equipo / Dispositivo de prueba (Descripción genérica)	Requerimientos de Mediciones (unidades de medición)	Rango (Min/Max capacidad de medición)	Resolución (Incrementos máximos de medición)
A.	Cámara SUBZERO modelo ZPH-32-2-H/AC	Temperatura (°C) Humedad (%RH)	-34°C a +190°C 10% to 98% RH	±0.5°C ±3%RH
B.	Regulador de tensión modelo TDGC-2	VCA	0 VCA – 180 VCA	1 VCA
C.	Cronómetro GENERAL modelo H-5670	Hrs	Tiempo de vuelta horas	1/100 segundo
D.	KEITHLEY Multímetro 6½-Dígitos, Modelo 2000	mV	100.0000 mV	0.1 µV

El desempeño de la tarjeta en la prueba de vida fue medido utilizando la tensión de salida (VCD) al final de 150 horas de exposición bajo las condiciones descritas posteriormente. Con la realización de esta medición se definió el desgaste de la tarjeta al final de la prueba.

3.3.3. Descripción / preparación de muestras y suministros de prueba de vida acelerada.

Las muestras requeridas en la prueba fueron tarjetas electrónicas (PCBA's) que fueron incluidas en proyectos de mejora de lavadoras durante el año 2017. Previo a su utilización en las pruebas, todas las muestras fueron verificadas y probadas funcionalmente para asegurar su correcta operación. Posteriormente fueron identificadas individualmente, con un marcador indeleble sobre una cara lateral del triac de la tarjeta (para evitar cualquier contaminación en componentes o pistas del circuito), con el fin de contar con rastreabilidad única para cada una de ellas (ver Figura 21).

Las 8 tarjetas, muestras de esta prueba, fueron previamente configuradas con un software modificado para simular una secuencia de activación de los componentes que las integran, de tal forma que fueran activados continuamente y que el encendido y apagado (90 segundos ON y 18 segundos OFF) de indicadores LED fuera visible durante todo el proceso de prueba.

Los suministros requeridos para las pruebas se describen en la Tabla 14.

Tabla 14. Lista de suministros para prueba de vida acelerada.

	Artículos / Suministros (Descripción genérica)	Requerimientos (unidades de medición)	Cantidad	Especificación
A.	Tarjetas electrónicas de lavadora PCBA	-	8	Intensión de diseño
B.	Agua desionizada (alimentación cámara de prueba)	Lts	50	0 a 50 PPM
C.	Guantes dieléctricos Aiars DIE 25	N/A	1	Clase 00



Figura 21. Identificación de muestras para experimento.

3.3.4. Condiciones de prueba y diseño de experimentos para prueba de vida acelerada.

3.3.4.1 Condiciones de prueba de vida acelerada.

Se eligieron 2 niveles de esfuerzo para la variable de tensión eléctrica, tomando como comparativos el nivel bajo a 90 VCA y 145 VCA como el nivel alto (de acuerdo a los resultados arrojados en el monitoreo de variables en la Cd. de Querétaro).

En cuanto a la variable de temperatura, también se seleccionaron 2 niveles de prueba, considerando 60°C y 85°C como los niveles bajo y alto respectivamente. Lo anterior está basado en los niveles máximos de operación de la tarjeta y en las temperaturas que pueden presentarse dentro de la lavadora cuando los vapores del agua caliente puedan llegarse a condensar en la zona del ensamble.

También es importante mencionar que todos los experimentos se realizaron bajo una condición fija de humedad relativa, que para este caso fue de 85%. Este valor fue elegido de acuerdo a estudios previos (Xie y Lu, 2016), en donde se sabe que los porcentajes de humedad propician el crecimiento de deformaciones, llamadas dendritas, en las soldaduras y metales que componen a la tarjeta electrónica, de tal forma, que eventualmente este crecimiento puede provocar

contacto entre partes energizadas y, por lo tanto, generar un corto en la tarjeta. Es una condición que favorece el envejecimiento de las tarjetas dentro de la cámara de prueba. El acomodo de las muestras fue representativo de acuerdo a la intensidad de diseño dentro de la lavadora (vertical, como se aprecia en Figura 23).

Todas las pruebas se llevaron a 150 horas de exposición bajo las condiciones mencionadas anteriormente. El tiempo de prueba fue definido de acuerdo con la disposición de equipos de prueba y considerando los estudios de Xie y Lu (2016) en PCB's, en donde se observa que la generación de dendritas comienza a manifestarse desde las 100 horas hasta las 200 de prueba en las condiciones descritas.

Para la selección de parámetros y condiciones de prueba, se utilizó la herramienta de análisis conocida como "Diagrama de Parámetros" (Diagrama P), con la cual se identificaron entradas y salidas del nuevo diseño de prueba cuantificando los parámetros de control y no controlables involucrados en el funcionamiento de los PCBA's en campo (ver Figura 22). Esta herramienta es asistida con información recopilada otras herramientas de calidad como el Análisis del Modo y Efecto de la Falla (AMEF) y el Diagrama de Bloques Funcionales (DBF)

Juran, J.M. (1988) explica el concepto que existe detrás de los diagramas de parámetros en su libro "Planeación y Análisis de la Calidad", en donde dice, "la característica más básica de un producto es su desempeño, es decir, la salida esperada – la densidad de color de un televisor, el radio de giro de un automóvil. Para crear tal salida, los ingenieros usan principios para combinar entradas como materiales, partes, componentes, ensambles, líquidos, etc. Para cada una de estas entradas, el ingeniero identifica parámetros y especifica valores numéricos para lograr la salida requerida en el producto final".

Para este diagrama P, se tomaron las entradas del diseño de prueba y se relacionaron con las salidas de diseño deseadas de tarjetas electrónicas, al mismo tiempo que se consideraron las influencias externas no controlables.

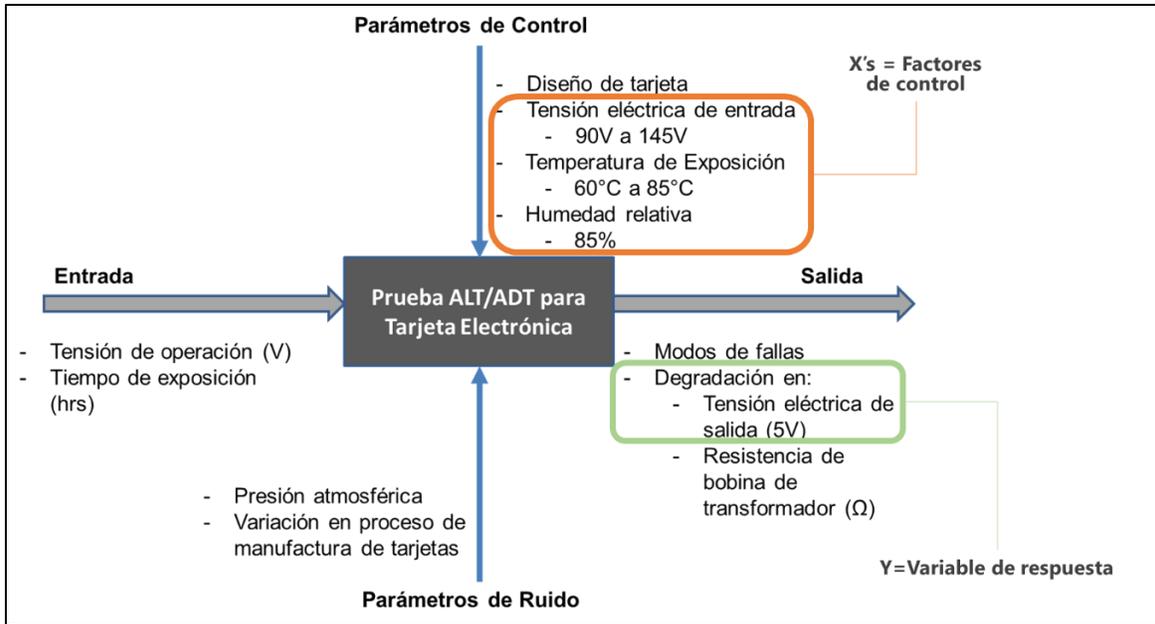


Figura 22. Diagrama de parámetros para definición de condiciones de prueba de vida acelerada.



Figura 23. Acomodo de tarjetas electrónicas dentro de cámara de prueba.

3.3.4.2 Diseño de experimentos para prueba de vida acelerada.

El experimento realizado fue un diseño experimental 2^2 , con 2 réplicas, considerando como variables independientes (X's vitales) a la temperatura de exposición, la tensión eléctrica, y la humedad relativa como valor fijo. Se definió

como variable de respuesta (Y) la medición de la tensión de salida de la fuente de poder. En la Tabla 15, se muestra el diseño de experimentos llevado a cabo para determinar el nivel de afectación de la temperatura y tensión eléctrica en la reproducción de modos de falla relacionados con tarjeta dañada o en corto eléctrico.

