

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Electrónica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Estudio de modelos de aceleración en pruebas de vida acelerada para
los dispositivos IGBT**

presentada por
Ing. Antonio de Jesús Vallarín Olascoaga

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Director de tesis
Dr. Jesús Aguayo Alquicira

Codirector de tesis
Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich

Cuernavaca, Mor., 5 de marzo de 2018.

OFICIO No. DIE/240/2018

Asunto: Aceptación de documento de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Antonio de Jesús Vallarín Olascoaga** con número de control **M15CE106** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "**Estudio de Modelos de Aceleración en Pruebas de Vida Acelerada para los dispositivos IGBT**" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



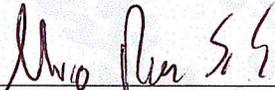
Dr. Jesús Aguayo Aleucira
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 4706315

CODIRECTOR DE TESIS



Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 4033213

REVISOR 1



Dr. Mario Ponce Silva
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3516427

REVISOR 2



Dr. Gabriel Calzada Lara
Doctor en Ingeniería Eléctrica
Cédula profesional 7599980

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares

Estudiante
Expediente

RFEJ/Irr.

Cuernavaca, Mor., 13 de marzo de 2018

OFICIO No. SAC/154/2018

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. ANTONIO DE JESÚS VALLARÍN OLASCOAGA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "**Estudio de Modelos de Aceleración en Pruebas de Vida Acelerada para los Dispositivos IGBT**", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO"



DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr

Dedicatoria

*A mis padres, Marco Antonio Vallarín Aguirre y
María del Carmen Olascoaga Morales.*

A mi hermana, María Monserrat Vallarín Olascoaga.

A mi abuelita, María de la Luz Morales Escalante.

Agradecimientos

A Dios por permitirme llegar a este momento, por guiarme en el camino y por poner en mi camino a excelentes consejeros de vida.

A mis padres y hermana por el apoyo que siempre me han dado, por guiarme en la vida y por el cariño que me demuestran en todo momento.

A mis asesores el Dr. Jesús Aguayo Alquicira y el Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich por el apoyo para la realización de este trabajo, sus consejos, observaciones y correcciones. Al Dr. Abraham Claudio Sánchez por todo el apoyo brindado durante el desarrollo del proyecto.

A mis revisores el Dr. Mario Ponce Silva y el Dr. Gabriel Calzada Lara por las aportaciones, comentarios y correcciones que hicieron posible la realización de este trabajo.

A los amigos que me ayudaron y me brindaron su apoyo siempre además de su agradable compañía.

Al Tecnológico Nacional de México y al CENIDET por darme la oportunidad de realizar este trabajo y además de brindarme el material y herramienta necesarias durante mi estancia.

Al CONACYT por el apoyo económico brindado con el cual pude sustentarme durante el tiempo en el que estuve realizando este trabajo.

RESUMEN

El presente trabajo muestra el estudio de los modelos de aceleración en las pruebas de vida acelerada, específicamente del modelo de la ley de potencia inversa de Weibull. Este modelo se utilizó para las pruebas de vida acelerada con esfuerzo en corriente aplicadas a los dispositivos IGBT.

El objetivo principal de las pruebas de vida acelerada es obtener datos de falla más rápidamente sometiendo a los dispositivos a ambientes de aceleración superiores a los que nominalmente trabaja. Para extrapolar los datos de falla de los dispositivos en condiciones aceleradas, o de estrés, a condiciones nominales de operación se hace uso de los modelos de aceleración, los cuales cuentan con una función de distribución de probabilidad y con ello se puede obtener el factor de aceleración de las pruebas.

En el presente trabajo se realizaron pruebas de vida acelerada a dispositivos IGBT con esfuerzo en corriente. Se realizó la construcción de dos circuitos, el primero fue un circuito "chopper" y el segundo es un circuito con carga resistiva. Se realizaron las pruebas en los dos circuitos obteniendo los tiempos de falla de cada uno de los dispositivos. Se analizaron los datos de falla de las pruebas en el circuito con carga resistiva, obteniendo así, los parámetros de la distribución de Weibull y las constantes del modelo de ley de potencia inversa.

Debido a lo anterior, se pudo obtener el factor de aceleración entre las pruebas de vida acelerada y las pruebas en condiciones nominales, y de esta manera poder conocer el tiempo en el que el dispositivo puede fallar en condiciones nominales.

ABSTRACT

This work presents the study of acceleration models in the accelerated life test, specifically the inverse power law-Weibull model. This model was used to the accelerated life test with current stress in the IGBT devices.

The main objective of accelerated life testing is to obtain fault data more quickly, subjecting the devices to acceleration environments higher than those that normally work. To extrapolate the failure data of the devices in accelerated conditions, or stress conditions at nominal operating conditions, the use of the acceleration models is necessary, which have a probability distribution function and thus the acceleration factor can be obtained of the tests.

In the present work, accelerated life tests were performed on IGBT devices with current stress. The construction of two circuits was carried out, the first was a "chopper" circuit and the second is a circuit with resistive load. The tests were carried out in the two circuits obtaining the failure times of each of the devices. The data of failure of the tests in the circuit with resistive load was analyzed, obtaining thus, the parameters of the Weibull distribution and the constants of the inverse power law model.

Due to the above, it was possible to obtain the acceleration factor between the accelerated life tests and the tests in nominal conditions, and in this way to know the time in which the device can fail under nominal conditions.

CONTENIDO

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Propuesta de tesis.....	2
1.1.1. Planteamiento del problema	2
1.1.2. Propuesta de solución.....	3
1.1.3. Objetivos	4
1.1.4. Alcances y limitaciones	4
1.2. Organización del documento	7
Capítulo 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	9
2.1. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1.1. Confiabilidad	9
2.1.2. Concepto de falla	9
2.1.3. Tasa de fallos	11
2.1.4. Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF)	13
2.1.5. Tiempo Medio a Fallas (MTTF)	13
2.1.6. Funciones de distribución de fallas	14
2.1.7. Pruebas de vida acelerada	17
2.2. ESTADO DEL ARTE.....	24
Capítulo 3. DESARROLLO	32
3.1. Diseño de circuitos de pruebas de vida acelerada	32
3.1.1. Circuito “Chopper”.....	33
3.1.2. Circuito IGBT simple	34
3.1.3. Circuito de activación de compuerta.....	35
3.2. Resultados en simulación del circuito “Chopper”	36
3.2.1. Resultados en simulación variando temperatura	37
3.2.2. Resultados en simulación variando corriente	39
3.2.3. Resultados en simulación variando voltaje	40
3.3. Implementación de circuitos	42

3.3.1. Implementación circuito activador de compuerta	42
3.3.2. Implementación circuito “chopper”	43
3.4. Desarrollo de pruebas en condiciones nominales	45
3.5. Desarrollo de pruebas de vida acelerada	46
3.5.1. Pruebas de vida acelerada en el circuito “Chopper”	48
3.5.2. Pruebas de vida acelerada en circuito IGBT simple	49
Capítulo 4. RESULTADOS.....	52
4.1. Resultados pruebas de vida acelerada en circuito “Chopper”.....	52
4.2. Resultados pruebas de vida acelerada en circuito IGBT simple	55
Capítulo 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	60
5.1. Conclusiones	60
5.2. Trabajos futuros.....	62
REFERENCIAS	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Metodología de solución.....	6
Figura 2.1. Falla abrupta.	10
Figura 2.2. Falla incipiente.	11
Figura 2.3. Falla intermitente.....	11
Figura 2.4. Curva de la bañera.	12
Figura 2.5. Tiempo medio a fallas y tiempo medio entre fallas.....	14
Figura 2.6. Tipos de límites del producto.....	19
Figura 2.7. Relación vida-esfuerzo.	21
Figura 2.8. Relación vida-esfuerzo [1].....	25
Figura 2.9. Histograma de tiempo de falla de las pruebas de vida acelerada [5].	27
Figura 2.10. Gráfica de distribución de tiempo de falla de las pruebas de vida acelerada [5].	27
Figura 2.11. Gráfica de probabilidad de Weibull [8].	29
Figura 2.12. Gráfica de probabilidad de Weibull [9].	31
Figura 3.1. Circuito "chopper".	33
Figura 3.2. Forma alternativa del circuito "chopper".....	34
Figura 3.3. Circuito IGBT simple.....	35
Figura 3.4. Circuito de activación de compuerta [30].....	35
Figura 3.5. Simulación temperatura circuito "chopper".....	37
Figura 3.6. Voltaje de conducción con variación en temperatura.....	37
Figura 3.7. Señales de corriente del IGBT y el inductor.....	38
Figura 3.8. Simulación corriente circuito "chopper".....	39
Figura 3.9. Voltaje de conducción con variación en corriente.....	40
Figura 3.10. Señales de las corrientes del IGBT e inductor.	40
Figura 3.11. Simulación voltaje circuito "chopper".	41
Figura 3.12. Voltaje de conducción con variación en voltaje.....	41
Figura 3.13. Señales de corriente del IGBT e inductor.....	42
Figura 3.14. Implementación circuito activador de compuerta.	43
Figura 3.15. Diagrama circuito "chopper" completo.....	43
Figura 3.16. PCB del circuito "chopper".	44
Figura 3.17. Circuito "chopper" implementado.	45
Figura 4.1. Señales capturadas del osciloscopio en las pruebas aceleradas en el circuito "chopper".	52
Figura 4.2. Voltaje de conducción durante la segunda prueba acelerada en corriente.	53
Figura 4.3. Comportamiento del voltaje de conducción con respecto a la variación de corriente.....	54

Figura 4.4. Relación vida-esfuerzo de las pruebas de vida acelerada en circuito "chopper".	55
Figura 4.5. Señales capturadas del osciloscopio en las pruebas aceleradas con el circuito IGBT simple.....	56
Figura 4.6. Relación vida-esfuerzo para las pruebas de vida acelerada en el circuito IGBT simple.....	56
Figura 4.7. Gráfica de probabilidad de Weibull para las pruebas de vida acelerada en el circuito IGBT simple.	57
Figura 4.8. Relación lineal entre $\ln(I)$ y $\ln(\alpha)$	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Tiempos de falla de los capacitores.....	25
Tabla 2.2. Valores de corriente promedio, pendiente y vida útil de los bulbos en las pruebas de vida acelerada.	26
Tabla 2.3. Temperatura y tiempos de falla en horas.....	28
Tabla 2.4. Distribución de frecuencias de las fallas.	28
Tabla 3.1. Características de tres tipos de IGBT.....	32
Tabla 3.2. Parámetros de las pruebas en condiciones nominales.	46
Tabla 3.3. Parámetros de las pruebas de vida acelerada en circuito “chopper”.48	
Tabla 3.4. Parámetros de las pruebas de vida acelerada en circuito IGBT simple.	50
Tabla 4.1. Voltajes de conducción para cada una de las pruebas en el circuito "chopper".	54
Tabla 4.2. Tiempos de falla de los dispositivos a diferentes niveles de corriente.55	
Tabla 4.3. Parámetros de la distribución de Weibull.	57
Tabla 4.4. Parámetros de linealización.	58

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente muchos fabricantes sienten una fuerte presión por desarrollar nuevos y mejores productos, que registren una alta duración, confiabilidad entre ellos y por supuesto una alta calidad [1,2]. La confiabilidad, la rentabilidad y las consideraciones de tiempo hasta el mercado juegan un papel importante en el diseño; la selección de materiales y decisiones de fabricación son los temas claves para competir en el mercado global [3,4].

Es por ello que muchas empresas manufactureras han decidido obtener datos de la confiabilidad de sus productos [5]; sin embargo, en ocasiones las pruebas realizadas para obtener dichos datos pueden ser muy largas y costosas. Es por eso que se buscan obtener datos de falla rápidamente y a un bajo costo [6]. En este caso es recomendable recurrir a uno de los primeros métodos para evaluar la confiabilidad, como lo son las pruebas de vida acelerada “ALT” (por sus siglas en inglés, *Accelerated Life Test*) [7].

Las pruebas de vida acelerada son un proceso esencial para determinar la alta confiabilidad de los productos. ALT es una gran técnica de confiabilidad en la cual los productos son sometidos a ambientes acelerados con el fin de encontrar rápidamente fallas en los componentes [8-12]. En este tipo de pruebas las variables de aceleración más usadas son: temperatura, humedad, voltaje, corriente [13]. Al someter un componente en ambientes de aceleración se obtendrán los mismos mecanismos de falla que cuando se utiliza a un nivel de estrés normal, la única diferencia es que las fallas ocurren más rápidamente [14]. Para extrapolar los datos de falla en condiciones aceleradas a condiciones normales es necesario hacer uso de los modelos de aceleración, y con ello poder demostrar la confiabilidad del componente [15-17].

El principal objetivo de tales pruebas es obtener datos rápidamente, los cuales, modelados adecuadamente y analizados, proporcionan información deseada sobre la vida de un producto bajo condiciones normales de uso [1].

La determinación de los límites de operación para los diferentes tipos de esfuerzos del producto son una parte importante para ALT. Algunas compañías no realizan pruebas de destrucción debido al alto costo de las unidades de prueba, por ejemplo, en productos aeroespaciales [18].

En este trabajo realizará el estudio de dos de los modelos de aceleración más empleados en el desarrollo de las pruebas de vida acelerada, en este caso en específico para los transistores bipolares de compuerta aislada “IGBT” (por sus siglas en inglés, *Insulated Gate Bipolar Transistor*), los cuales se utilizan en un sinnúmero de aplicaciones de electrónica, sobre todo en la electrónica de potencia, como por ejemplo en convertidores conmutados e inversores. Con respecto a los IGBT, las condiciones de operación de alta exigencia a las que son sometidos (vibraciones, golpes, condiciones térmicas y de humedad) tienden a reducir sus tiempos de vida y el compromiso de confiabilidad general del sistema.

1.1. PROPUESTA DE TESIS

1.1.1. Planteamiento del problema

En la mayoría de los sistemas, sobre todo en los sistemas electrónicos de potencia es importante conocer el tiempo en el que alguno de los dispositivos pueda presentar una falla, las cuales pueden presentarse debido a diferentes parámetros, como pueden ser: variaciones en la temperatura, incrementos en la corriente o el voltaje del dispositivo, humedad, vibraciones mecánicas, etc.

Debido a que generalmente se desconocen los tiempos en los que el dispositivo puede fallar ante las variaciones mencionadas anteriormente, se desarrollan las pruebas de vida acelerada, esto con el fin de obtener de una manera más rápida el tiempo en el que se presentan las fallas.

Para cada uno de los parámetros que afectan al dispositivo, existe un modelo de aceleración con el que se pueden extrapolar los datos de las pruebas de vida acelerada a condiciones nominales. Es por ello que en el desarrollo de este tema se pretende

realizar el estudio del modelo de aceleración de uno de los parámetros que más afectan a la vida del dispositivo, como lo es la corriente.

Con el estudio de éste modelo se pretende otorgar una metodología adecuada para el desarrollo de las pruebas de vida y la obtención del factor de aceleración de éstas con las pruebas en condiciones nominales.

1.1.2. Propuesta de solución

Con el fin de obtener los tiempos de falla más rápidamente de los dispositivos IGBT bajo el parámetro de corriente, se realizará el estudio de la metodología de las pruebas de vida acelerada, en las cuales se someten a los dispositivos IGBT a diferentes niveles de aceleración.