Tabla 15. Diseño de experimentos: Prueba de vida acelerada a tarjetas.

Corrida	Orden Corrida	Punto Central	Bloques	Temp. °C	Tensión entrada (VCA)
6	1	1	1	85	90
7	2	1	1	60	145
1	3	1	1	60	90
8	4	1	1	85	145
4	5	1	1	85	145
2	6	1	1	85	90
3	7	1	1	60	145
5	8	1	1	60	90

*Condición fija: 85% humedad relativa

Al finalizar 150 horas de prueba de cada una de las corridas realizadas, se midió la tensión de salida directamente del transistor de la tarjeta, como se puede ver en la Figura 24, para identificar la influencia de niveles altos y bajos de tensión de entrada (145 VCA y 90 VCA) sobre los componentes propensos a falla que la componen. La tensión eléctrica de salida esperada tendría que estar cercana a los 5 VCD, y cualquier variación significativa podría estar asociada a un mal funcionamiento por influencia a los niveles de tensión de entrada.

Los resultados del diseño de experimentos llevado a cabo, se muestran en la Tabla 16.



Figura 24. Tensión de salida tomada del transistor.

Tabla 16. Diseño de experimentos: resultados de prueba de vida acelerada.

Corrida	Orden Corrida	Punto Central	Bloques	Temp. °C	Tensión entrada (VCA)	Y = Tensión salida (VCD)
6	1	1	1	85	90	5.0168
7	2	1	1	60	145	5.0099
1	3	1	1	60	90	5.0203
8	4	1	1	85	145	4.9314
4	5	1	1	85	145	5.0244
2	6	1	1	85	90	5.0431
3	7	1	1	60	145	5.022
5	8	1	1	60	90	5.0326

3.4. Prueba de arco eléctrico en tarjetas electrónicas para la reproducción de corto eléctrico inducido por la presencia de arco eléctrico.

El objetivo de esta prueba fue el definir un método base de evaluación para reproducir la presencia de arco eléctrico en una tarjeta electrónica (PCBA) debido a la presencia de tensión eléctrica, medio acuoso y la posición de la misma dentro de una lavadora. Fue enfocada intencionalmente a iniciar y propagar el arco eléctrico en áreas específicas del PCBA para verificar las afectaciones posibles sobre los componentes que la integran.

Incluyendo un medio acuoso conductivo, agua con detergente, sobre las tarjetas de prueba, fue como se preparó el entorno ideal para provocar el fenómeno de arco eléctrico. En tanto, la tensión eléctrica y el ángulo de posición de las muestras experimentales fueron las variables a analizar para determinar su influencia sobre el tiempo en que se puede reproducir un daño significativo por la aparición de un corto eléctrico.

El diseño de prueba propuesto está basado en el “Método de determinación de los índices de resistencia y de prueba a la formación de caminos conductores de los materiales aislantes sólidos” (IEC 60112, 2003), que es usado en materiales o placas eléctricas que se encuentran energizados eléctricamente para determinar sus niveles de resistencia a la formación de caminos conductores entre las partes que los componen y cómo pueden afectarlos.

Los materiales que componen los diferentes componentes y placa de una PCBA (tarjeta electrónica) pueden perder gradualmente su material aislante debido a la exposición constante de descargas eléctricas durante su periodo de operación, a esto se le conoce como erosión eléctrica. Una vez que la erosión logra retirar por completo los materiales aislantes que protegen los componentes, y como consecuencia de las pequeñas distancias que existen entre ellos en los diseños de PCBA, los electrodos que se encuentran sobre las superficies llegan a formar arcos eléctricos que desembocan en cortos circuitos e incluso ignición de los materiales en las periferias.

3.4.1. Lugar y ubicación en donde se llevó a cabo la prueba de arco de eléctrico.

La realización de esta prueba también tuvo lugar en las instalaciones de la empresa, pero debido a que el método propuesto indica que las muestras sean expuestas a mezclas conductivas de químicos penetrantes y posteriormente a energía eléctrica, varios puntos de seguridad tuvieron que ser cuidados para evitar riesgos potenciales. Para evitar riesgos de propagación de fuego, chispas de energía, o problemas de contención de flamas, los experimentos se llevaron a cabo en un cuarto especial de los laboratorios, que cuenta con un sistema de contención de fuego equipado (extractores para remover humos ocasionados durante el proceso y extintores en caso de flamas).

3.4.2. Descripción de equipos de control y medición utilizados en prueba de arco eléctrico.

En la realización de esta prueba fueron requeridos los siguientes equipos de control: fuente de energía programable *AMETEK modelo MX15* con control tensión de salida de 0 - 300 VCA para energizar las muestras de prueba, una campana de laboratorio con sistema de extracción de humos y mica de protección como medida de seguridad complementaria, y un dispositivo de sujeción de ventosa *marca PANAVISE* para asegurar la sujeción y posición de las muestras utilizadas.

La lista de equipos de medición involucrados en el proceso consta de un cronómetro de la marca *GENERAL modelo H-5670* con una resolución de 1/100 segundo, un medidor de ángulos marca *ED&D modelo AM-01* con una resolución de 1 grado, multímetro digital marca *FLUKE modelo 179* con resolución de 0.1 VCA para la verificación de tensión eléctrica eficaz (RMS) de entrada en los PCBA's de prueba. La información de referencia para los equipos de control y medición mencionados se puede consultar en la Figura 25 y Tabla 17.



Figura 25. Equipos de control y medición para prueba de arco eléctrico (de arriba a abajo y de izquierda a derecha: fuente de energía, campana de laboratorio, multímetro, disp. de sujeción, cronómetro y medidor de ángulos).

Tabla 17. Especificaciones técnicas de equipos de control y medición para prueba de arco eléctrico.

	Equipo / Dispositivo de prueba (Descripción genérica)	Requerimientos de Mediciones (unidades de medición)	Rango (Min/Max capacidad de medición)	Resolución (Incrementos máximos de medición)
A.	Fuente de energía AMETEK modelo MX15	VCA (RMS)	0 V - 300 V	0.1 V
B.	Campana de laboratorio	-	-	-
C.	Disp. Sujeción PANAVISE modelo 381	-	-	-
D.	Cronómetro GENERAL modelo H-5670	Hrs	Tiempo de vuelta horas	1/100 segundo
E.	Medidor de ángulos ED&D modelo AM-01	(°) grados sexagesimales	0° - 360°	1°
F.	Multímetro digital FLUKE modelo 179	VCA (RMS)	0 V - 1000 V	0.1 mV

3.4.3. Descripción / preparación de muestras y suministros de prueba de arco eléctrico.

En la realización de la prueba de arco eléctrico, se utilizaron 13 tarjetas electrónicas pertenecientes al mismo lote de la prueba de vida acelerada. Estas muestras no requirieron una preparación especial extra, más que sólo la configuración de secuencia de software (90 segundos ON y 18 segundos OFF) para realizar activaciones continuas de sus componentes.

Previo a cualquier prueba los arneses de las clavijas utilizada deben estar limpias de cualquier contaminante, especialmente de residuos de jabón o agua, para evitar que los arcos también se presenten a lo largo de éstas. El uso de guantes dieléctrico fue obligatorio para evitar cualquier descarga eléctrica durante el proceso de experimentación

También fue necesario preparar previamente la solución conductiva para inducir el arco eléctrico, ésta debe ser de al menos 500 ml con una proporción de 75% de agua y 25% de detergente líquido para lavavajillas *marca "Cascade"*. La solución se vierte en un contenedor de uso común, con aspensor integrado (atomizador), y se mezcla bien por al menos unos 30 segundos.

En la Tabla 18 y Figura 26 se muestra la lista completa de los suministros y materiales requeridos para realizar la prueba.

Tabla 18. Lista de suministros para prueba de arco eléctrico.

	Artículos / Suministros (Descripción genérica)	Requerimientos (unidades de medición)	Cantidad	Especificación
A.	Tarjetas electrónicas de lavadoras PCBA	-	13	Intensión de diseño
B.	Detergente líquido para lavavajillas CASCADE	ml	25% del volumen total de solución	Fabricante
C.	Guantes dieléctricos Ainars DIE 25	N/A	1	Clase 00
D.	Atomizador de agua comercial	ml	1	Cap. 500 ml



Figura 26. Referencia de suministros de prueba de arco eléctrico.

Previo a llevar a cabo la experimentación se tomaron en cuenta las consideraciones que a continuación se describen.

- Uso de equipo de protección personal pertinente. Específicamente lentes de seguridad y los guantes dieléctricos mencionados arriba, para prevenir riesgo de descarga eléctrica y exposición directa a la solución conductiva.
- También uso de una placa de protección para soldar, con el fin de prevenir exposición visual a chispas y arcos eléctricos presentes durante el proceso de prueba.
- Es de suma importancia contar con interruptores para activar y desactivar el suministro de energía en cualquier momento.
- Asegurar que arneses y clavijas, usados para energizar muestras, se encuentren en perfectas condiciones antes de energizar.

3.4.4. Condiciones de prueba y diseño de experimentos para prueba de arco eléctrico.

3.4.4.1 Condiciones de prueba de arco eléctrico.

Principalmente se tomaron en cuenta 3 factores para el diseño de prueba, la tensión eléctrica eficaz de operación, el ángulo de posición de la tarjeta en el ensamble dentro de la lavadora, y el medio acuoso (solución conductiva). Los dos primeros son factores variables, se usaron diferentes niveles en el diseño de experimentos, pero el medio acuoso fue definido como factor fijo, debido a dificultades para controlar exactamente la cantidad de solución a aplicarse sobre las muestras.

De acuerdo a lo anterior, se determina como un Diseño de Experimentos Central Compuesto con 2 factores, la tensión eléctrica eficaz de entrada y el ángulo de posición de la tarjeta en el ensamble; en donde los niveles de tensión eléctrica eficaz seleccionados fueron 116.02 VCA, 127 VCA, 153.5 VCA, 180 VCA y 190.97 VCA, y para el ángulo de posición fueron 71.36°, 90°, 135°, 180° y 198.64°, todos estos niveles definidos para caracterizar de forma más específica la curva de respuesta, es decir, el comportamiento del tiempo en presentarse corto eléctrico en componentes de la tarjeta.

Los niveles seleccionados incluyen los rangos de tensión eléctrica eficaz encontrados en la Cd. de Querétaro (90VCA – 145 VCA), además, también contempla niveles más bajos y altos para analizar toda la influencia de la variación correspondiente a este factor. En cuanto al ángulo de posición, el diseño contempla una gama completa de las diferentes posiciones que podría adaptarse la tarjeta dentro del ensamble, en donde básicamente puede ir de 0°, una posición horizontal con los componentes viendo hacia arriba, a 360°, la cual también es una posición horizontal, pero con los componentes viendo hacia abajo.

La prueba de arco eléctrico no tiene un tiempo de duración específico, ya que los cortos eléctricos pueden ocurrir en cualquier momento cuando la solución conductiva es rociada intermitentemente sobre la muestra en evaluación. El proceso

de preparación de muestras y acondicionamiento de prueba se describe a continuación.

- a) Primero, se limpian cuidadosamente las muestras, con un paño limpio de material no abrasivo, para retirar polvo y partículas de suciedad.
- b) Posteriormente, la muestra se posiciona en el ángulo de prueba deseado, usando el medidor de ángulos, y se asegura su posición con el dispositivo sujetador para evitar su movimiento (ver Figura 27).
- c) Después la muestra es ubicada dentro de la campana de laboratorio y se le conecta el conector del arnés clavija (ver Figura 27).
- d) En seguida se conecta clavija al tomacorriente de la fuente de energía, se ajusta el valor deseado de tensión eléctrica, y se energiza la muestra.
- e) Se inicia prueba rociando solución conductiva con 3 activaciones de atomizador sobre la zona en donde se encuentran los componentes de la tarjeta más propensos a falla (fuente de poder, transistores, triac, etc.), como se muestra en la Figura 27. El rociado se debe realizarse a 30 cm de distancia de la tarjeta, para asegurar que la solución cae en la zona deseada. Cada 20 segundos transcurridos se vuelve a rociar la tarjeta nuevamente hasta que se presente la falla de corto eléctrico.
- f) Una vez presentándose falla, se detienen cronómetro, se registra el tiempo y se desactiva la fuente de energía.
- g) Por último, se analizan partes dañadas, se toma evidencia fotográfica y se lleva a cabo a cabo el mismo procedimiento con el resto de las muestras.



Figura 27. Acomodo y zona de rociado en muestras de prueba de arco deléctrico.

3.4.4.2 Diseño de experimentos para prueba de arco eléctrico.

Para este experimento se hizo uso de un Modelo de Superficie de Respuesta realizando un diseño de experimentos central compuesto con 2 factores, considerando como variables independientes (X's vitales) a la tensión eléctrica eficaz de entrada y el ángulo de posición de la tarjeta en el ensamble, mientras la solución inductiva se tomó como factor fijo para todo el conjunto de experimentos propuestos. La variable de respuesta (Y) del experimento fue el tiempo, en segundos, en que se presenta un corto eléctrico o daño severo en las tarjetas electrónicas por la presencia de arco eléctrico. En la Tabla 19 se muestra el diseño de experimentos definido.

Tabla 19. Diseño de experimentos: Prueba de arco eléctrico a tarjetas.

Corrida	Orden Corrida	Puntos	Bloques	Tensión entrada (VCA)	Ángulo de posición (°)
1	1	1	1	127	90
13	2	0	1	153.5	135
9	3	0	1	153.5	135
3	4	1	1	127	180
2	5	1	1	180	90
12	6	0	1	153.5	135
11	7	0	1	153.5	135
8	8	-1	1	153.5	198.6
7	9	-1	1	153.5	71.3
5	10	-1	1	116.02	135
6	11	-1	1	190.97	135
4	12	1	1	180	180
10	13	0	1	153.5	135

*Condición fija: 500 ml solución conductiva (25% detergente Cascade + 75% agua)

Se realizó experimento correspondiente a cada corrida listada en la Tabla 19 para obtener el tiempo total que cada muestra requirió para presentar corto eléctrico o daño significativo en alguno de sus componentes. La respuesta obtenida se puede apreciar en la Tabla 20, en la que se aprecian variaciones del tiempo de acuerdo a las variaciones propuestas en los experimentos.

Los modos de falla reproducidos en la prueba de arco eléctrico coinciden con los observados en campo, se observan tanto componentes quemados como rastros de arco eléctrico. Lo anterior se puede apreciar en las imágenes de la Figura 28 y Figura 29.

En el siguiente capítulo se muestra el análisis estadístico de los resultados tanto para la prueba de arco eléctrico como para la de vida acelerada, para que se determine el nivel de influencia de las variables seleccionadas sobre las tarjetas electrónicas.

Tabla 20. Diseño de experimentos: resultados de prueba de arco eléctrico..

Corrida	Orden Corrida	Puntos	Bloques	Tensión entrada (VCA)	Ángulo de posición (°)	Tiempo para corto o daño (s)
1	1	1	1	127	90	545
13	2	0	1	153.5	135	163
9	3	0	1	153.5	135	242
3	4	1	1	127	180	185
2	5	1	1	180	90	227
12	6	0	1	153.5	135	89
11	7	0	1	153.5	135	139
8	8	-1	1	153.5	198.64	119
7	9	-1	1	153.5	71.36	167
5	10	-1	1	116.023	135	453
6	11	-1	1	190.977	135	71
4	12	1	1	180	180	151
10	13	0	1	153.5	135	132

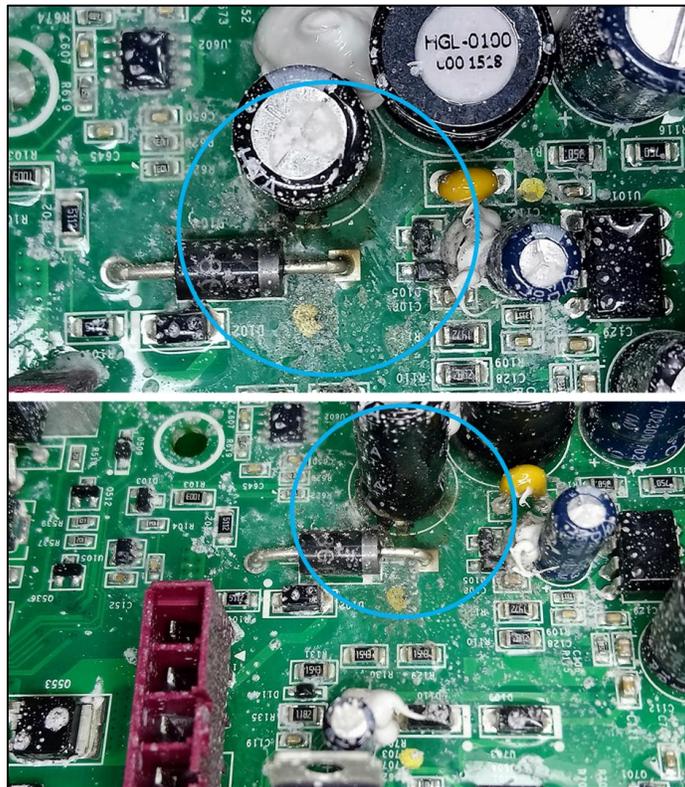


Figura 28. Cortos y daños observados en muestras después de prueba de arco eléctrico (1).



Figura 29. Cortos y daños observados en muestras después de prueba de arco eléctrico (2).