Se utilizará un plan estándar de las pruebas de vida acelerada en donde se variará la corriente de colector del dispositivo IGBT a niveles superiores a los que comúnmente trabaja. En primer lugar se realizarán pruebas a los dispositivos IGBT en condiciones nominales con una duración de 60 minutos, para comprobar que los dispositivos no presentarán falla dentro de ese periodo de prueba; después se realizarán las pruebas de vida acelerada en donde los niveles de esfuerzo se determinarán por pruebas hasta que el dispositivo falle antes de los 60 minutos de la duración de la prueba.

Los datos de falla obtenidos en condiciones aceleradas se analizarán mediante el software Minitab, en donde se propondrá que los datos de falla siguen una distribución de probabilidad de vida de Weibull, de acuerdo al manual militar MIL-HDBK-217F el cual menciona que los componentes electrónicos siguen dicha distribución. Por medio del software se obtendrán los parámetros de forma y escala de la distribución.

Para extrapolar los tiempos de falla de las pruebas de vida aceleradas a condiciones nominales es necesario utilizar un modelo de aceleración, en este caso para el esfuerzo en corriente se utiliza el modelo de ley de potencia inversa de Weibull.

Por medio de dicho modelo se obtiene el factor de aceleración de las pruebas de vida aceleradas con respecto a las pruebas en condiciones nominales y con ello es posible calcular el tiempo de falla del dispositivo en dichas condiciones.

1.1.3. Objetivos

1.1.3.1. Objetivo general

Como objetivo general se tiene el estudio de algunos métodos empleados en las pruebas de vida aceleradas, los modelos probabilísticos más usuales de éstas y finalmente poder aplicar uno de estos modelos a un conjunto de datos obtenidos en una prueba, la cual constará en la aceleración del parámetro de corriente y se aplicará a los dispositivos semiconductores de potencia, de manera particular a los dispositivos IGBT.

1.1.3.2. Objetivos específicos

- Diseño e implementación de una plataforma de pruebas de vida aceleradas.
- Obtención de los tiempos de falla de los dispositivos IGBT por medio de las pruebas de vida aceleradas.
- Obtención de la gráfica de la relación vida-esfuerzo del componente bajo prueba.
- Obtención de los parámetros de escala (α) y de forma (β) de la distribución de probabilidad de Weibull de acuerdo a los tiempos de falla del dispositivo.
- Cálculo del factor de aceleración de las pruebas por medio del modelo de ley de potencia inversa de Weibull.

1.1.4. Alcances y limitaciones

1.1.4.1. Alcances

Se requiere realizar un estudio profundo de los conceptos de pruebas de vida acelerada, modelos de aceleración, tipos de fallas, tiempo medio a fallas, entre otros;

para poder abordar el tema de la mejor manera posible y que el desarrollo de éste sea el adecuado.

Se construirá un circuito de prueba, en donde se someterá al dispositivo IGBT a niveles de corriente superiores a los que maneja nominalmente, pero sin llegar a niveles de destrucción. Se estarán monitoreando algunas variables del dispositivo, como lo son el voltaje colector-emisor, el voltaje de conducción, y la corriente del colector durante el tiempo de prueba establecido o hasta que el dispositivo falle.

Se analizarán los datos obtenidos de las pruebas de vida aceleradas por medio de los modelos de aceleración que se componen de la relación vida-esfuerzo y de una distribución de probabilidad de vida. Con dicho análisis se determinará el factor de aceleración para las condiciones nominales y con ello poder obtener el tiempo en el que los dispositivos pueden llegar a fallar bajo dichas condiciones.

1.1.4.2. Limitaciones

Debido a la cantidad de dispositivos IGBT disponibles para la realización de las pruebas, los cuales son pocos, el único parámetro de aceleración será la corriente. La poca cantidad de dispositivos también influirá en el tamaño de la muestra de las pruebas, es decir en el número de componentes que se someterán bajo el mismo nivel de esfuerzo, esto para ajustar adecuadamente el modelo de aceleración con la distribución de probabilidad de vida adecuada.

1.1.5 Metodología

A continuación, se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del presente proyecto de tesis.

En la figura 1.1 se muestra la metodología de solución propuesta para el proyecto de tesis, la cual se divide en cinco etapas fundamentales que permitirán poder conseguir el objetivo del proyecto de la mejor manera.



Figura 1.1. Metodología de solución.

Como primer paso, se propuso el estudio de la problemática en donde se requiere de la realización de una profunda investigación mediante el apoyo de artículos, libros, tesis y páginas web, para la comprensión del tema y con ello buscar las soluciones posibles.

El segundo paso es el desarrollo de la estrategia de solución, en donde se elige una de las posibles soluciones analizadas previamente, y se propone la mejor de éstas. En esta parte se estudiarán las necesidades del proyecto y se determinarán los conceptos a utilizar para la resolución de éstas. Es aquí en donde se desarrolla todo el plan de las pruebas de vida aceleradas; esto es la elección de los componentes, determinar los parámetros en los que se probará el dispositivo IGBT en condiciones nominales, la duración de la prueba bajo dichas condiciones y bajo condiciones aceleradas, además de determinar los niveles de aceleración de corriente del dispositivo.

El tercer paso es implementar la estrategia de solución, esto es la construcción de la plataforma de pruebas de vida aceleradas, compuesta por el circuito prueba y los equipos necesarios para el monitoreo de las señales del dispositivo IGBT durante el desarrollo de las pruebas. En esta parte también se podrán realizar simulaciones de las pruebas.

El cuarto paso es el desarrollo de las pruebas de vida aceleradas, en donde se ejecutará todo lo desarrollado anteriormente. En esta parte se realizarán las pruebas en condiciones nominales y en condiciones aceleradas. Se monitorearán las señales de corriente, voltaje colector-emisor y voltaje de conducción del dispositivo IGBT, además del tiempo de la prueba hasta que ocurra la primera falla. Dichos datos se almacenarán y se analizarán por medio del software Minitab, y con ello obtener los parámetros necesarios para poder extrapolar los tiempos de falla en condiciones aceleradas a condiciones nominales.

El quinto y último paso es el análisis del desarrollo total del proyecto, del cual se podrán obtener las conclusiones pertinentes y se podrán definir los trabajos a futuro para la mejora del mismo.

1.2. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

A continuación, se presenta de una manera muy breve el contenido del presente trabajo de tesis, el cual está comprendido por cinco capítulos que pretenden explicar a detalle toda la información relevante del proyecto.

Capítulo 1: En este apartado se pretende dar una pequeña introducción del proyecto, en donde se explica la importancia de ALT y en los sistemas y dispositivos electrónicos, la problemática a resolver, los objetivos del proyecto, los alcances y limitaciones, y la metodología de solución.

Capítulo 2: Se muestran de una manera muy general los conceptos teóricos necesarios para el desarrollo del presente proyecto de tesis, además de la presentación del estado del arte en donde se muestran algunos de los artículos relacionados con éste tema y que serán de gran ayuda para la comprensión y desarrollo del mismo. Cabe mencionar que este apartado tiene una gran importancia, debido a que los conceptos y la información de los artículos, son la base del desarrollo del proyecto.

Capítulo 3: En este apartado se muestran los pasos que se seguirán para el desarrollo del proyecto, como lo es el plan de prueba, el desarrollo y construcción del circuito de prueba; y la implementación de las pruebas de vida aceleradas.

Capítulo 4: En este apartado se muestran los resultados de las pruebas de vida aceleradas, así como el análisis de los datos y la obtención de los parámetros de los modelos de aceleración.

Capítulo 5: En este apartado se dan a conocer las conclusiones del proyecto de tesis, en donde se expondrán todas las situaciones presentes en el proyecto que lograron que éste pudiese concluirse, además de los trabajos futuros.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

En la siguiente sección se presentarán los conceptos relacionados con el desarrollo del presente tema de tesis, además de la revisión del estado del arte en donde se presentan los artículos y libros que abordan sobre el tema y que serán de gran ayuda para el desarrollo del mismo.

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Confiabilidad

Hoy en día existen diferentes definiciones sobre el concepto de confiabilidad, alguna de las definiciones más comunes es aquella que dice que es un índice definido a partir de la capacidad de que un dispositivo pueda llevar a cabo funciones en condiciones específicas durante un tiempo determinado.

Sin embargo, desde el punto de vista ingenieril, la confiabilidad se define como la probabilidad de que un dispositivo funcione satisfactoriamente durante un tiempo dado, siempre que dicho dispositivo funcione bajo unas condiciones definidas previamente [17,19].

La función de confiabilidad $R(t)$ está dada por la ecuación (2.1).

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (2.1)$$

donde:

t = tiempo

λ = tasa de fallos

2.1.2. Concepto de falla

Cuando un sistema o dispositivo deja de realizar la función para el cual fue diseñado, se dice que éste ha entrado en condición de falla, es decir, las fallas se

definen como la incapacidad de que un dispositivo o sistema pueda llevar a cabo la función para la cual fue adquirido en ciertas condiciones definidas.

Las fallas de los componentes se deben a los esfuerzos a los que son sometidos durante su funcionamiento. Estos factores que influyen en la falla de los dispositivos se pueden dividir en dos: esfuerzos ambientales y esfuerzos operativos. Los esfuerzos ambientales naturales se deben a la influencia que provocan agentes ambientales externos como la temperatura, humedad, presión, etcétera. Los esfuerzos operativos son aquellos factores que afectan el funcionamiento del dispositivo, como, por ejemplo: la tensión, corrientes, potencia, o calor disipado [17].

Las fallas se clasifican en tres tipos: fallas abruptas, fallas incipientes y fallas intermitentes.

2.1.2.1. Falla abrupta

Se manifiesta con un cambio repentino, fuera de los límites de operación nominal (LON), y puede ser modelada mediante una función tipo escalón donde se desconoce el tiempo de ocurrencia (figura 2.1).

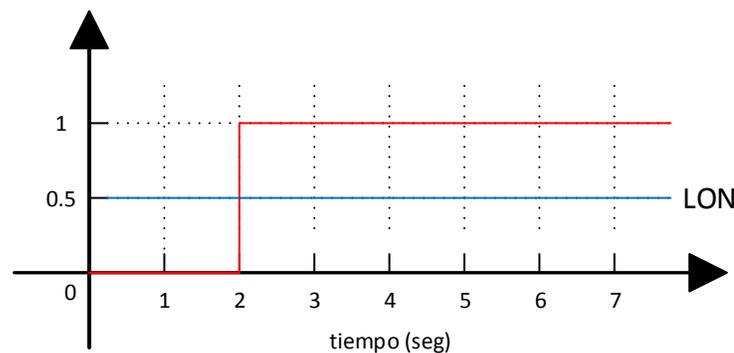


Figura 2.1. Falla abrupta.

2.1.2.2. Falla incipiente

Se manifiesta como un cambio en magnitud, fuera de los límites de operación nominal (LON), en las variables del sistema que va aumentando paulatinamente con

respecto al tiempo y puede modelarse mediante una función tipo rampa con un tiempo de ocurrencia desconocido (figura 2.2).

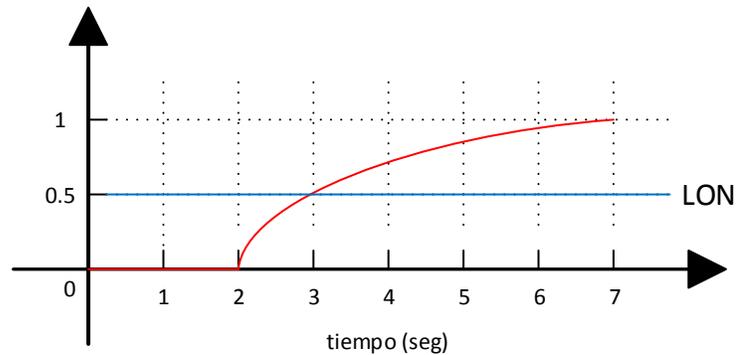


Figura 2.2. Falla incipiente.

2.1.2.3. Falla intermitente

Se considera que no tiene una evolución determinada en el tiempo y frecuentemente se presenta solamente en ciclos de trabajo de manera aleatoria y desaparece también de la misma forma (figura 2.3).

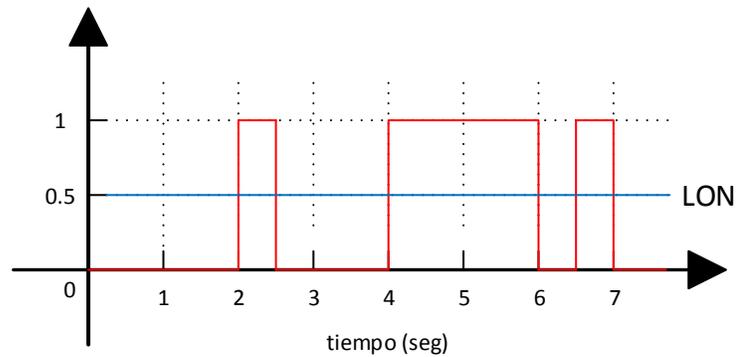


Figura 2.3. Falla intermitente.

2.1.3. Tasa de fallos

Esta función representa la probabilidad instantánea, por unidad de tiempo, que tiene un componente de fallar en un instante t , dado que había funcionado hasta el instante anterior [20]. Analíticamente se expresa por la ecuación (2.2)

$$\lambda = \frac{F}{t} = \frac{1 \text{ falla}}{1,000,000,000 \text{ horas}} = 1 \text{ FIT}, \quad (2.2)$$

donde:

F = número total de fallas

t = total de horas de operación

La curva de riesgo representa la tasa de fallo instantánea de una población de elementos idénticos bajo esfuerzos constantes idénticos (figura 2.4). La curva de riesgo es un diagrama compuesto que proporciona una referencia para identificar y relacionar todas las fases de la vida de un elemento o producto [18,21].

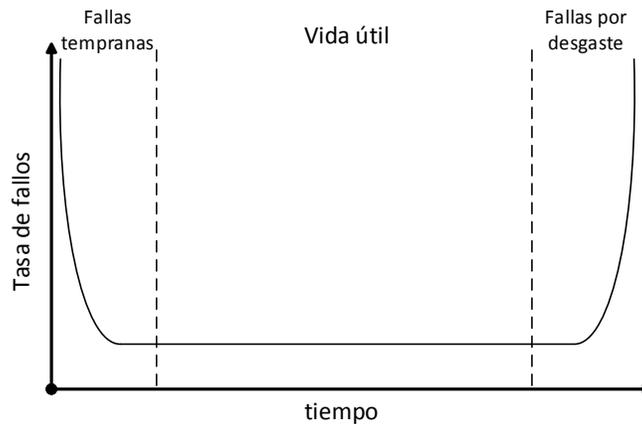


Figura 2.4. Curva de la bañera.

En la teoría de confiabilidad se manejan dos categorías de sistemas: los reparables y los no reparables. Los sistemas reparables son aquellos que al presentar falla pueden ser restaurados para continuar con la operación, mientras que los sistemas no reparables al momento de fallar tienen que ser reemplazados por un dispositivo del mismo tipo para continuar con la tarea desempeñada [5, 22, 23].