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

4.1. Análisis estadístico del Diseño de experimentos de prueba de vida acelerada.

Los resultados obtenidos mostraron variaciones muy pequeñas en la tensión de salida (VCD), sin embargo, se creía que las variaciones en la tensión eléctrica de entrada y la temperatura ambiente, afectan de forma significativa a la variable de respuesta. Por lo anterior, se tenían las siguientes hipótesis a contrastar:

- **Hipótesis nula:** la degradación de la “tensión eléctrica de salida” en una tarjeta electrónica es igualmente afectada por las variables de temperatura y tensión de entrada que se usan en prueba de vida acelerada (ALT).

$$H_0: \mu_{temp} = \mu_{tens}$$

- **Hipótesis alterna:** la degradación de la “tensión eléctrica de salida” en una tarjeta electrónica es mayormente afectada por una de las dos variables de prueba (temperatura o tensión de entrada).

$$H_a: \mu_{temp} \neq \mu_{tens}$$

El primer acercamiento al análisis de los resultados obtenidos se realizó llevando a cabo un gráfico de efectos principales, para entender visualmente las diferencias entre las variables X y sus afectaciones en la tensión eléctrica de salida (VCD). Dentro del rango estudiado la “tensión eléctrica de entrada” aparentemente tiene más influencia sobre la variable de respuesta Y (tensión de salida de fuente de poder). Se muestra el gráfico en la Figura 30.

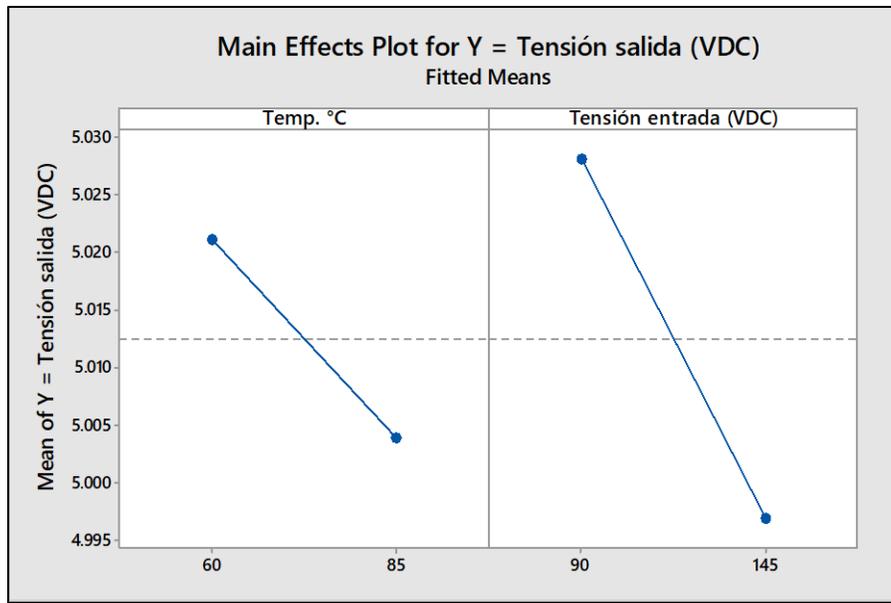


Figura 30. Gráfico de efectos principales entre Temperatura y Tensión de entrada.

También se realizó un gráfico interacción para entender sus interacciones, como se ve en la Figura 31. El gráfico indica que existe interacción entre las dos variables “temperatura” y “tensión eléctrica de entrada”. Se observó que la “tensión eléctrica de salida” es menor cuando la temperatura y tensión de entrada son más altas (85°C y 145 VCA).

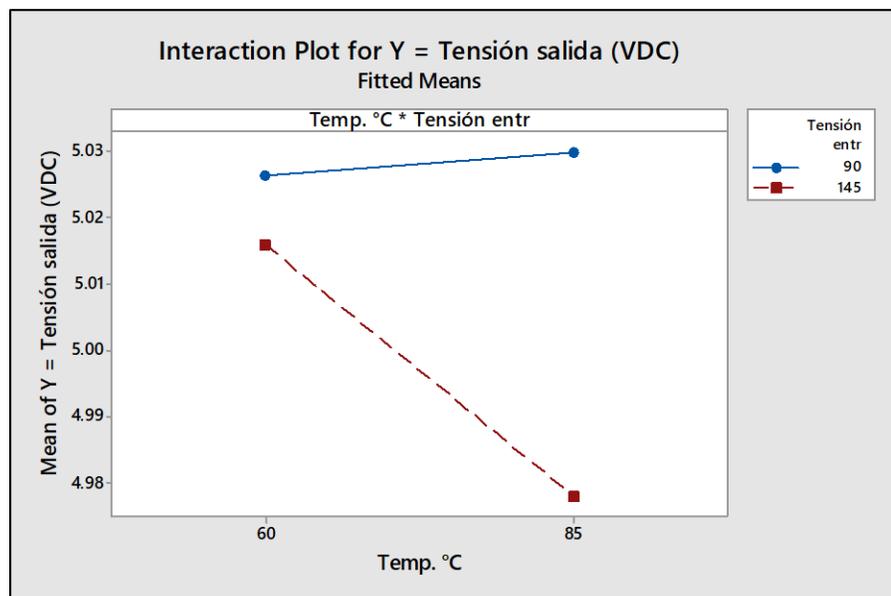


Figura 31. Gráfico de interacciones entre Temperatura y Tensión de entrada.

La grafica de cubo también indica que las condiciones temperatura y tensión de entrada en su nivel más alto (85°C y 145V), muestran mayor daño en las tarjetas electrónicas debido a que el valor mínimo requerido debe ser 5 VCD para asegurar su correcto funcionamiento (ver Figura 32).

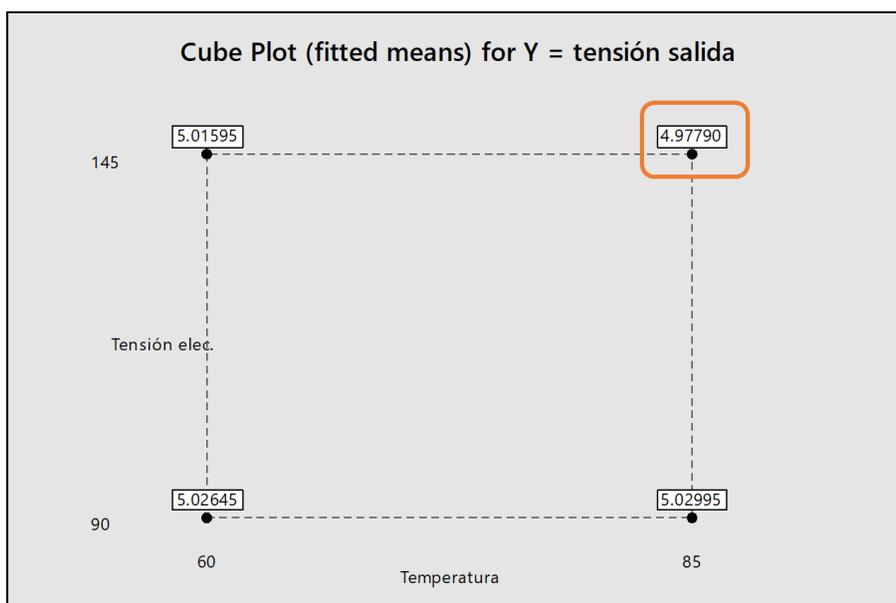


Figura 32. Gráfico de cubo entre Temperatura y Tensión de entrada.

Del análisis estadístico del ANOVA se obtiene que ambos factores no muestran significancia estadística para afectar la variable de respuesta, ya que el pvalue < 0.05. Tampoco la interacción de los factores muestra una diferencia significativa (Figura 33).

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		5.0126	0.0123	408.46	0.000	
Temperatura	-0.0173	-0.0086	0.0123	-0.70	0.520	1.00
Tensión elec.	-0.0313	-0.0156	0.0123	-1.27	0.272	1.00
Temperatura*Tensión elec.	-0.0208	-0.0104	0.0123	-0.85	0.445	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

Y = tensión salida = 4.872 + 0.00286 Temperatura + 0.00162 Tensión elec. - 0.000030 Temperatura*Tensión elec.

Figura 33. Valores de p y modelo de regresión de la variable Y “tensión eléctrica de salida”

Sin embargo, existe una diferencia significativa entre los valores de F de la temperatura y la tensión eléctrica, siendo mayor para última y denotando que este factor sí influye más en la reducción de la tensión de salida.

Factorial Regression: Y = tensión salida versus Temperatura, Tensión elec.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0.003416	0.001139	0.95	0.498
Linear	2	0.002553	0.001277	1.06	0.427
Temperatura	1	0.000597	0.000597	0.50	0.520
Tensión elec.	1	0.001956	0.001956	1.62	0.272
2-Way Interactions	1	0.000863	0.000863	0.72	0.445
Temperatura*Tensión elec.	1	0.000863	0.000863	0.72	0.445
Error	4	0.004819	0.001205		
Total	7	0.008235			

Figura 34. Análisis de los cuadrados medios.

Los resultados obtenidos del experimento 1, no fueron contundentes por lo que se propone realizar un segundo experimento para determinar, con base en el mecanismo de falla de arco eléctrico, cómo puede reproducirse de forma más rápida y efectiva un corto eléctrico en la tarjeta de control de la lavadora.

4.2. Análisis estadístico del Diseño de experimentos de la prueba de arco eléctrico.

Las relaciones entre la variable dependiente “Y” y las variables independientes “X” pueden involucrar curvas, y podrían aproximarse mejor con ecuaciones cuadráticas. El por lo anterior que los experimentos factoriales de 2 niveles no pueden usarse para adjudicar la curvatura a una variable específica, por lo que no pueden usarse para encontrar un óptimo.

Ecuación 1. Ec. cuadrática para 2 variables independientes.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12} x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + error$$

Debido a las limitaciones de los experimentos de dos niveles, el modelo de Superficie de Respuesta que se propuso, proporcionó una mejor forma de modelar u optimizar la posible relación cuadrática entre el tiempo en presentarse corto o daño en la tarjeta con las variables independientes, tensión de entrada y ángulo de posición en el ensamble.

Las hipótesis de este experimento se listan abajo.

- **Hipótesis nula:** el tiempo en provocarse un corto circuito por presencia de arco eléctrico en una tarjeta electrónica es afectado igualmente por la tensión de entrada con la que se energiza y por el ángulo de posición en el ensamble.

Ho: $\mu_{tensión} = \mu_{ángulo}$

- **Hipótesis alterna:** el tiempo en provocarse el corto circuito por presencia de arco eléctrico en una tarjeta electrónica sólo es afectado por una de las variables de prueba, la tensión de entrada con la que se energiza o el ángulo de posición en el ensamble.

Ha: $\mu_{tensión} \neq \mu_{ángulo}$

En cuanto al análisis del diseño de experimentos propuesto, se inició con la construcción de gráficos de dispersión para analizar las relaciones aparentes de la variable de respuesta "Y", tiempo en presentarse corto eléctrico o daño en la tarjeta (segundos), respecto a los dos factores integrados en este experimento.

Las comparaciones gráficas de la variable de respuesta Y contra las variables independientes X_1 y X_2 , mostraron que podría existir una relación lineal entre X_1 y Y, es decir, la tensión de salida parecía tener un efecto lineal sobre el tiempo transcurrido para presentar corto eléctrico o daño en las tarjetas eléctricas de lavadoras, como se muestra en la Figura 35. Así mismo, aparentemente podía existir una relación curva entre X_2 y Y, y posiblemente el valor de la variable de respuesta más bajo se puede encontrar en los 135° de posicionamiento de la tarjeta (ver Figura 36).

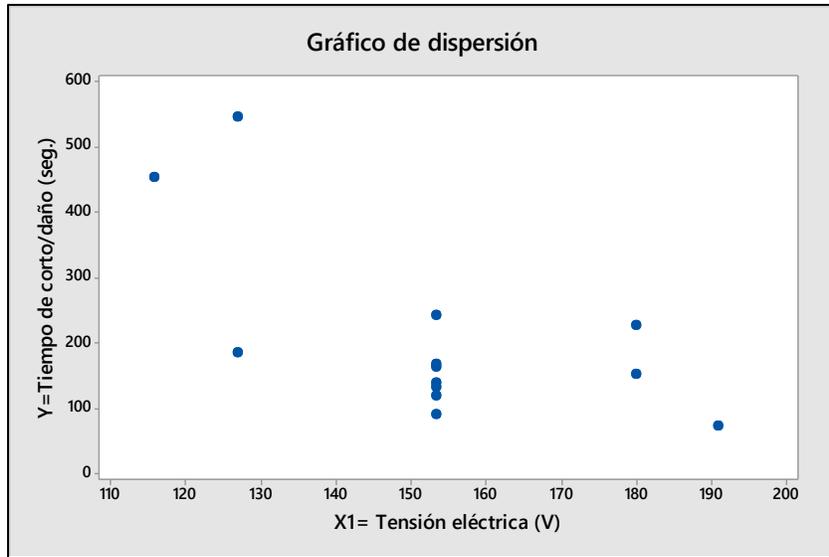


Figura 35. Gráfico de dispersión de la relación del tiempo de corto o daño en tarjeta con la tensión eléctrica de entrada.

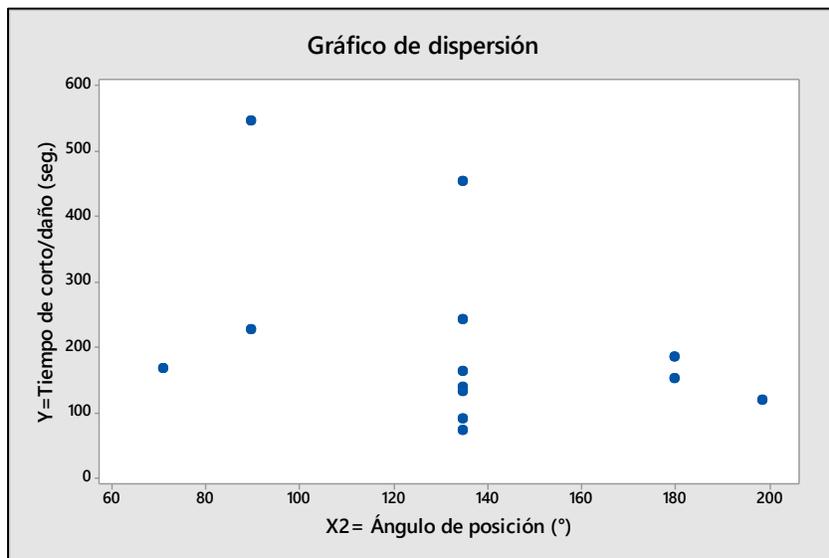


Figura 36. Gráfico de dispersión de la relación del tiempo de corto o daño en tarjeta con el ángulo de posición de ensamble..

Con la evidencia anterior, se procedió a analizar todas las condiciones previstas del experimento, ajustando el modelo de superficie de respuesta en el software estadístico y generando las gráficas de diagnóstico para los residuales.

Los residuales obtenidos parecen estar normalmente distribuidos, como lo indicó la prueba de normalidad realizada con un valor de $p = 0.954$, y se observó que los mismos no están aparentemente centrados alrededor del valor de 0 y no

presentan patrones visibles (aleatorios). En resumen, las gráficas en las Figura 37 y Figura 38 mostraron que el modelo ajusta bien a los datos.

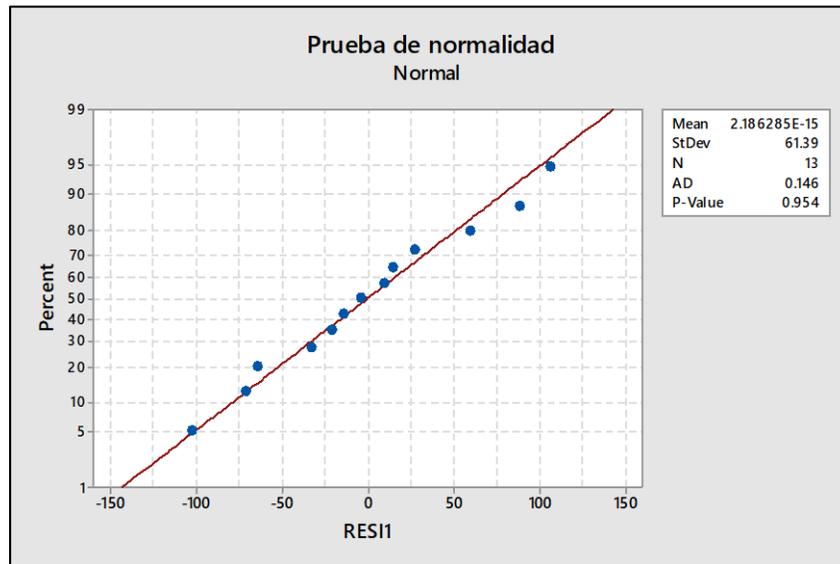


Figura 37. Prueba de normalidad para los residuales del experimento de arco eléctrico..