A la función de distribución de tasa de fallos de los sistemas no reparables se le conoce como "curva de bañera". La primera sección de la curva es la probabilidad de que ocurran fallas en una etapa temprana de vida y representa el fenómeno de mortalidad infantil (MI), estas fallas se atribuyen por lo general a errores de manufactura o diseño. La segunda sección representa la probabilidad de falla por uso

común del dispositivo. La tercera sección de la curva es la probabilidad de falla por obsolescencia o vejez [5].

2.1.4. Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF)

El tiempo medio entre fallas se puede utilizar como medida de confiabilidad. Éste término es el inverso a la tasa de fallos. El MTBF indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de una falla [24] (figura 2.5); es decir, es el tiempo medio transcurrido hasta la llegada del evento “falla”. Mientras mayor sea su valor, mayor es la confiabilidad del componente o equipo. La relación del MTBF se muestra en la ecuación (2.3).

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (2.3)$$

La confiabilidad en términos del MTBF se muestra en la ecuación (2.4).

$$R(t) = \exp(-\lambda t) = \exp\left(-\frac{t}{MTBF}\right) \quad (2.4)$$

2.1.5. Tiempo Medio a Fallas (MTTF)

Este término se encarga de medir el tiempo promedio en el cual el producto es capaz de operar sin interrupciones, es decir que se encarga de indicar el tiempo medio al que ocurre la primera falla [24] (figura 2.5). Éste término constituye un indicador indirecto de confiabilidad. La relación del MTTF se muestra en la ecuación (2.5).

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n} \quad (2.5)$$

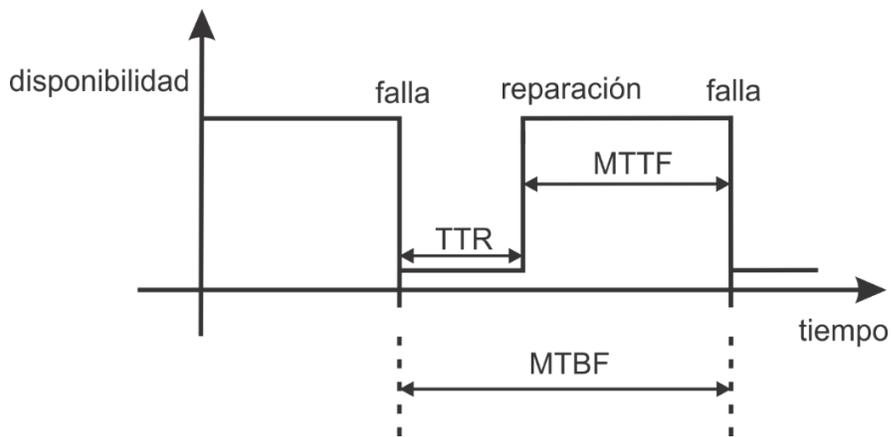


Figura 2.5. Tiempo medio a fallas y tiempo medio entre fallas.

2.1.6. Funciones de distribución de fallas

Para aplicar el modelo de confiabilidad mostrado en la ecuación (2.1) es necesario manejar algunas funciones estadísticas de distribución. Estas funciones se ajustan mejor en los problemas de confiabilidad. Entre las más usadas se encuentran las distribuciones: exponencial, normal Weibull, gamma, log-normal, etcétera.

Cada una de las funciones está caracterizada por su función de densidad de probabilidad, a partir de la cual se pueden obtener las funciones y parámetros empleados en la ingeniería de confiabilidad. Todas las funciones estadísticas están caracterizadas por uno o varios parámetros. Dentro de estos parámetros se pueden destacar, el parámetro de escala, el parámetro de forma y el parámetro de origen [17].

➤ Parámetro de escala

Este parámetro es el más común, debido a que todas las distribuciones suelen tenerlo. El parámetro de escala representa la vida característica, en la mayoría de las distribuciones coincide con la vida media, sin embargo, en la distribución de Weibull esto no sucede.

➤ **Parámetro de forma**

Este parámetro ayuda a definir la forma de una distribución, es decir, que le dan forma a la función de densidad de probabilidad, de fiabilidad y la función de la tasa de fallos de las distribuciones.

2.1.6.1. Estimación de los parámetros de las distribuciones

Las leyes de la vida de los componentes se estiman mediante métodos estadísticos a partir de los datos de los tiempos de falla, estos se obtienen de las pruebas de vida de los componentes o equipos [17]

A continuación, se presentan las distribuciones más usadas para el análisis de confiabilidad.

2.1.6.1.1. Distribución exponencial

Esta distribución se utiliza para modelar los tiempos de falla que presentan una tasa de fallos constante, es decir, que la probabilidad de que ocurra una falla no varía con el tiempo.

Función de densidad

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (2.6)$$

Función de distribución

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (2.7)$$

Función de confiabilidad

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (2.8)$$

2.1.6.1.2. Distribución normal

La distribución normal es una de las distribuciones más utilizadas en confiabilidad, debido a que muchas fallas tienden a distribuirse a una vida media de desgaste, con una curva de densidad en forma de campana. A esta distribución también se le suele llamar distribución de Gauss. La mayoría de los componentes mecánicos y electromecánicos fallan principalmente por desgaste, haciendo de esta distribución la ideal para determinar la confiabilidad de dichos componentes.

Función de densidad

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (2.9)$$

Función de distribución

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(x)dx = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (2.10)$$

Función de confiabilidad

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right) dx = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (2.11)$$

2.1.6.1.3. Distribución de Weibull

Esta distribución es muy utilizada en confiabilidad debido a su versatilidad para modelos tiempos de falla que presentan una tasa de fallos que no es constante. La distribución de Weibull se define a partir de dos parámetros: el parámetro de escala y el parámetro de forma [25].

Función de densidad

$$f(t) = \alpha\beta(\alpha t)^{\beta-1} \exp(-\alpha t)^\beta \quad (2.12)$$

Función de distribución

$$F(t) = 1 - \exp(-\alpha t)^\beta \quad (2.13)$$

Función de confiabilidad

$$R(t) = \exp(-\alpha t)^\beta \quad (2.14)$$

2.1.6.1.3.1. Estimación de los parámetros de la distribución Weibull

Los métodos analíticos más utilizados para evaluar los parámetros de la distribución de Weibull son el método de mínimos cuadrados y el método de máxima verosimilitud, ambos se pueden realizar mediante herramientas software estadísticas, o incluso en programas más generales como hojas de cálculo [17].

El método de máxima verosimilitud permite estimar los parámetros de forma analítica, como el método de mínimos cuadrados, pero con la ventaja de que se puede aplicar a ensayos censurados y no censurados. De acuerdo a [26] y [27] este método se considera el más adecuado para el análisis de datos de tiempos de vida de dispositivos electrónicos [17].

2.1.7. Pruebas de vida acelerada

Con el fin de conocer el tiempo de vida de un sistema o componente, se analizan los tiempos de falla de éstos, sin embargo, en muchas ocasiones los datos de falla son muy difíciles de obtener debido a que el tiempo de vida del producto es muy largo en condiciones normales. Es por ello, para resolver estas dificultades, se han tratado de diseñar métodos que ocasionan fallas más rápidamente, como lo son las pruebas de vida acelerada [28].

Las pruebas de vida aceleradas implican la aceleración de las fallas con el objetivo de cuantificar las características de vida de un sistema o componente en condiciones

normales de uso. Esto porque se requiere que los datos de falla estén disponibles en un corto espacio de tiempo.

Las pruebas de vida acelerada consisten en someter a los componentes a condiciones de operación superiores a las condiciones normales, consiguiendo de esa manera acelerar el desgaste del componente y la reducción del tiempo de vida del mismo. Los resultados de éstas pruebas se adaptan a las condiciones normales de uso.

Regularmente los parámetros de aceleración suelen ser esfuerzos eléctricos, mecánicos o ambientales, como lo son la temperatura, el voltaje, la corriente, vibraciones mecánicas, presión, húmedas, etcétera. El incremento de uno de estos parámetros provoca que los tiempos de falla sean menores a los tiempos de falla en condiciones normales.

Las pruebas de vida acelerada se pueden dividir en dos tipos: pruebas de vida acelerada cuantitativas y pruebas de vida acelerada cualitativas. A continuación, se describen estos dos tipos.

2.1.7.1. Pruebas de vida acelerada cualitativas

Las pruebas cualitativas se realizan en pequeñas muestras sometidas a un único nivel grande de esfuerzo, a una serie de esfuerzos o a un tiempo de variación de esfuerzo. Si la muestra sobrevive pasa la prueba, de lo contrario se tomarán las decisiones apropiadas para mejorar el diseño del producto con el fin de eliminar la causa de la falla [8].

En general, los ensayos cualitativos no cuantifican las características de vida, o confiabilidad, del producto en condiciones normales de uso, sin embargo, proporcionan información valiosa sobre el tipo y nivel de esfuerzo que se puede emplear durante pruebas cualitativas posteriores [8].

2.1.7.2. Pruebas de vida acelerada cuantitativas

Las pruebas cuantitativas tienen como objetivo obtener información evaluable sobre las características de vida del producto, es decir, cuantificar precisamente la confiabilidad del producto en condiciones normales. Normalmente la forma de la prueba se basa en someter a condiciones de esfuerzo a los componentes para descubrir el tiempo de falla del mismo, sin embargo, los esfuerzos deben estar dentro de los límites de diseño, es decir, sin llegar a los límites de destrucción [8] (figura 2.6).

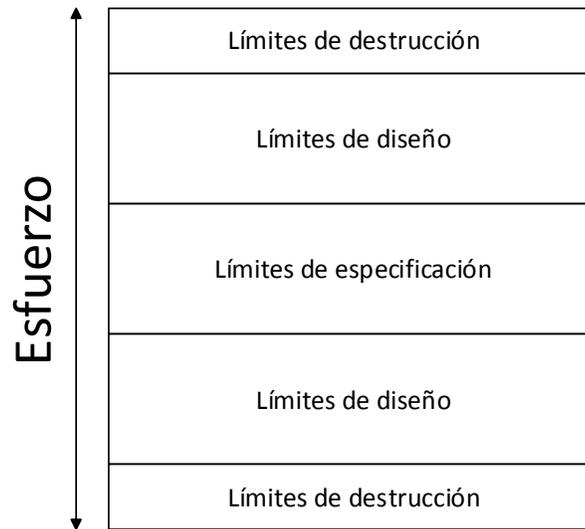


Figura 2.6. Tipos de límites del producto.

El incremento de los parámetros en las pruebas puede ser escalonado o constante. El método más utilizado es el de aceleración constante en donde se somete al componente a un nivel de esfuerzo constante.

Cuando se supone aceleración constante se tiene la relación de la ecuación (2.15) para los tiempos de falla.

$$t_0 = \epsilon t_\epsilon \quad (2.15)$$

En donde t_0 es el tiempo de falla en condiciones normales, ϵ es el factor de aceleración constante y t_ϵ es el tiempo de falla en condiciones de estrés.

A continuación, se presenta la función de confiabilidad para cada uno de las distribuciones de confiabilidad, a partir de la estimación bajo condiciones aceleradas con factor de aceleración.

Distribución Weibull

$$R(t) = \exp\left(-\frac{\alpha}{\epsilon} t\right)^B \quad (2.16)$$

Distribución exponencial

$$R(t) = \exp\left(-\frac{\lambda}{\epsilon} t\right) \quad (2.17)$$

Distribución normal

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - \epsilon\mu}{\epsilon\sigma}\right) \quad (2.18)$$

Para determinar el factor de aceleración se utilizan modelos de aceleración, que usan los datos de falla obtenidos en condiciones aceleradas. Éstos suponen que el tiempo de falla es una función del estrés aplicado y otros valores constantes.

Los modelos de aceleración más utilizados son: Modelo de Arrhenius, Modelo de Eyring y Ley de Potencia Inversa [16].

2.1.7.3. Modelos de pruebas de vida acelerada con estrés constante

A continuación, se presentan tres modelos típicos de pruebas de vida acelerada con estrés constante, en donde a partir de los datos de falla de los dispositivos en condiciones aceleradas, se puede determinar un nivel de confiabilidad del dispositivo en condiciones normales de uso.

La relación entre el estrés y el tiempo de vida hasta la falla puede transformarse en una relación lineal entre el esfuerzo y el logaritmo del tiempo.

Los modelos de pruebas de vida acelerada tienen los siguientes dos componentes: una distribución de vida que representa la dispersión de la vida del producto y una relación vida-esfuerzo. Cuando el tiempo de la prueba se especifica y alguna de las unidades no han fallado hasta ese momento, se dice que están censuradas o que se tienen datos censurados por la derecha.

En la figura 2.7 se muestra una gráfica de relación vida-esfuerzo en donde los datos en los que se presenta la falla después del tiempo establecido para la prueba (línea roja de la figura 2.7), o simplemente no tuvieron falla, se les llama datos censurados por la derecha.

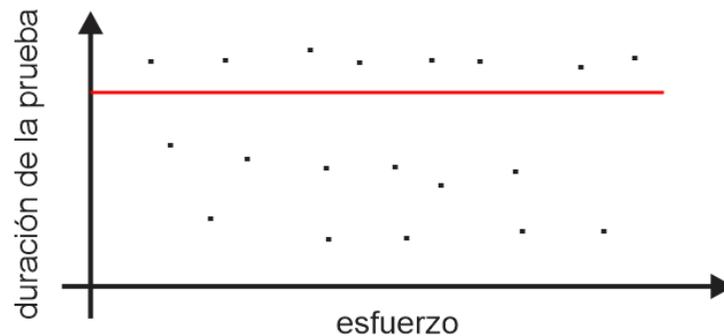


Figura 2.7. Relación vida-esfuerzo.

2.1.7.3.1. Modelo de Arrhenius

Una forma muy habitual de acelerar la vida de un producto es aumentando la temperatura en la que éste se encuentra operando. Para extrapolar los resultados de las pruebas de vida acelerada a temperatura nominal el modelo más utilizado es el de Arrhenius, el cual está basado en la ley que desarrolló el científico sueco Svante August Arrhenius y que lleva su nombre [17].

El modelo de Arrhenius se representa por la ecuación (2.19).

$$t_p = A \exp\left(\frac{c}{temp}\right) \quad (2.19)$$

Para linealizar la ecuación (2.19) y así poder conocer sus constantes A y c se toman logaritmos en los dos miembros de la ecuación, quedando entonces como se muestra en la ecuación (2.20).

$$\ln(t_p) = \frac{c}{temp} + \ln(A) \quad (2.20)$$

Las constantes A y c se calculan por el método de regresión lineal a partir de los datos de las pruebas de vida acelerada.

Este modelo es muy utilizado, sobre todo en el sector eléctrico en donde muchos de los componentes tienden a fallar debido al aumento de la temperatura.

2.1.7.3.2. Modelo de Eyring

Este modelo se utiliza cuando existen varios factores que aceleran las fallas. Uno de estos factores siempre es la temperatura, mientras que los otros pueden ser el campo eléctrico, el voltaje, la humedad, el estrés mecánico, la corriente eléctrica, etc. Dos factores comúnmente usados son la temperatura y la humedad [16].

La forma simple del modelo de Eyring, donde solo se consideran dos factores, temperatura y voltaje, se caracteriza por la ecuación (2.21).

$$t_p = a \exp\left(\frac{b}{temp}\right) V^{-c} \quad (2.21)$$

Para linealizar la ecuación (2.21) y así poder conocer sus constantes a , b y c se toman logaritmos en los dos miembros de la ecuación, quedando entonces como se muestra en la ecuación (2.22).

$$\ln(t_p) = \ln(a) + \frac{b}{temp} + c(-\ln(V)) \quad (2.22)$$

En la ecuación (2.22) se observa que es de la forma $y = a + bx_1 + cx_2$. Eso quiere decir que a diferencia de la ecuación (2.20), ahora se tienen dos variables independientes. Es por ello que para obtener los parámetros de las constantes a , b y c se utiliza el método de regresión lineal múltiple.

2.1.7.3.3. Ley de Potencia Inversa

Este modelo se usa de forma común para pruebas con esfuerzo en potencia, tensión o corriente, y supone que la vida del componente o dispositivo es inversamente proporcional al esfuerzo aplicado. La ecuación característica de este modelo se presenta en la ecuación (2.23).

$$t_p = \frac{K}{V^N} \quad (2.23)$$

La forma linealizada del modelo que nos permitirá encontrar los valores de las constantes K y N se muestra en la ecuación (2.24).

$$\ln(t_p) = \ln(K) - N \ln(V) \quad (2.24)$$

2.1.7.3.3.1. Ley de Potencia Inversa de Weibull

Este modelo considera que la ley de distribución de vida sigue una distribución de Weibull y que la influencia del esfuerzo en la ley de vida sigue una ley de potencia inversa. Este modelo se utiliza principalmente en dispositivos electrónicos, en donde según el manual militar MIL-HDBK-217F, estos componentes siguen una distribución de probabilidad de Weibull.

Este modelo considera que:

1. Para cualquier nivel de esfuerzo, la vida del producto sigue una distribución de Weibull.
2. El parámetro de forma de Weibull es una constante independiente del esfuerzo.
3. La vida característica de Weibull es una función potencial del esfuerzo aplicado.

De esta manera la ecuación (2.23) con la distribución de Weibull se expresa como la ecuación (2.25).

$$\alpha(V) = \frac{K}{V^N} \quad (2.25)$$

Linealizando la ecuación (2.25), para obtener los valores de K y N se utilizan logaritmos en ambos lados de la ecuación obteniendo la ecuación (2.26).

$$\ln(\alpha(V)) = \ln(K) - N \ln(V) \quad (2.26)$$

Debido a que la ecuación (2.26) es de la forma $y = mx + b$, se calculan los valores de las constantes K y N por medio del método de regresión lineal a partir de los datos de falla de las pruebas de vida acelerada.

2.2. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se presentan los principales artículos relacionados con el presente trabajo de investigación.

En el artículo [1] se emplean las pruebas de vida acelerada en confiabilidad. Se explican los requerimientos de las pruebas, tales como la relación vida-esfuerzo (figura 2.8), el modelo estadístico (en este caso el modelo de Arrhenius log normal), el análisis de datos (método de máxima verosimilitud), y el ajuste del modelo.

Las pruebas de vida acelerada fueron aplicadas a diez motores, los cuales fueron probados cada uno a cuatro temperaturas, 150°C, 170°C, 190°C y 220°C. El objetivo de la prueba es estimar la distribución de vida de un diseño de motores a temperatura de 130°C.

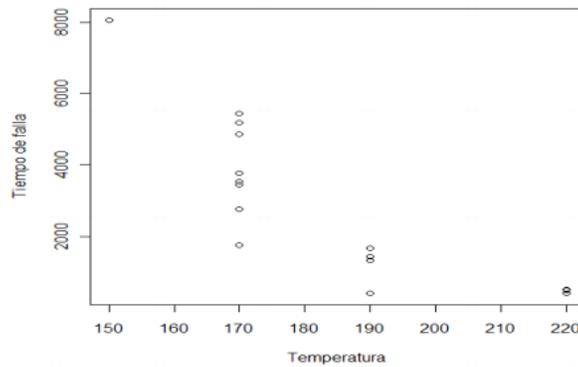


Figura 2.8. Relación vida-esfuerzo [1].

Tabla 2.1. Tiempos de falla de los capacitores [1].

150 ° C	170 ° C	190 ° C	220 ° C
8064+	1764	408	408
8064+	2772	408	408
8064+	3444	1344	504
8064+	3542	1344	504
8064+	3780	1440	504
8064+	4860	1680+	528+
8064+	5196	1680+	528+
8064+	5448+	1680+	528+
8064+	5448+	1680+	528+
8064+	5448+	1680+	528+

Al tiempo del análisis, siete motores a 170°C tuvieron falla, cinco a 190°C y 220°C tuvieron falla, mientras que ninguno de los motores falló a 150°C. El signo + en la tabla 2.1 indica aquellos motores que no fallaron antes de que terminara el estudio. Los motores fueron periódicamente analizados por fallas y el tiempo de falla que se muestra en la tabla es el punto final del periodo en el cual la falla ocurrió.

En el artículo [5] se presenta el estudio de confiabilidad en lámparas automotrices, en dónde el objetivo es determinar la factibilidad de detectar la probabilidad de falla en etapas tempranas de uso (mortalidad infantil) en bulbos eléctricos de lámparas automotrices. Se describen los experimentos utilizados para establecer las correlaciones entre la vida útil a niveles de operación como en las pruebas de vida acelerada.

Las pruebas se realizaron a 5 bulbos de un mismo lote, los cuales están diseñados para funcionar a un voltaje de 12 V y consumen 0.36 miliAmperes cada uno. Para ejecutar las pruebas de vida acelerada se utilizó el 150% del voltaje nominal.

Dado que el tiempo de falla presentado por los bulbos es relativamente corto se ejecutaron 8 réplicas de las pruebas, es decir en 40 bulbos. Los valores de pendiente, corriente promedio y vida útil se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valores de corriente promedio, pendiente y vida útil de los bulbos en las pruebas de vida acelerada [5].

bloque	Bulbo	Corriente promedio (A)	Pendiente(mA/Seg)	Vida util(Min)
1	1	0.363	-0.533	173
1	2	0.361	-0.621	165
1	3	0.360	-0.461	171
1	4	0.359	-0.274	188
1	5	0.362	-0.253	202
2	6	0.363	-0.128	148
2	7	0.362	-0.664	128
2	8	0.370	-0.589	115
2	9	0.366	-0.374	85
2	10	0.363	-0.599	195
3	11	0.360	-0.310	230
3	12	0.357	-0.732	160
3	13	0.363	-0.090	165
3	14	0.363	0.001	115
3	15	0.364	-0.410	155
4	16	0.361	-0.488	180
4	17	0.369	-0.310	120
4	18	0.365	-0.264	131
4	19	0.361	-0.383	135
5	21	0.366	-0.638	120
5	22	0.357	-0.592	130
5	23	0.361	0.000	139
5	24	0.358	-0.524	135
5	25	0.360	-0.549	127
6	26	0.361	-0.553	225
6	27	0.359	-0.025	230
6	28	0.366	-0.638	140
6	29	0.362	-0.416	195
6	30	0.368	-0.111	148
7	31	0.361	0.000	190
7	32	0.364	-0.174	230
7	33	0.362	-0.665	130
7	34	0.366	-0.537	155
7	35	0.360	-0.612	200
8	36	0.365	-0.342	145
8	37	0.362	-0.527	195
8	38	0.361	-0.632	205
8	39	0.366	-0.281	125
8	40	0.366	-0.652	115

En los resultados se verificó que la corriente promedio afecta significativamente a la vida útil. Se generó un modelo de regresión lineal únicamente incluyendo el valor de la corriente promedio.

Se muestra un histograma de tiempo de falla para las pruebas que acusa una distribución lognormal con parámetro de localización = 5.057 y de escala = 0.241 (figura 2.9), además de la gráfica de probabilidad acumulada (figura 2.10)

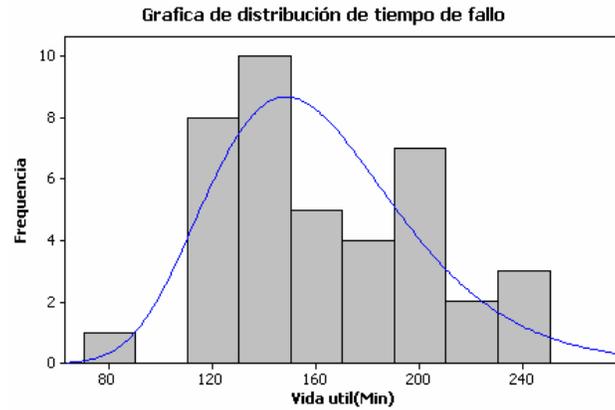


Figura 2.9. Histograma de tiempo de falla de las pruebas de vida acelerada [5].

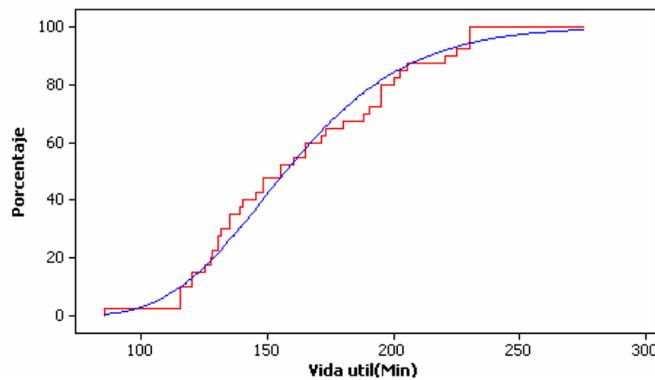


Figura 2.10. Gráfica de distribución de tiempo de falla de las pruebas de vida acelerada [5].

En el artículo [13] se realizan pruebas de vida acelerada en capacitores, los cuales son sometidos a altas temperaturas. Se utilizaron tres celdas cada una con cuarenta elementos. Las temperaturas a las que fueron sometidos son 80°C, 100°C, y 120°C (tabla 2.3). Una vez obtenidos los tiempos de falla, realizaron una tabla de frecuencias en donde agrupan los datos en intervalos de tiempo estándar para un esquema de monitoreo, la tabla de frecuencias se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.3. Temperatura y tiempos de falla en horas [8].

°C	Horas	°C	Horas	°C	Horas	°C	Horas
80	91	100	199	120	81	120	213
80	134	100	213	120	113	120	258
80	397	100	277	120	126	120	277
80	408	100	277	120	128	120	303
80	475	100	359	120	134	120	314
80	410	100	459	120	160	120	338
80	935	100	472	120	107	120	343
80	1411	100	545	120	113	120	375
100	20	100	605	120	130	120	377
100	21	100	622	120	153	120	457
100	46	100	864	120	159	120	467
100	52	100	897	120	170	120	474
100	95	100	924	120	183	120	500
100	105	100	978	120	183	120	544
100	134	100	994	120	183	120	696
100	144	100	1005	120	184	120	1162
100	153	100	1050	120	191	120	1372
100	158	100	1238	120	191		
100	166	120	8	120	203		
100	173	120	17	120	210		

Tabla 2.4. Distribución de frecuencias de las fallas [8].

Lectura	80°C	100°C	120°C
0-24	0	2	2
24-72	0	2	6
72-168	2	7	5
168-300	0	5	12
300-500	4	3	10
500-750	0	3	2
750-1000	1	5	0
1000-1250	0	3	1
1250-1500	1	0	1
Fallas	8	30	39

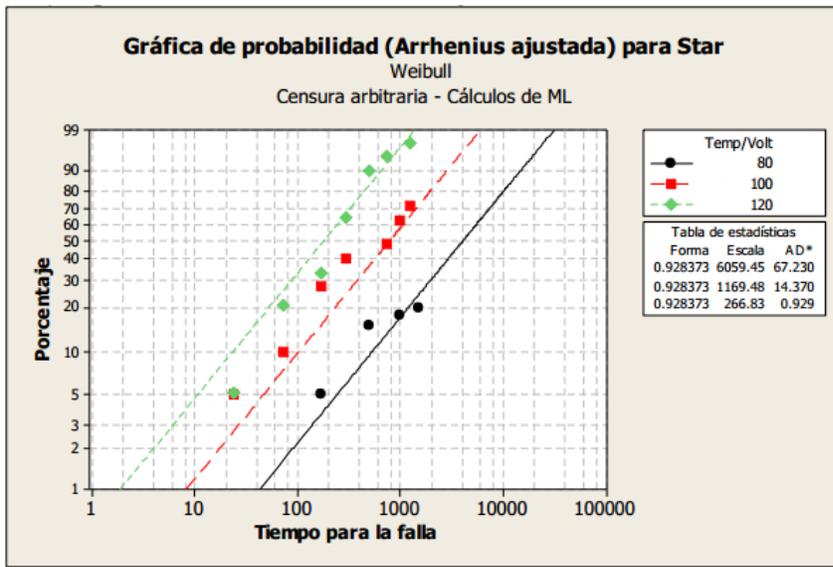


Figura 2.11. Gráfica de probabilidad de Weibull [8].

En la Figura 2.11 se presenta la gráfica de probabilidad obtenida del software Minitab con los datos obtenidos en la prueba, los cuales seguían una distribución de Weibull. Se obtuvieron los parámetros de la distribución de Weibull aplicada en la prueba para después llegar al modelo utilizado de Arrhenius-Weibull.

En el artículo [15] se desarrolla un plan de prueba para las pruebas de vida acelerada en el sensor “*knock*” de la industria Continental Juárez planta 1. El objetivo principal de dicho trabajo es estimar el tiempo de vida garantizado por el fabricante mediante el uso de herramientas estadísticas; para ello se apoyan de las pruebas de vida acelerada y de cuatro programas computacionales que ayudan al análisis de los datos obtenidos de las pruebas.

Para el análisis de datos típicos de vida usan distribuciones estadísticas, una distribución de vida que describe los tiempos de falla del producto. Además, muestran algunos modelos de las relaciones vida-esfuerzo: la relación de Arrhenius para la temperatura y la relación de potencia inversa para los esfuerzos en voltaje.

La metodología utilizada para el plan de pruebas de vida acelerada es la siguiente:

1. Cálculo del tamaño de la muestra
2. Determinación del estrés que afecta la vida del sensor
3. Determinación de los niveles de prueba del estrés
4. Estimación de la fracción de falla del sensor
5. Estimación de los percentiles de interés
6. Análisis de los resultados para validar el plan de prueba

En la referencia [29] se tiene un apartado de pruebas de vida acelerada, en donde se explican dos modelos típicos de estrés constante, el de Arrhenius y el de la potencia inversa de Weibull.

En la introducción se menciona que las pruebas de vida acelerada pueden usarse tanto para evaluar la capacidad de un componente para satisfacer los requisitos de fiabilidad como para tener un medio más rápido de detectar debilidades potenciales o modos de falla. Las pruebas de vida acelerada con fines de valoración se restringen a las piezas y los componentes, de los cuales se conocen las relaciones entre las tasas de falla en condiciones normales y de estrés. Un requisito importante es que las condiciones de estrés no puedan introducir nuevos modos de falla.

Posteriormente se presentan los modelos de prueba de vida acelerada con estrés constante, el de Arrhenius y el de la ley de potencia inversa, los cuales se componen principalmente de dos factores:

- Una distribución de probabilidad (exponencial, Weibull, etc.) que describe la variabilidad de la vida del dispositivo de una unidad a otra.
- Una relación entre el estrés y la vida. Esta relación se tiene que materializar, con el fin de que sea operativa en una ecuación matemática que relacione el estrés con un parámetro de posición de la distribución del tiempo de fallo.