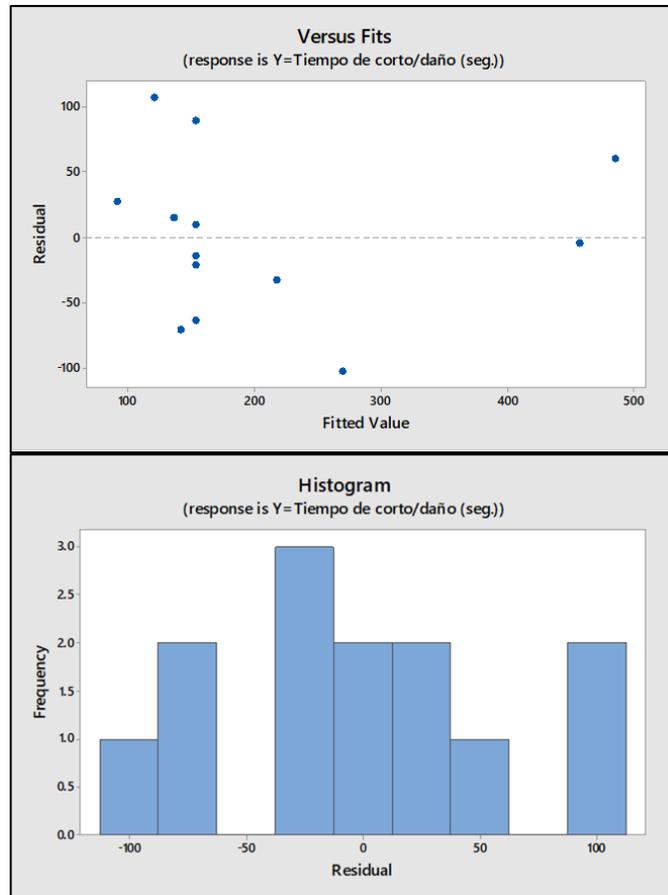


Figura 38. Gráficos de dispersión e historgrama de los residuos del experiemnto de arco eléctrico.

Se continuó con el análisis de los datos, y los coeficientes de regresión estimados indicaron que tanto la variable X_1 (tensión eléctrica de entrada) como la relación cuadrática de la misma variable (X_1^2) eran significativas (valores de $p < 0.05$), es decir, que tenían mayor relación o impacto importante sobre los tiempos en que se presentaba un corto eléctrico en las tarjetas.

Así mismo, de acuerdo al valor de $R-sq$ se concluyó que el modelo propuesto explica el 80.76% de la variación en la respuesta “tiempo en que se presenta el arco eléctrico”, la cual es explicada por la tensión de entrada, mientras que el ángulo de posición no parece influenciar de manera significativa. Es importante mencionar que la proporción entre $R-sq = 80.76\%$ y $R-sq(adj) = 66.86\%$ es alta, por lo que se infiere que el modelo propuesto no ajusta del todo bien los datos (ver Figura 39).

Coded Coefficients				
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value
Constant		153.0	35.9	4.26
X1= Tensión eléctrica (V)	-223.1	-111.5	28.4	-3.92
X2= Ángulo de posición (°)	-126.0	-63.0	28.4	-2.22
X1= Tensión eléctrica (V)*X1= Tensión eléctrica (V)	146.2	73.1	30.5	2.40
X2= Ángulo de posición (°)*X2= Ángulo de posición (°)	27.3	13.6	30.5	0.45
X1= Tensión eléctrica (V)*X2= Ángulo de posición (°)	142.0	71.0	40.2	1.77

Term	P-Value	VIF
Constant	0.004	
X1= Tensión eléctrica (V)	0.006	1.00
X2= Ángulo de posición (°)	0.062	1.00
X1= Tensión eléctrica (V)*X1= Tensión eléctrica (V)	0.047	1.02
X2= Ángulo de posición (°)*X2= Ángulo de posición (°)	0.668	1.02
X1= Tensión eléctrica (V)*X2= Ángulo de posición (°)	0.121	1.00

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
80.3760	80.67%	66.86%	0.00%

Figura 39. Estadísticos de los coeficientes estimados.

En la tabla de la ANOVA obtenida (ver Figura 40) también se observó que las variables X_1 y X_1^2 influyen significativamente en los resultados de la variable dependiente Y , pero, ni la interacción ni la variable X_2 son significativas para el modelo. También se observó que la razón entre “falta de ajuste” y “error puro”, en la columna Adj SS, es relativamente pequeña, aproximadamente de 2:1., y esto nos indica que no existe un mejor modelo para este proceso de acuerdo a las variables consideradas en el experimento.

Analysis of Variance				
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Model	5	188727	37745	5.84
Linear	2	131246	65623	10.16
X1= Tensión eléctrica (V)	1	99509	99509	15.40
X2= Ángulo de posición (°)	1	31737	31737	4.91
Square	2	37317	18658	2.89
X1= Tensión eléctrica (V)*X1= Tensión eléctrica (V)	1	37198	37198	5.76
X2= Ángulo de posición (°)*X2= Ángulo de posición (°)	1	1291	1291	0.20
2-Way Interaction	1	20164	20164	3.12
X1= Tensión eléctrica (V)*X2= Ángulo de posición (°)	1	20164	20164	3.12
Error	7	45222	6460	
Lack-of-Fit	3	32468	10823	3.39
Pure Error	4	12754	3189	
Total	12	233949		

Source	P-Value
Model	0.019
Linear	0.009
X1= Tensión eléctrica (V)	0.006
X2= Ángulo de posición (°)	0.062
Square	0.122
X1= Tensión eléctrica (V)*X1= Tensión eléctrica (V)	0.047
X2= Ángulo de posición (°)*X2= Ángulo de posición (°)	0.668
2-Way Interaction	0.121
X1= Tensión eléctrica (V)*X2= Ángulo de posición (°)	0.121
Error	
Lack-of-Fit	0.134
Pure Error	
Total	

Figura 40. Tabla de ANOVA de experimento.

Se intentó mejorar el modelo del experimento considerando sólo las variables significativas, pero los resultados del análisis de superficie de respuesta posterior, arrojó como conclusión que el modelo pierde ajuste a los datos. Por tal motivo, se desechó este segundo modelo propuesto (ver Figura 41).

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
99.2042	57.93%	49.52%	21.01%

Figura 41. Ajuste de modelo considerando sólo X_1 y X_1^2 en análisis de superficie de respuesta.

De acuerdo a los resultados mostrados anteriormente, se determinó la ecuación de regresión que mejor describe el proceso de reproducción de corto eléctrico o daño en tarjeta, la cual nos dice que:

Ecuación 2. Ec. del tiempo de corto eléctrico o daño en tarjeta de lavadora.

$$Y = 4798 - 44.2x_1 + 12.36x_2 + 0.104x_1^2 + 0.0067x_2^2 + 0.0595x_1x_2$$

Con el modelo descrito anteriormente, se realizó un gráfico de contorno para determinar los valores de X_1 y X_1^2 , que determinan la presencia de corto de eléctrico o daño en tarjeta, en donde el tiempo menor sería el ideal para reproducir modos de falla durante esta prueba. Recordando que esta prueba tiene como objetivo el reproducir cortos o daños en tarjeta de una forma más rápida detectando los valores de tensión eléctrica y ángulo de posición más críticos para el diseño. La gráfica de contorno mostró que los niveles de prueba ideales se encuentran en 153.5 VCA de tensión eléctrica eficaz, y 135° de posición de la tarjeta en el ensamble, como se puede apreciar en la Figura 42.

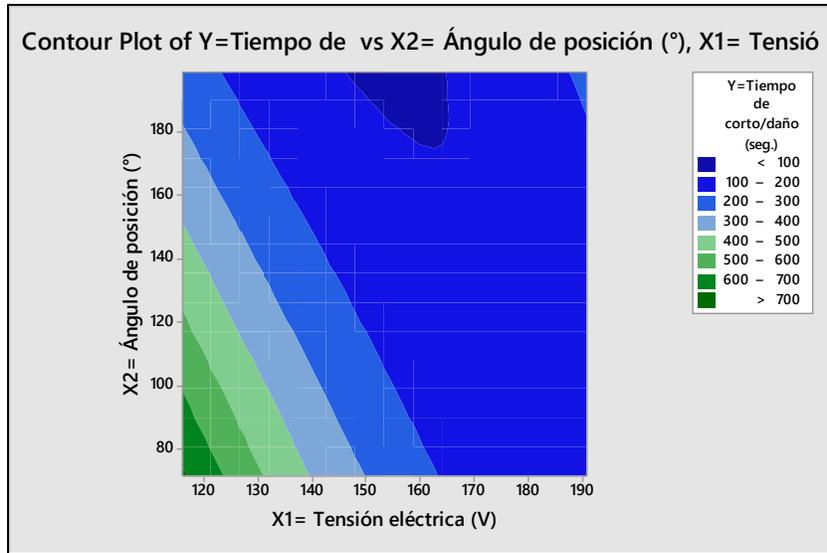


Figura 42. Gráfico de contorno para identificación de niveles de X_1 y X_2 óptimos.

5. CONCLUSIONES

5.1. Prueba de vida acelerada (ALT)

De acuerdo a los resultados del experimento con pruebas aceleradas, se acepta la hipótesis nula, por lo tanto, no hay diferencia significativa entre los factores de temperatura y tensión eléctrica eficaz usados para reproducir cortos eléctricos con la inclusión del mecanismo de falla conocido como fenómeno de migración electroquímica (ECM).