Utilizan un ejemplo para mostrar el procedimiento para calcular los valores de las constantes K y N que se vieron en la ecuación (2.23). En primer lugar muestran los

tiempos de falla de su sistema a siete diferentes voltajes (figura 2.12); de los cuales se obtienen los parámetros α y β de Weibull por máxima verosimilitud mediante el software Minitab. De los parámetros obtenidos calcularon la relación lineal entre $\ln(V)$ aplicado y $\ln(\alpha)$ y mediante la regresión lineal se obtienen los valores de las constantes K y N de la ecuación (2.23).

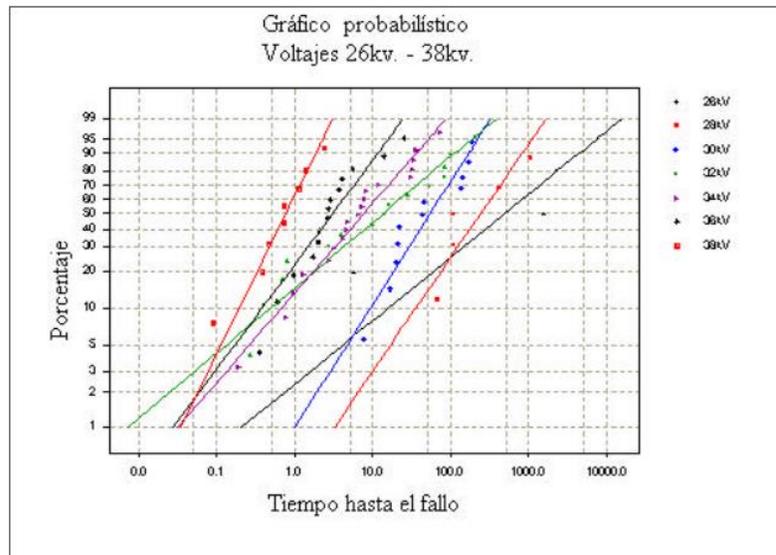


Figura 2.12. Gráfica de probabilidad de Weibull [9].

CAPÍTULO 3. DESARROLLO

En este capítulo se muestra el desarrollo de la tesis, en donde se implementarán las pruebas de vida acelerada y los circuitos para la realización de éstas.

Para el desarrollo de las pruebas el primer paso es la selección de los componentes, en este caso del dispositivo IGBT bajo prueba. En el laboratorio de electrónica del CENIDET se cuentan con tres diferentes dispositivos IGBT. Para la selección del IGBT adecuado para las pruebas de vida aceleradas, se revisaron las hojas de datos de cada uno de los dispositivos y se obtuvieron los parámetros más importantes, los cuales se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características de tres tipos de IGBT.

IRGF20B120UD-E	IRG4PH40K	IRG4PC40SPBF
$V_{CE} = 1200 V$ $T_j = 150^{\circ}C$ $I_c = 20 A$ $V_{GE} = 20 V$	$V_{CE} = 1200 V$ $T_j = 125^{\circ}C$ $I_c = 15A, 100^{\circ}C; 30A, 25^{\circ}C$ $V_{GE} = 20 V$	$V_{CE} = 600 V$ $T_j = 125^{\circ}C$ $I_c = 60A, 25^{\circ}C; 31A, 100^{\circ}C$ $V_{GE} = 15 V$

Además de estos datos, se consultó el área de operación segura de cada uno de estos, y de acuerdo a las características de cada uno de los dispositivos IGBT se seleccionó el IRG4PC40SPBF, debido a que es el que se ajusta más a los instrumentos que se tienen en el laboratorio para realizar las pruebas de vida aceleradas.

Después de la selección del dispositivo IGBT bajo prueba, se realizará el diseño de los circuitos de prueba acelerada, los cuales presentan a continuación.

3.1. DISEÑO DE CIRCUITOS DE PRUEBAS DE VIDA ACELERADA

Para realizar la aceleración de la vida del componente se requiere de un circuito de prueba. Existen varios artículos de investigación en donde mencionan la utilización del circuito de prueba para degradar a los dispositivos, sin embargo, en ninguno de estos

artículos mencionan el circuito utilizado. No obstante, llegan a presentar el dispositivo bajo prueba en una tarjeta sin ningún otro elemento electrónico.

Debido a lo anterior se plantea someter al dispositivo bajo dos circuitos de prueba, el primero será un dispositivo “chopper” el cual es muy utilizado en el área de diagnóstico de fallas y puede otorgar los parámetros necesarios, como corriente y voltaje, al dispositivo bajo prueba; el segundo será un circuito en donde el dispositivo verá cambios de corriente o voltaje inducidos por la fuente de entrada solamente. Estos circuitos se presentan a continuación.

3.1.1. Circuito “Chopper”

Como se mencionó anteriormente, el circuito “chopper” es ampliamente usado en el área de diagnóstico de fallas de dispositivos semiconductores de potencia debido a que es considerado como el circuito básico de conmutación en electrónica de potencia. Es por esa razón que se realizarán la implementación de las pruebas con éste circuito, el cual se presenta a continuación en la figura 3.1.

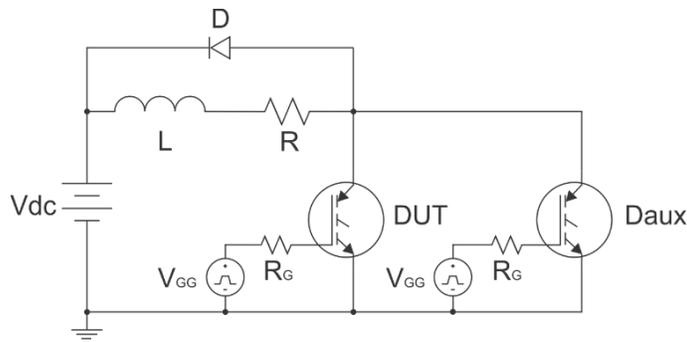


Figura 3.1. Circuito "chopper".

En la figura 3.1 se muestra el circuito chopper. En dicho circuito se pueden apreciar algunos dispositivos electrónicos que serán necesarios para degradar el IGBT bajo prueba (DUT en el circuito). Este circuito se caracteriza por tener una conmutación dura tipo inductiva, lo que ocasiona mayores pérdidas, así como calentamiento por el efecto de éstas.

Al iniciar la prueba el DUT (por sus siglas en inglés, Device Under Test) deberá de estar apagado y el dispositivo auxiliar (Daux) se encenderá, esto para que el inductor comience a cargarse hasta llegar a un valor de corriente limitado por la resistencia conectada en serie a éste. Una vez que lo anterior ocurre el Daux se apaga, y no volverá a encender en toda la prueba, y el DUT comenzará a conmutar.

Entonces comenzarán las pruebas teniendo la corriente en el colector y el voltaje colector-emisor constantes. El circuito chopper también se puede representar como el circuito de la figura 3.2.

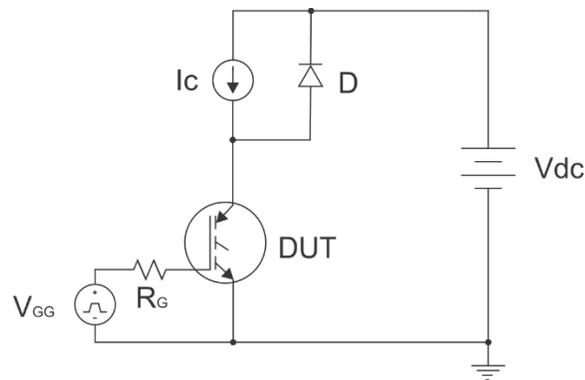


Figura 3.2. Forma alternativa del circuito "chopper".

3.1.2. Circuito IGBT simple

Este circuito solo estará compuesto por la fuente de entrada y el dispositivo bajo prueba, esto debido a que se pretende tener la menor cantidad de componentes que puedan ocasionarle otro tipo de fallas al IGBT, además de que, en la mayoría de las referencias consultadas para el desarrollo de este trabajo de tesis muestran un circuito IGBT simple.

En la figura 3.3 se muestra el circuito IGBT simple, el cual consta de una fuente de alimentación (V_{dc}), una resistencia (R) que se encargará de limitar la corriente del dispositivo y el dispositivo bajo prueba (DUT), también se puede observar el circuito de activación de la compuerta que está compuesto por la señal PWM (por sus siglas en inglés, Pulse Width Modulation) y la resistencia de compuerta (R_G).

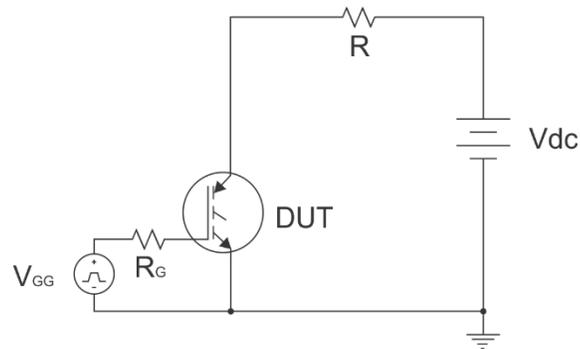


Figura 3.3. Circuito IGBT simple.

En este circuito se tiene una conmutación dura tipo resistiva, lo que representa menores pérdidas, así como un menor incremento de temperatura por efecto de éstas.

3.1.3. Circuito de activación de compuerta

Para que un dispositivo IGBT pueda ser activado se requiere de una señal que permita la activación de la compuerta de éste, para ello se hace uso de la señal PWM [30]. Esta señal requiere de una circuitería en donde se pueda aislar eléctricamente la etapa de generación de la señal de la etapa de potencia, además de un impulsor que proporcione la potencia requerida para activar la compuerta. El circuito de activación de compuerta se muestra en la figura 3.4.

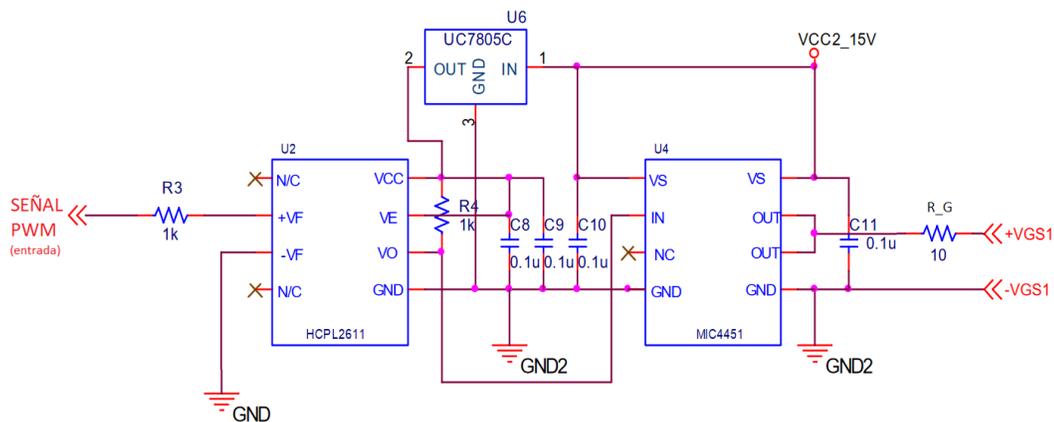


Figura 3.4. Circuito de activación de compuerta [30].

A continuación, se presenta una breve descripción del circuito de activación de compuerta.

La señal PWM de entrada al circuito se generará por medio de una tarjeta Arduino, dicha señal tendrá una amplitud de 5 V, debido a que es el voltaje máximo que puede entregar la tarjeta.

En la etapa 1 del circuito se encuentra el optoacoplador, el cual será el encargado de aislar eléctricamente el Arduino de la etapa de potencia. Para el presente trabajo de tesis se requiere de un optoacoplador de alta velocidad, y por ello se seleccionó el dispositivo HCPL2611.

En la etapa 2 del circuito se encuentra el impulsor, el cual se encarga de proporcionar el nivel de voltaje requerido para encender el dispositivo IGBT, que en este caso es de 15 V. A la salida del impulsor se encuentra la resistencia de compuerta del IGBT la cual se utiliza para modificar el tiempo de subida del voltaje de compuerta.

Una vez teniendo el diseño de los circuitos a implementar, se realizaron algunas simulaciones de éstos en el software PSPICE, las cuales se muestran a continuación.

3.2. Resultados en simulación del circuito “Chopper”

En esta sección se muestran las simulaciones que se realizaron en donde se estará monitoreando la señal del voltaje de conducción del IGBT conforme a la variación de tres parámetros, voltaje, corriente y temperatura. Se seleccionaron estos parámetros, debido a que se pueden simular en el software PSPICE, lo que no ocurre con el parámetro de humedad.

A continuación, se presentarán las simulaciones con los diferentes parámetros de variación.

3.2.1. Resultados en simulación variando temperatura

En la figura 3.5 se muestra el circuito "chopper" en el software PSPICE, con mediciones, en el voltaje colector-emisor, donde se verá el voltaje de conducción, y la corriente del colector del dispositivo IGBT.

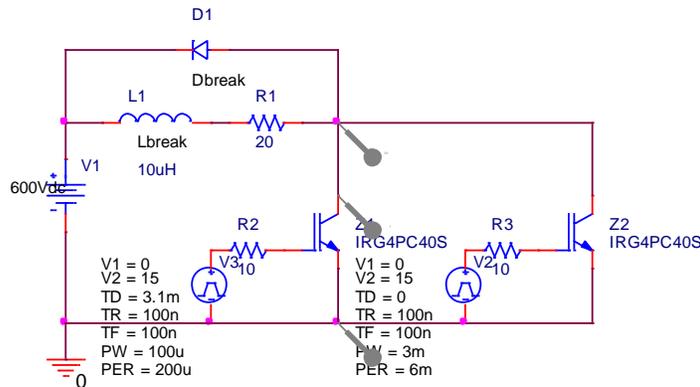


Figura 3.5. Simulación temperatura circuito "chopper".

Se sabe que la temperatura es uno de los factores principales que influyen para que un dispositivo electrónico presente una falla. Es por esto que se realizó la simulación del circuito chopper con un barrido de temperatura que supera las condiciones normales de funcionamiento (25°C). Las temperaturas empleadas en esta simulación fueron las siguientes: 25°C , 50°C , 75°C y 100°C .

Con dicho barrido se midió el voltaje colector-emisor del DUT en conducción y el resultado son las señales que se presentan en la figura 3.6.

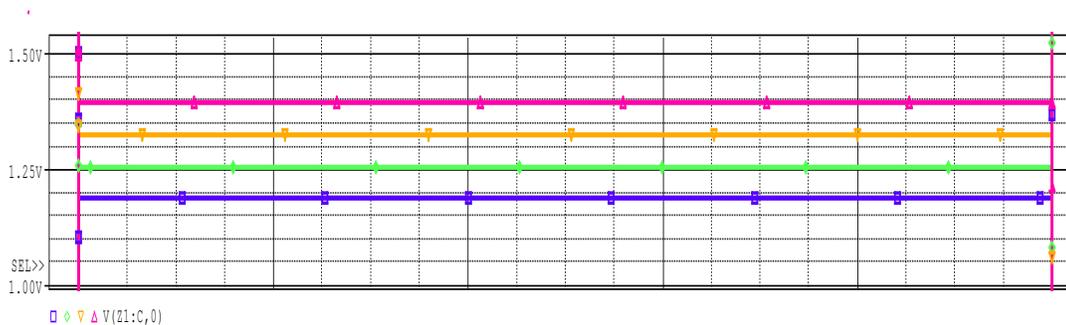


Figura 3.6. Voltaje de conducción con variación en temperatura.

En la figura 3.6 se pueden observar cuatro señales, las cuales representan el voltaje colector-emisor en conducción del IGBT. La señal de color azul ocurre cuando se tiene una temperatura de 25°C, en este caso el voltaje de conducción es de 1.2 V lo que indica que está operando de manera normal de acuerdo a la hoja de datos del IGBT. La señal de color verde es cuando la temperatura es de 50°C, aquí el voltaje de conducción es de 1.25 V. La señal de color naranja ocurre cuando la temperatura es de 75°C, en donde el voltaje de conducción llega a 1.32 V. Por último, la señal rosa es con temperatura de 100°C, en este caso el voltaje de conducción llega hasta 1.4 V. De acuerdo incremento del valor del voltaje de conducción se puede apreciar que el IGBT se va degradando al aumentar la temperatura.

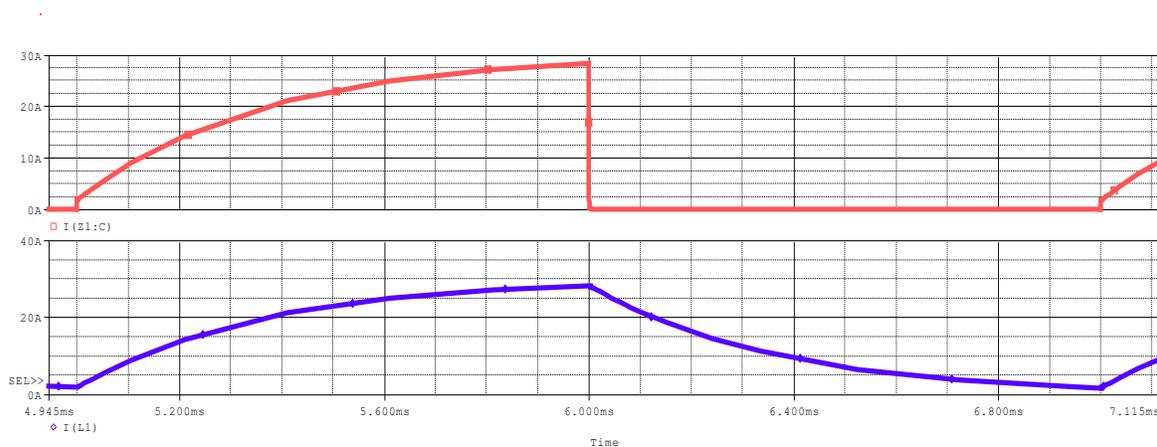


Figura 3.7. Señales de corriente del IGBT y el inductor.

En la figura 3.7 se muestra la señal de la corriente de colector del dispositivo IGBT (señal de color rojo) y la señal de la corriente del inductor (señal de color azul), esto para verificar el comportamiento de la corriente en dichos dispositivos y poder comprobarlo con los resultados de las pruebas.

Es necesario mencionar que las señales de corriente son las mismas durante el barrido de temperatura, es decir, no se modifica la corriente del colector del IGBT ni la corriente del inductor por el cambio de temperatura del IGBT.

3.2.2. Resultados en simulación variando corriente

En este caso, al igual que en la simulación con variación en voltaje, se le agregó al circuito chopper una resistencia de $1\text{M}\Omega$ en paralelo al inductor (figura 3.8). Esto debido a que se realizó la simulación del circuito con un inductor de 7.34mH , que es el inductor que se utilizará, y en el software PSPICE la corriente era inestable. El manual del simulador recomienda utilizar una resistencia grande en paralelo al inductor para que la corriente sea estable.

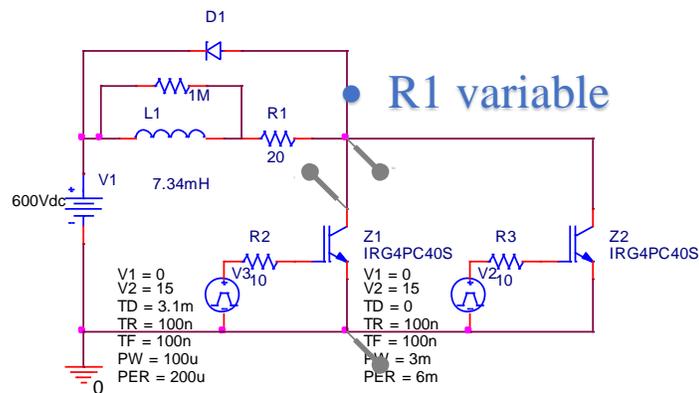


Figura 3.8. Simulación corriente circuito "chopper".

Para esta simulación se realizó un barrido de la corriente del colector del IGBT. Los valores del barrido son los siguientes: 30 A, 40 A, 50 A y 60 A. Se tomaron estos valores de corriente en el barrido debido que a 30 amperes el IGBT trabaja de manera normal, y 60 amperes es la corriente máxima a utilizar para que el IGBT no se salga de la zona de operación segura. Las señales del voltaje de conducción del DUT se presentan en la figura 3.9.

La señal de color azul es con la corriente de 30 A, aquí el voltaje de conducción es el nominal de 1.2 V. La señal de color verde ocurre cuando la corriente es de 40 A, en donde el voltaje de conducción es de 1.31 V. La señal de color rojo ocurre cuando la corriente es de 50 A y el voltaje de conducción que se alcanza es de 1.44 V. Por último, la señal de color amarillo ocurre cuando la corriente es de 60 A y en este caso el voltaje

de conducción es de 1.55 V. Al igual como ocurre con la temperatura, el IGBT se degrada considerablemente al incrementar la corriente del colector.

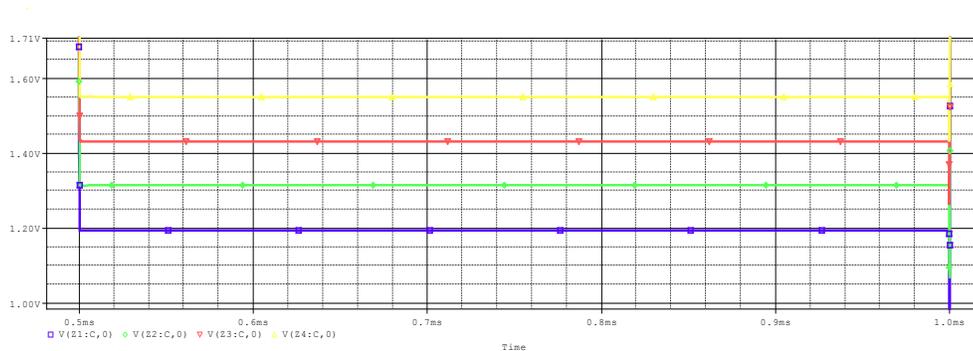


Figura 3.9. Voltaje de conducción con variación en corriente.

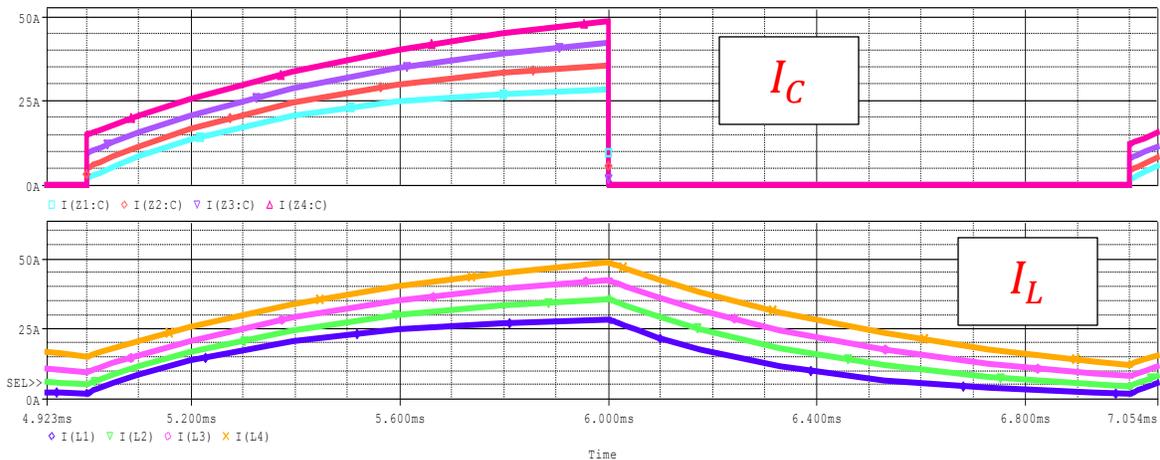


Figura 3.10. Señales de las corrientes del IGBT e inductor.

En la figura 3.10 se muestran las señales de las corrientes del IGBT y del inductor, en donde éstas se incrementan conforme disminuye la resistencia de carga del circuito.

3.2.3. Resultados en simulación variando voltaje

Para esta simulación se hará un barrido del voltaje colector-emisor del IGBT. Para esto, se variará el voltaje de entrada en el circuito, que está marcado como V1 en la figura 3.11. Los valores del barrido de voltaje son: 600 V, 800 V, 1000 V y 1200 V. Estos valores se tomaron debido a que en 600 V el IGBT trabaja nominalmente, y 1200

V es el límite de voltaje permitido en el área de operación segura del dispositivo. En la figura 3.12 se muestran las señales del voltaje de umbral del dispositivo para esta simulación.

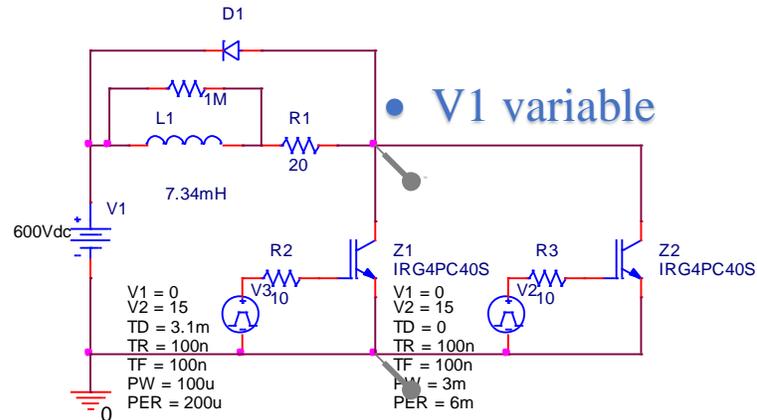


Figura 3.11. Simulación voltaje circuito "chopper".

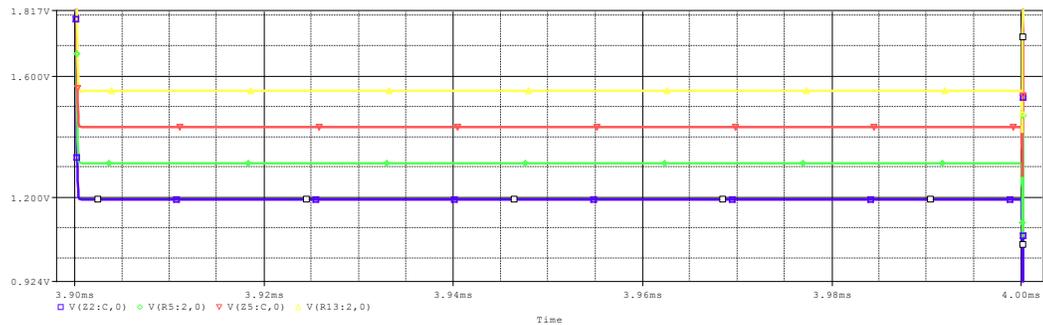


Figura 3.12. Voltaje de conducción con variación en voltaje.

La señal de color azul es aquella cuando el voltaje aplicado al colector del IGBT es 600 V, y en este caso el voltaje de conducción es de 1.2 V. La señal de color verde ocurre cuando el voltaje aplicado es de 800 V y ahí el voltaje de conducción es de 1.31 V. La señal de color rojo ocurre cuando el voltaje aplicado es de 1000 V y en este caso el voltaje de conducción es de 1.43 V. Por último, la señal de color amarillo indica que el voltaje aplicado es de 1200 V, en este caso el voltaje de conducción es de 1.55 V. Como en las simulaciones anteriores, se puede observar que el IGBT se va

degradando conforme se incrementa el parámetro correspondiente, en este caso el voltaje.

Es importante mencionar que el voltaje de conducción es solo un indicador de que el dispositivo está envejeciendo, sin embargo, cuando el dispositivo presente una falla abrupta éste ya no conducirá.

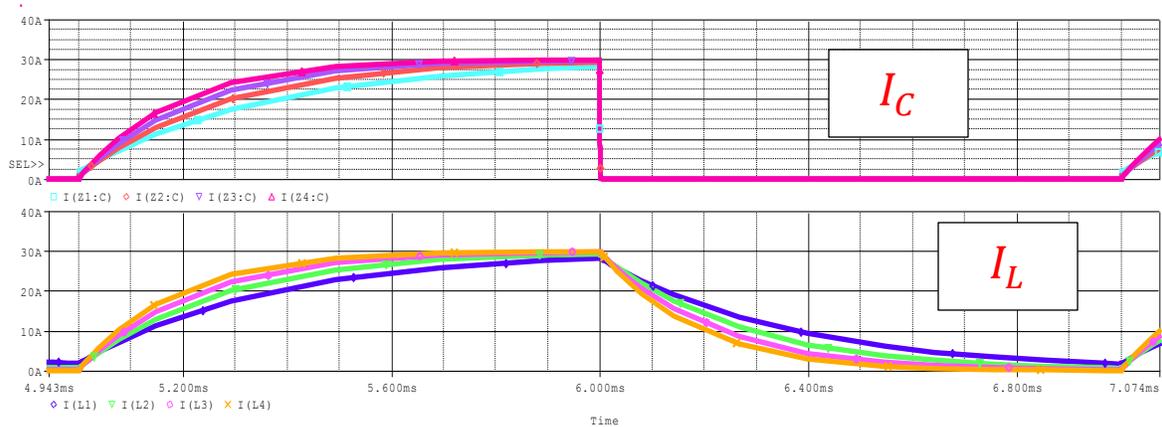


Figura 3.13. Señales de corriente del IGBT e inductor.

En la figura 3.13 se muestran las señales de corriente del IGBT y del inductor respecto a los cambios en el voltaje de la fuente de alimentación. En esta simulación se busca que la corriente sea la misma, es decir que el dispositivo solamente se vea acelerado por el voltaje; y con la ayuda de esta figura se puede verificar que, si bien no es exactamente el mismo valor de corriente, son muy similares los valores de corriente.

3.3. IMPLEMENTACIÓN DE CIRCUITOS

En este apartado se muestran las tarjetas electrónicas utilizadas para el desarrollo de las pruebas de vida acelerada.

3.3.1. Implementación circuito activador de compuerta

A continuación, se mostrará la tarjeta electrónica de los impulsores de los dispositivos IGBT, cabe mencionar que será el mismo diseño para los dos impulsores,

recordando que en la figura 3.1 se utiliza una señal PWM para el DUT y otra señal igual para el Daux. En la figura 3.14 a) se muestra el diseño de la tarjeta del impulsor. Ésta ya se implementó de manera física y se muestra en la figura 3.14 b).