Tanto la temperatura como la tensión de entrada parecen ser dos factores que no afectan significativamente a la tensión de salida en las tarjetas después de 150 horas de prueba, sin embargo, es evidente en los gráficos (de cubo particularmente) que los niveles altos tienen mayores efectos sobre la variable de respuesta (tensión eléctrica).

Los niveles seleccionados de los factores, aunque representan las condiciones de uso en la Cd. de Querétaro, no son los adecuados para obtener resultados de una forma rápida y evidente. Es probable que se requiera incrementar el tiempo de exposición o incrementar los niveles de las condiciones seleccionadas para que se pueda observar una degradación más rápida y clara en la tensión de salida VCD. Por lo anterior, a pesar de que los resultados no fueron favorables para este experimento, se recomienda la inclusión de la prueba de vida acelerada en los planes de evaluación para los futuros diseños de tarjetas electrónicas (PCBA's) que vayan a ser usados en productos que estén dirigidos al mercado mexicano. Los niveles a usar en prueba deben ser 85% humedad relativa, 145 VCA de tensión de entrada, y 85°C de temperatura por al menos 150 horas de prueba, como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Configuración de prueba vida acelerada para el mercado mexicano.

Parámetro de Ruido (KNP como fue definido en diagrama P)	Configuración de prueba (Configurar a este nivel)
Prueba ALT	
A. Temperatura de prueba	85°C

B. Tensión eléctrica	145 VAC \pm 10%
C. Humedad relativa	85% RH
D. Tiempo de prueba	150 hrs
E. Medición de tensión de salida	VCD

5.2. Prueba de arco eléctrico.

En cuanto al segundo diseño de experimentos planteado, se acepta la hipótesis alterna, en donde se determina que la reproducción de cortos eléctricos en la tarjeta de la lavadora es afectada directamente por la tensión eléctrica de entrada, y aunque los ángulos de posición del ensamble también aportan, es claro que el factor determinante es la tensión eléctrica de entrada con la que son alimentadas las tarjetas.

Mientras mayor sea el nivel de tensión eléctrica de entrada, se presentará de forma más rápida el corto eléctrico. Los datos obtenidos de la prueba de arco eléctrico muestran que con una tensión eléctrica de entrada de 153.5 VCA y 135° de ángulo de posición del ensamble de la tarjeta, se pueden simular un corto circuito entre 89 y 242 segundos (Tabla 22).

Tabla 22. Configuración de prueba de arco eléctrico para el mercado mexicano.

Parámetro de Ruido (KNP como fue definido en diagrama P)	Configuración de prueba (Configurar a este nivel)
Prueba Arco Eléctrico	
A. Solución conductiva	25% total del volumen
B. Tensión eléctrica	153.5 VAC
C. Medición tiempo de corto	Segundos

Por lo anterior, se recomienda que la prueba de arco eléctrico también sea incluida, como prueba de degradación acelerada, al plan de evaluación actual de confiabilidad nivel componentes de la empresa.

En un inicio no se contaba con los métodos de laboratorio suficientes y completos para reproducir el modo de falla de corto eléctrico, lo cual representaba

posibles riesgos en el cumplimiento de las garantías del producto. Por tal motivo, la importancia de la aplicación de pruebas aceleradas y de degradación es un factor determinante para validar la calidad a través del tiempo de un sistema o componente.

No se trata de una regla que siempre debe seguirse para el diseño de pruebas, sino que se trata de un proceso vivo en el cual, de acuerdo a las necesidades de cada sistema o componente, todas las actividades de análisis y prueba deben ser completadas antes de la salida a producción de cualquier producto.

Se concluye que efectivamente, las variaciones de tensión eléctrica son un factor muy importante que afecta directamente el correcto funcionamiento de las tarjetas, y que debe ser estudiado más a fondo para que en futuros estudios, como complemento a esta investigación, se puedan determinar otros niveles o factores que afectan la calidad de la energía, y que no sólo correspondan a los estudiados en la ciudad de Querétaro, sino que también todo el territorio mexicano.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIAG-Work Group. 2010. Measurement Systems Analysis MSA. 4th. Daimler Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation.

ANCE. 1999. ANCE NMX-J098-ANCE-1999 SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA - SUMINISTRO - TENSIONES ELÉCTRICAS NORMALIZADAS.

ANCE. 2012. ANCE NMX-J-521/1-ANCE-2012 APARATOS ELECTRODOMÉSTICOS Y SIMILARES – SEGURIDAD – PARTE 1: REQUISITOS GENERALES. 258.

ANCE. 2013. NMX-J-521/2-11-ANCE-2013 APARATOS ELECTRODOMÉSTICOS Y SIMILARES – SEGURIDAD – PARTE 2-11: REQUISITOS PARTICULARES PARA SECADORAS DE ROPA.

ANSI C84.1-2011. 2011. Electric Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60 Hz).

Borgia, O., F. De Carlo, N. Fanciullacci, and M. Tucci. 2013. Accelerated life tests for new product qualification: a case study in the household appliance. IFAC. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S147466701535686X>

De Carlo, F., O. Borgia, and M. Tucci. 2014. Accelerated degradation tests for reliability estimation of a new product: A case study for washing machines. Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab. 228:127–138. doi:10.1177/1748006X13500650. Available from: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1748006X13500650>

Chen, W. 2011. Accelerated Degradation Reliability Modeling and Test Data Statistical Analysis of Aerospace Electrical Connector. Chinese J. Mech. Eng. 24:957. doi:10.3901/CJME.2011.06.957. Available from: http://www.cjmenet.com/xuebaoenglish/papersed/allpapered/abstractall/zyy2011_6_957.htm

Escobar, L. A., and W. Q. Meeker. 2006. A Review of Accelerated Test Models. Stat. Sci. 21:552–577. doi:10.1214/088342306000000321. Available from: <http://projecteuclid.org/euclid.ss/1177334529>

Fard, N., and C. Li. 2009. Optimal simple step stress accelerated life test design for reliability prediction. J. Stat. Plan. Inference. 139:1799–1808. doi:10.1016/j.jspi.2008.05.046.

General Electric. 2011. ETP 111C002 Método de prueba de ciclos continuos. 5.

General Electric. 2013. ETP910C001 Método de prueba electrónicos.

Goba, F. 1969. Bibliography on Thermal Aging of Electrical Insulation. *Electr. Insul.* 31–58. Available from: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4081553%5Cnpapers2://publication/uuid/D4910C48-A9F6-4420-AC1B-2AEE6A507F62

Hand, J., Kelly, N., & Samuel, A. 2014. High resolution modelling for performance assessment of future dwellings. *Pap. Present. Build. Simul. Optim. Conf. BSO '14*, London, United Kingdom.

IEC 60112. 2003. Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials. 3. Available from: www.iec.ch

IEEQ. 2014. Cartografía Electoral del Estado de Querétaro 2014-2015. Available from: http://ieeq.mx/contenido/elecciones/2014_2015/cartografia/estructura.html

INEGI. 2010. México en cifras. Available from: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/#>

Jellesen, M. S., D. Minzari, U. Rathinavelu, P. Møller, and R. Ambat. 2010. Corrosion failure due to flux residues in an electronic add-on device. *Eng. Fail. Anal.* 17:1263–1272. doi:10.1016/j.engfailanal.2010.02.010. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.02.010>

Juran, J. M. 1988. *Juran on planning for quality*. New York Free Press.

Klaić, Z., S. Nikolovski, and Z. Kraus. 2011. Voltage Variation Performance Indices in Distribution Network. *Teh. Vjesn.* 56:547–551.

McCallum J., Thomas R. E., & W. J. H. 1973. Accelerated testing of space batteries. *Natl. Aeronaut. Sp. Adm. Rep. NASA SP-323*.

Meeker, W. Q., L. A. Escobar, and Y. Hong. 2009. Using Accelerated Life Tests Results to Predict Product Field Reliability. *Technometrics.* 51:146–161. doi:10.1198/TECH.2009.0016.

Nelson, W. 1974. A Survey of Methods for Planning and Analyzing Accelerated Tests. *IEEE Trans. Electr. Insul.* EI-9:12–18. doi:10.1109/TEI.1974.299289.

PacifiCorp 1C.2.1. 2011. Section 2.1 - Voltage Level and Range. In: *Power Quality Standards part C. Vol. 1. p. 1–6*. Available from: https://www.pacificpower.net/content/dam/pacific_power/doc/Contractors_Suppliers/Power_Quality_Standards/1C_2_1.pdf

Park, S. J., S. D. Park, K. S. Kim, and J. H. Cho. 2006. Reliability evaluation for the pump assembly using an accelerated test. *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 83:283–286. doi:10.1016/j.ijpvp.2006.02.014.