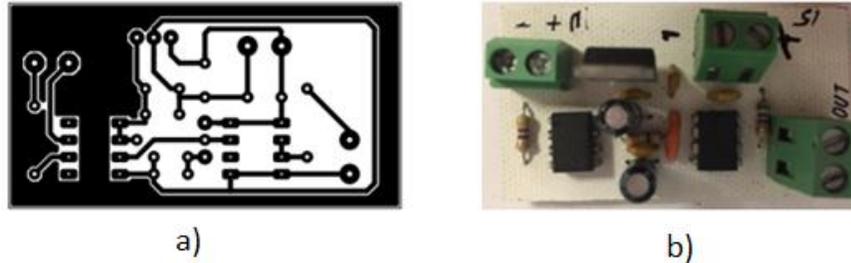


Figura 3.14. Implementación circuito activador de compuerta.

3.3.2. Implementación circuito “chopper”

La primera tarjeta es el circuito chopper, dicha tarjeta solo presentará físicamente al dispositivo bajo prueba, los demás elementos se conectarán mediante cables a la tarjeta. En la implementación se le agregarán al circuito chopper dos capacitores conectados en paralelo al voltaje de entrada, además de una resistencia de 5kΩ conectada en paralelo a cada uno de los capacitores, para garantizar la descarga de éstos. También se agregará un conector para medir el voltaje colector-emisor del DUT y un toroide como sensor de la corriente del inductor. Además de incluir un circuito de medición, como se muestra en la figura 3.15, para observar en una escala menor el voltaje de conducción del IGBT.

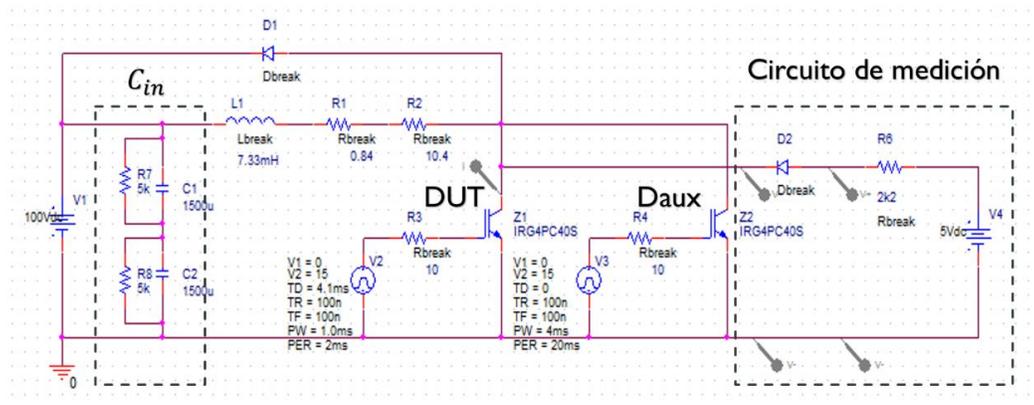


Figura 3.15. Diagrama circuito "chopper" completo.

A continuación, se presenta la tarjeta del circuito chopper. Cabe mencionar que el diseño de esta tarjeta se realizó en el software Altium.

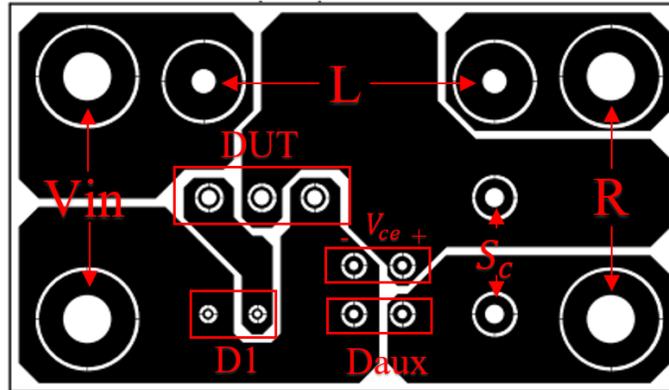


Figura 3.16. PCB del circuito "chopper".

En la figura 3.16 se tiene el PCB del circuito chopper. En dicha figura se muestran los conectores para cada uno de los elementos, como se mencionó anteriormente el único elemento que estará presente es el DUT, los demás serán solo conectores. El V_{in} se refiere a los conectores del voltaje de entrada, mientras que L se refiere a los conductores del inductor y R a los conectores de la resistencia. El S_c se refiere al toroide que se utilizará como sensor de corriente. El V_{ce} se refiere al medidor del voltaje colector-emisor del IGBT. En el Daux de la figura se conectará el colector y el emisor del IGBT auxiliar. En D1 se conectará un driver con la señal PWM. En la imagen no aparece el diodo de descarga libre de la figura 3.1 y es porque irá conectado con cables a la terminal 1 del inductor y a la terminal 2 de la resistencia.

En la figura 3.17 se muestra el circuito implementado de manera física del circuito de la figura 3.16. En la parte del PWM se pueden apreciar los impulsores de los IGBT (DUT y Daux) y una tarjeta Arduino Mega 2560. La tarjeta Arduino es la encargada de generar los pulsos PWM con una frecuencia de 500 Hz y un ciclo de trabajo del 50% para el DUT; para el Daux genera una señal pulso con duración de 4 milisegundos.

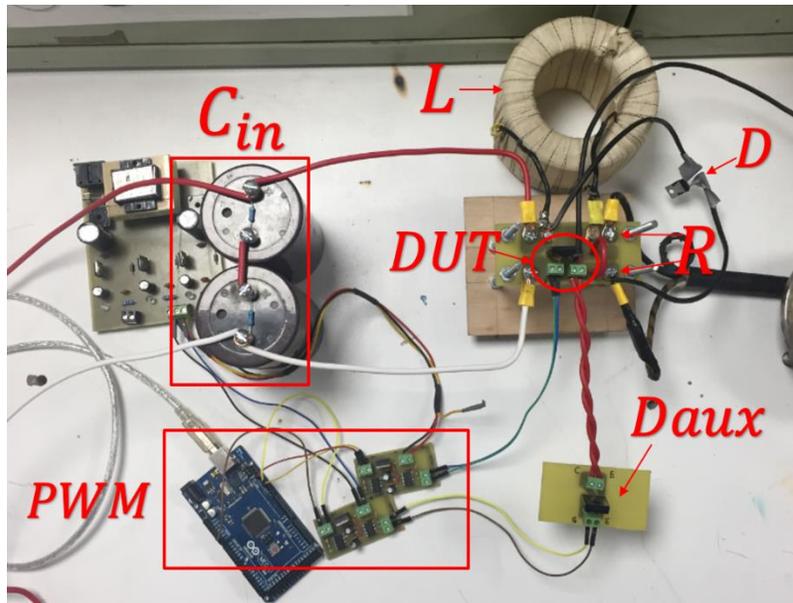


Figura 3.17. Circuito "chopper" implementado.

3.4. DESARROLLO DE PRUEBAS EN CONDICIONES NOMINALES

De acuerdo a la potencia máxima de disipación del IGBT sin disipador (mostrada en su hoja de datos), se decidió que el dispositivo trabajará de manera nominal con las siguientes condiciones:

- Voltaje de entrada (V_{in}) = 100 V
- Corriente de entrada (I_{in}) = 2.7 A promedio
- frecuencia (f) = 500 Hz
- Ciclo de trabajo (D) = 50%
- Temperatura = 30°C
- Humedad = 20%

Se realizaron 3 pruebas en condiciones normales para validar los resultados de éstas, teniendo los parámetros de entrada que se muestran en la tabla 3.2. Como se

había mencionado anteriormente, la señal que se quiere monitorear es el voltaje de conducción del IGBT para observar la degradación de éste; de acuerdo con los resultados de las tres pruebas se obtuvieron los siguientes valores del parámetro: para la primera prueba se obtuvo un valor de 1.28V, para la segunda prueba 1.29V y para la tercera prueba 1.3V. Esto quiere decir que los resultados de las pruebas son confiables y además se puede observar que hay un mínimo envejecimiento del dispositivo.

Tabla 3.2. Parámetros de las pruebas en condiciones nominales.

Primer prueba	Segunda prueba	Tercera prueba
$V_{in} = 100.2 V$	$V_{in} = 100.2 V$	$V_{in} = 100.2 V$
$i_{in} = 2.69 A \text{ promedio}$	$i_{in} = 2.69 A \text{ promedio}$	$i_{in} = 2.69 A \text{ promedio}$
$f = 500 Hz$	$f = 500 Hz$	$f = 500 Hz$
$D = 50\%$	$D = 50\%$	$D = 50\%$

Los datos de las pruebas se obtienen a través del osciloscopio con el cual se miden las señales de interés y además éste es capaz de almacenar los datos en un archivo de hoja de datos (Excel) por medio de un disco extraíble.

Estas pruebas se realizaron para verificar el comportamiento del dispositivo, y también corroborar que durante los sesenta minutos en los que el dispositivo estuvo funcionando, éste no presentara alguna falla.

Una vez realizadas las pruebas en condiciones normales, se continuó con el desarrollo de las pruebas de vida acelerada, las cuales se muestran a continuación.

3.5. DESARROLLO DE PRUEBAS DE VIDA ACELERADA

Para empezar con dichas pruebas se propuso utilizar una metodología, la cual se presenta en esta sección. La metodología para la realización de las pruebas de vida

acelerada, se dividió prácticamente en cinco etapas, las cuales se describen a continuación.

➤ Tamaño de la muestra

En esta parte se calcularán los dispositivos que se someterán a las condiciones de estrés. De acuerdo a los trabajos presentados en el estado del arte y de algunos otros artículos, el tamaño de la muestra debe de ser por lo menos de 5 para que de esa manera no exista una alteración en los resultados. Es importante mencionar que el tamaño de la muestra debe ser el mismo para cada uno de los niveles de esfuerzo de las pruebas.

➤ Determinación del estrés

En esta etapa se determinará el estrés al que someteríamos los dispositivos IGBT, en este caso fue la corriente debido a que es un parámetro que afecta la vida de los dispositivos, y que además por los equipos de laboratorio es más viable su desarrollo.

➤ Determinación de los niveles de estrés

En esta parte se calcularán los niveles de estrés de las pruebas, así como el tiempo de duración de las mismas. Los niveles de estrés se determinan por medio de pruebas en donde el dispositivo comienza a fallar.

➤ Realización de la prueba

En esta parte de se realizarán las pruebas y se obtendrán los datos de los tiempos de falla de cada uno de los dispositivos IGBT en los diferentes niveles de estrés. En la realización de las pruebas se debe someter únicamente al dispositivo a las condiciones de estrés, esto para evitar que presente otro tipo de fallas a causa de elementos asociados al circuito.

➤ Análisis de los datos

En esta etapa se analizarán los datos por medios del modelo de aceleración de la ley de potencia inversa de Weibull, en donde se obtendrán los parámetros de forma y

de escala de la distribución de probabilidad, los valores de las constantes K y N , y el factor de aceleración. Con estos datos obtenidos se puede obtener los tiempos de falla del dispositivos a condiciones nominales.

Es necesario mencionar que dicho plan de prueba solo se aplicará a las pruebas de vida acelerada del circuito IGBT simple, debido a que, como se mencionó anteriormente, se busca tener el mínimo de componentes para no ocasionar otro tipo de falla al dispositivo IGBT. No obstante, en el circuito “chopper” también se desarrollarán las pruebas de vida acelerada sometiendo solamente al dispositivo IGBT a un ambiente de estrés de uno de los esfuerzos propuestos anteriormente.

3.5.1. Pruebas de vida acelerada en el circuito “Chopper”

Las pruebas de vida acelerada que se realizaron al circuito “chopper” se hicieron con incremento sobre la corriente del colector del dispositivo IGBT bajo prueba. Con el fin de incrementar la corriente en el dispositivo se modificó el valor de resistencia de carga que inicialmente era de 10Ω a valores más pequeños. En la tabla 3.3 se muestran estos cambios y los valores de corriente con los que se estresa el dispositivo. Se realizaron cinco pruebas con distintos niveles de corriente y en cada una de ellas se utilizaron dispositivos nuevos, es decir no degradados.

Tabla 3.3. Parámetros de las pruebas de vida acelerada en circuito “chopper”.

Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
$V_{in} = 100.2 V$	$V_{in} = 100.2 V$			
$I_{in} = 4.56 A$	$I_{in} = 6.33 A$	$I_{in} = 6.41 A$	$I_{in} = 6.89 A$	$I_{in} = 7.21 A$
$f = 500 Hz$	$f = 500 Hz$			
$D = 50\%$	$D = 50\%$	$D = 50\%$	$D = 50\%$	$D = 50\%$
$R_{carga} = 4.5 \Omega$	$R_{carga} = 3.6 \Omega$	$R_{carga} = 3.5 \Omega$	$R_{carga} = 3.2 \Omega$	$R_{carga} = 3 \Omega$

En las pruebas 1, 2 y 3 se tuvo una duración de 60 minutos por cada una de ellas y en ninguna de éstas falló el dispositivo. Sin embargo, en las siguientes dos pruebas

se presentaron fallas en el dispositivo, en la prueba 4 el dispositivo falló a los 12 minutos de haber iniciado la prueba, y en la prueba 5 falló a los 6 minutos después del inicio de ésta.

En la tabla 3.3 se puede observar que, al disminuir la resistencia de carga, la corriente incrementa y la parte crítica donde el IGBT comienza a fallar es a partir de los 6.89 amperes.

Para cada una de las pruebas se monitoreó las siguientes tres señales: el voltaje colector-emisor del IGBT, la corriente del colector del mismo dispositivo, y el voltaje de conducción del IGBT por medio del circuito de medición mostrado en la figura 3.13. Todas estas señales se almacenaron en hojas de datos, tanto la imagen del osciloscopio como los datos de las señales.

3.5.2. Pruebas de vida acelerada en circuito IGBT simple

Para el desarrollo de estas pruebas se siguió con la metodología presentada anteriormente.

- Tamaño de la muestra

De acuerdo a varios artículos consultados, el tamaño de muestra mínimo que se requiere para obtener datos de falla, es de 5 muestras. Sin embargo, en este caso de estudio, y debido a los componentes adquiridos, serán 2 muestras.

- Determinación del estrés

Como se mencionó anteriormente, el estudio de este trabajo se enfocará en las pruebas de vida acelerada con esfuerzo en corriente. La corriente que afecta al dispositivo es la corriente promedio.

- Determinación de los niveles de estrés

Para el cálculo de los niveles de corriente que afectarán la vida del dispositivo se propusieron 5, variando la resistencia de carga del circuito. Esta resistencia de carga es un arreglo de varias resistencias de potencia con valor de 10Ω cada una. Es por

eso que la corriente varía conforme al valor de resistencia obtenido de arreglos serie y paralelo. Estos valores se pueden observar en la tabla 3.4.

➤ Realización de la prueba

Para el desarrollo de estas pruebas se hicieron siete pruebas de esfuerzo de corriente, y con ello se pudieron obtener los tiempos de falla para determinar los parámetros de la distribución de probabilidad de Weibull y con ello las constantes de la ley de potencia inversa. Las pruebas se desarrollaron bajo las condiciones que se muestran en la tabla 3.4.