Peck, D. S. 1971. The Analysis of Data from Accelerated Stress Tests. In: 9th Reliability Physics Symposium. IEEE. p. 69–78. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4207864/>

Puszkar, E., and J. Gómez. 2013. Arco eléctrico y falla a tierra, la importancia de usar AFCI y GFCI. *Constr. Eléctrico (energy Manag.* Available from: <https://constructorelectrico.com/arco-electrico-y-falla-a-tierra-la-importancia-de-usar-afci-y-gfci/>

Ramírez, I. 2012. Monitoreo y Análisis de la Calidad de la Energía Eléctrica en el Laboratorio de Automatización.

White, M., K. Macneal, and M. Cooper. 2013. Reliability considerations of ULP scaled CMOS in spacecraft systems. *Proc. - Annu. Reliab. Maintainab. Symp.* doi:10.1109/RAMS.2013.6517720.

Xie, C., and S. Lu. 2016. Performance Degradation Analysis and Reliability Statistical Inference of PCB. 2215–2218.

Yadav, O. P., N. Singh, and P. S. Goel. 2006. Reliability demonstration test planning: A three dimensional consideration. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 91:882–893. doi:10.1016/j.ress.2005.09.001.

Yang, G., and Z. Zaghati. 2006. Accelerated life tests at higher usage rates: A case study. *Proc. - Annu. Reliab. Maintainab. Symp.* 00:313–317. doi:10.1109/RAMS.2006.1677393.

7. ANEXOS.

7.1. Caracterización de parámetros de ruido (elaboración propia, 2016).

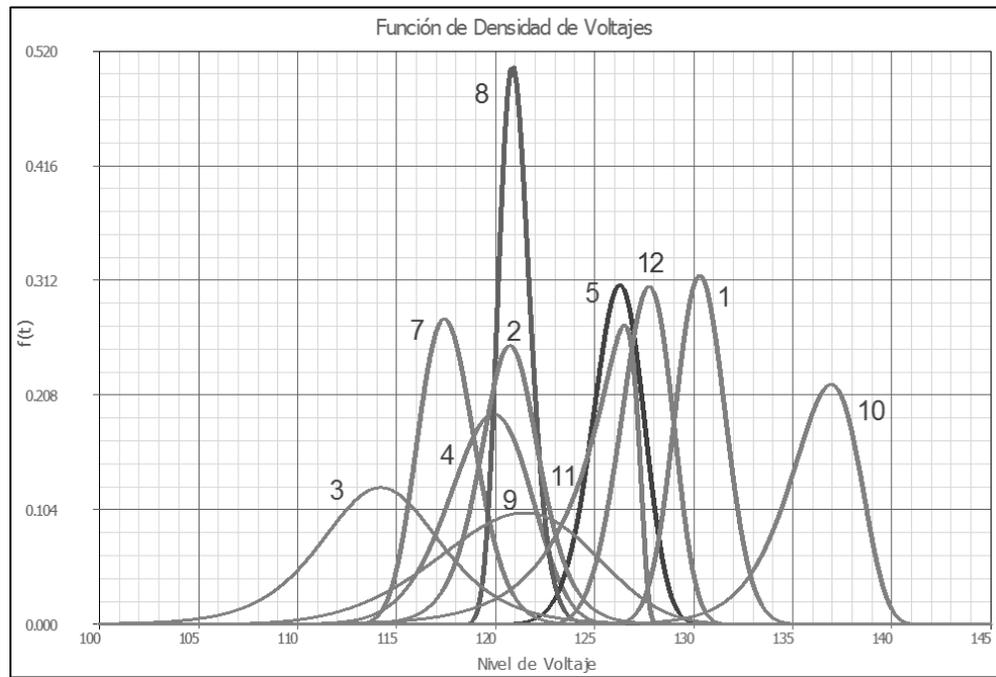


Figura 43. Función de densidad tensión eléctrica (estudio realizado por la empresa).

Tabla 23. Registros de tensiones eléctricas (estudio realizado por la empresa).

LOCACIÓN	MÍNIMO	MÁXIMO	DIFERENCIAL (Min vs Max)
1. QRO Lab	125.51	133.67	8.16
2. QRO casa hogar	112.11	124.29	12.18
3. Villa Progreso	91.64	322.72	231.08
4. Merida J. Medina	100.17	128.15	27.98
5. Merida Rigel	65.00	129.15	27.98
6. Merida Lorena	129.78	137.75	7.97
7. QRO 1	112.67	121.52	8.85
8. QRO 2	117.45	123.42	5.97
9. QRO 3	104.72	128.64	23.92
10. QRO 4	127.87	140.25	12.38
11. QRO 5	117.61	128.53	10.92
12. QRO 6	122.25	129.62	7.37

7.2. Índice de llamadas de servicio (SCR) en lavadoras calculado a enero 2017 (elaboración propia, 2017).

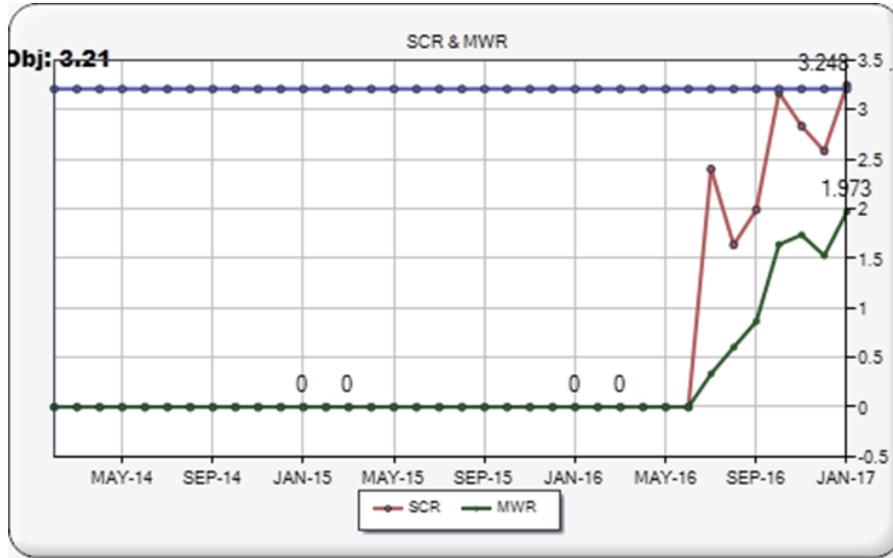


Figura 44. Total SCR en lavadoras expuestas en México.



Figura 45. Principales componentes que afectan mayormente al SCR.

7.3. Acuerdo de confidencialidad.

De acuerdo al Convenio General de Colaboración celebrado entre la empresa y la Universidad Autónoma de Querétaro firmado en junio de 2016, las partes convienen que en caso de que el personal respectivo de la institución llegase a tener acceso a información confidencial, esta se deberá manejar con absoluta discreción y confidencialidad de acorde a las leyes y buenas prácticas del país. De tal forma, se anexa extracto de dicho convenio a la sección anexo 3 para mayor referencia de los interesados (Figura 46).

DÉCIMA. CONFIDENCIALIDAD.-
"LAS PARTES" guardarán confidencialidad estricta, respecto de la información que mutuamente se proporcionen o por aquella a la que tengan acceso con motivo de la ejecución del presente Convenio General, de manera especial la clasificada como confidencial o reservada en términos de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública Gubernamental, entre otras leyes aplicables a la material, salvo que se cuente con la previa autorización escrita de quien sea responsable de dicha información, debiendo asegurarse que la información que se proporcione por el personal que cada una designe, sea manejada bajo estricta confidencialidad.

Las obligaciones contempladas en esta cláusula permanecerán vigentes y serán exigibles aún en el caso de que "LAS PARTES" dieran por terminado el presente Convenio General.

En caso de que alguna de las partes contravenga esta disposición; el presente convenio podrá ser rescindido por la parte afectada, con independencia de las demás acciones que pueda ejercitar en contra de la parte transgresora.

Figura 46. Extracto de Convenio General de Colaboración entre la empresa y UAQ (elaboración de la UAQ, 2016)

7.4. Buenas prácticas de laboratorio y disposición de residuos (muestras y materiales).

Buenas prácticas del laboratorio.

Para asegurar la calidad e integridad de los datos obtenidos en el estudio objeto de esta investigación, los laboratorios de la empresa se basan en una serie de reglas y procedimientos establecidos en la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración. De esta manera, todo el proceso de experimentación de este estudio será respaldado por los lineamientos que sigue el laboratorio y dará la confianza necesaria en los resultados obtenidos.

Disposición de residuos (muestras y materiales).

Se tiene planteado no usar algún tipo de material peligroso durante la experimentación del estudio, sin embargo, de acuerdo al **Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos** publicado en el Diario Oficial de la Federación el 30 de noviembre de 2006, la empresa tiene como compromiso seguir sus lineamientos para asegurar el correcto tratamiento, reciclaje, reutilización, co-procesamiento o disposición final de los residuos generados en el proceso.

Los materiales que serán utilizados son el cobre, como componentes de algunas piezas eléctricas (circuitos, capacitores, devanados, etc.); partes plásticas que forman parte de la estructura de los componentes analizados.