En todas las pruebas se aplicó un voltaje de entrada de 100 V, y la frecuencia de conmutación del dispositivo fue de 500 Hz con un ciclo de trabajo del 50%. En las primeras tres pruebas no se presentaron fallas después de 60 minutos, sin embargo, las siguientes cuatro pruebas presentaron fallas en antes de los 60 minutos, de aquí se puede deducir que la corriente promedio que ocasiona una falla más rápidamente en el dispositivo se encuentra después de los 7 Amperes aproximadamente.

Tabla 3.4. Parámetros de las pruebas de vida acelerada en circuito IGBT simple.

Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7
$I = 6.55A$	$I = 6.84A$	$I = 6.84A$	$I = 7.34A$	$I = 7.34A$	$I = 8.15A$	$I = 8.15A$
$R = 7.5 \Omega$	$R = 7.14 \Omega$	$R = 7.14 \Omega$	$R = 6.66 \Omega$	$R = 6.66 \Omega$	$R = 6 \Omega$	$R = 6 \Omega$
$Temp = 26^{\circ}C$	$Temp = 28^{\circ}C$	$Temp = 28^{\circ}C$	$Temp = 27^{\circ}C$	$Temp = 27^{\circ}C$	$Temp = 28^{\circ}C$	$Temp = 27^{\circ}C$
$Hum = 54\%$	$Hum = 52\%$	$Hum = 52\%$	$Hum = 53\%$	$Hum = 53\%$	$Hum = 51\%$	$Hum = 52\%$

➤ Análisis de los datos

Esta etapa se presenta en el capítulo de resultados en donde se presentarán los tiempos de falla de cada una de las pruebas, además de la relación vida-esfuerzo para

las pruebas que se hicieron con el circuito “chopper” y los parámetros de la distribución de probabilidad de Weibull que se hicieron con las pruebas del circuito IGBT simple.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados de la tesis, en donde se presentarán las señales obtenidas por las pruebas de vida acelerada, además del análisis de los datos de falla y la obtención de los parámetros de las distribuciones de probabilidad.

4.1. RESULTADOS PRUEBAS DE VIDA ACELERADA EN CIRCUITO

“CHOPPER”

En primer lugar, se presentarán las señales capturadas por el osciloscopio, posteriormente una gráfica con los distintos voltajes de umbral de acuerdo a la corriente aplicada, y por último la gráfica de la relación vida-esfuerzo de la prueba.

Como se mencionó anteriormente, las pruebas tuvieron una duración de 60 minutos, pero además se hicieron capturas de las señales obtenidas en el osciloscopio y los datos de éstas cada cinco minutos; con esto se realizaron 13 capturas de datos y señales por cada prueba. Los datos de las pruebas se almacenaron en un archivo de hoja de datos de Excel, esto para poder obtener el valor promedio del voltaje de conducción del IGBT.

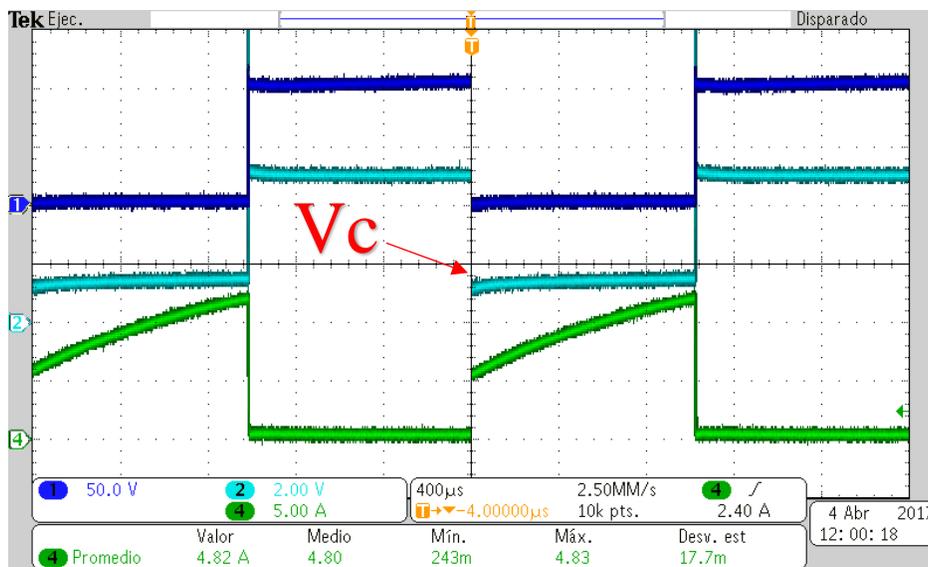


Figura 4.1. Señales capturadas del osciloscopio en las pruebas aceleradas en el circuito "chopper".

En la figura 4.1 se muestra una captura de una de las pruebas con esfuerzo en corriente, de donde se pueden observar el voltaje colector-emisor del IGBT (señal marcada con un 1 en la imagen), el voltaje de conducción del IGBT sumado con el voltaje del diodo del circuito de medición (señal marcada con un 2 en la figura), y por último la señal de la corriente del dispositivo (señal marcada con un 4 en la figura).

El voltaje de conducción, marcado como V_c en la figura 4.1 es el parámetro que se tiene que monitorear para observar el envejecimiento del dispositivo, es por ello que se almacenaron los datos de dicho parámetro en hojas de cálculo.

Los datos del voltaje de conducción de estas pruebas se almacenaron en una hoja de datos, de donde se graficaron éstos (figura 4.2) y se determinó un promedio para cada una de las cinco pruebas.

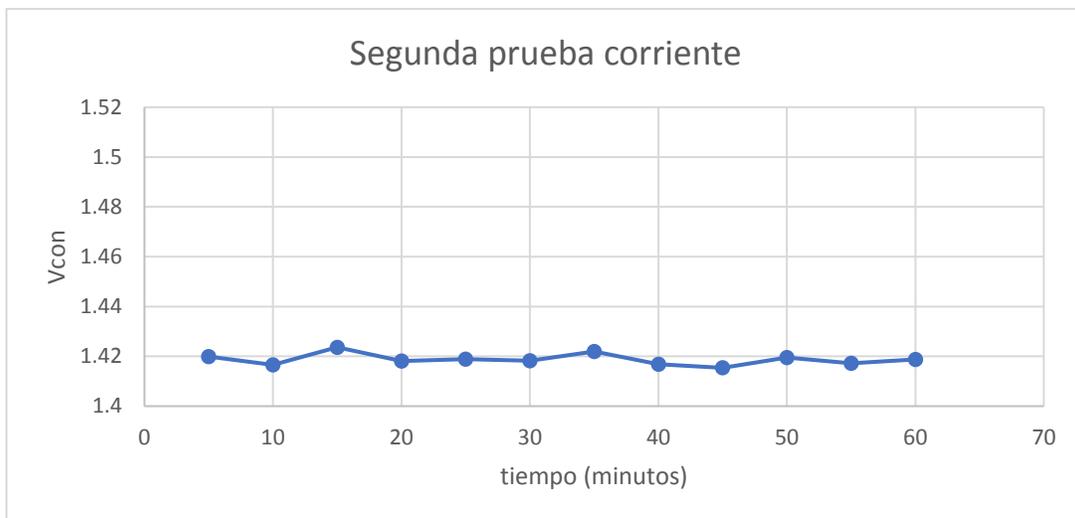


Figura 4.2. Voltaje de conducción durante la segunda prueba acelerada en corriente.

En la figura 4.2 se pueden observar los voltajes de conducción obtenidos por la segunda prueba de corriente. Se realizó la misma operación para cada una de las cinco pruebas.

Durante cada una de las pruebas se obtuvieron distintos valores del voltaje de conducción por lo que se realizó un promedio para cada una de ellas. Los valores de

dicho parámetro se muestran en la tabla 4.1, además de una pequeña gráfica que se muestra en la figura 4.3.

Anteriormente se mencionó que en las pruebas cuatro y cinco, existieron fallas en el dispositivo, es por eso que, con ayuda de la figura 4.3, se puede asegurar que cuando el dispositivo presenta un voltaje de conducción cercano a 1.5 V se está entrando a la zona de destrucción del dispositivo.

Tabla 4.1. Voltajes de conducción para cada una de las pruebas en el circuito "chopper".

	Vc	Corriente
1a prueba	1.37346362	4.68748462
2da prueba	1.42578211	7.20622
3ra prueba	1.43025834	7.2965
4ta prueba	1.46828885	7.85090667
5ta prueba	1.58483081	8.23218

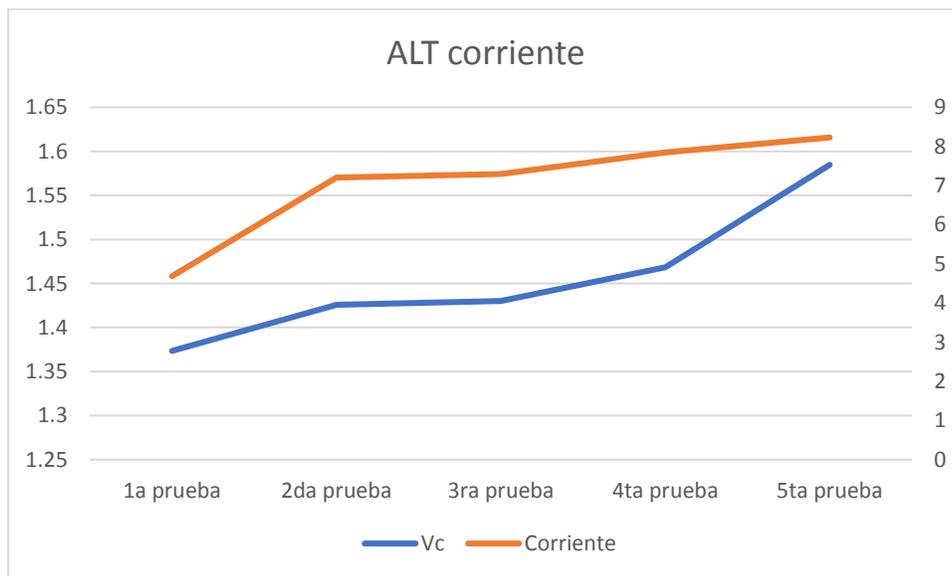


Figura 4.3. Comportamiento del voltaje de conducción con respecto a la variación de corriente.

Una vez encontrados los valores de corriente y voltaje de conducción con los cuales fallan los dispositivos, se continuó con la gráfica de relación vida-esfuerzo para así poder tener una pieza clave en el modelo estadístico con el cual se pretende obtener la confiabilidad del dispositivo. En la figura 4.4 se muestra dicha gráfica.

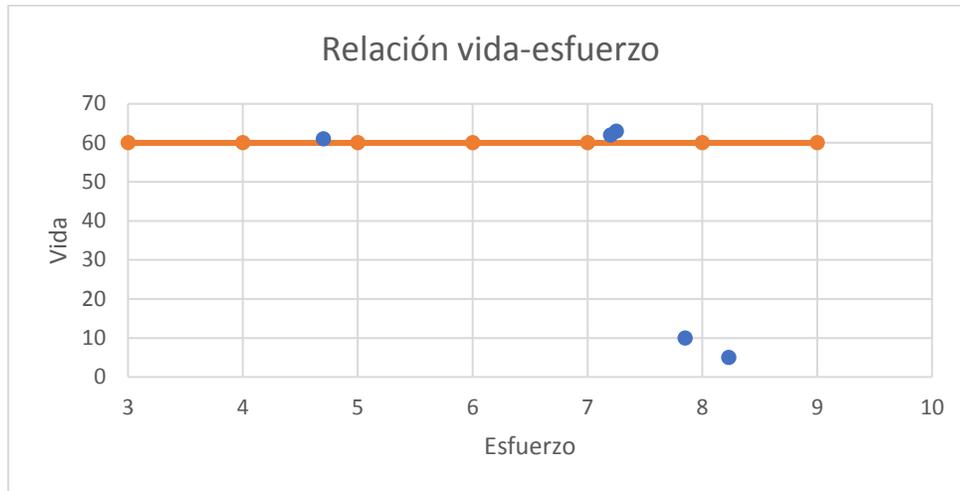


Figura 4.4. Relación vida-esfuerzo de las pruebas de vida acelerada en circuito "chopper".

Con la relación vida-esfuerzo se pueden obtener datos de la confiabilidad del dispositivo, en esta figura se observan las cinco pruebas con esfuerzo en corriente (punto azul), además de un umbral en los 60 minutos, es decir que las primeras tres pruebas están fuera del umbral del tiempo en el que podían fallar, y en términos de estadística, se dice que se tienen datos censurados por la derecha.

4.2. RESULTADOS PRUEBAS DE VIDA ACELERADA EN CIRCUITO IGBT SIMPLE

En este apartado se presentan los resultados de las pruebas de vida acelerada en el circuito IGBT simple con esfuerzo de corriente. De estas pruebas se monitorearon el voltaje de conducción, la corriente del colector y el voltaje colector-emisor, como se muestra en la figura 4.5. Las pruebas comenzaron a tener fallas a partir de que la corriente de colector del dispositivo superó los 7 Amperes, los tiempos de falla se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Tiempos de falla de los dispositivos a diferentes niveles de corriente.

	6.55 A	6.84 A	7.34 A	8.15 A
tiempos de falla (min)	X	X	7.35	3.42
	X	X	7.45	3.75

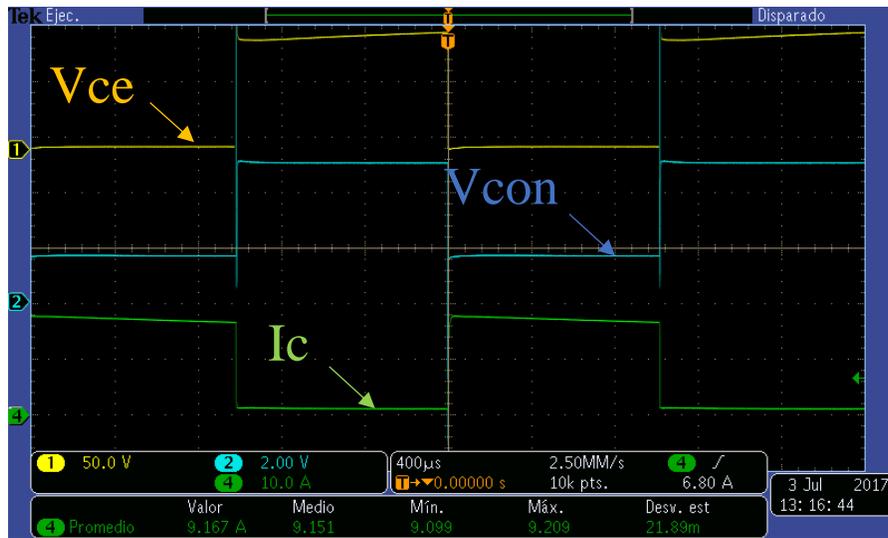


Figura 4.5. Señales capturadas del osciloscopio en las pruebas aceleradas con el circuito IGBT simple.

Como se mencionó anteriormente, el tamaño de la muestra para estas pruebas fue de 2 dispositivos, en donde presentan fallas a partir de las pruebas realizadas a un esfuerzo de 7.34 Amperes. Los tiempos de falla se muestran en minutos y se aprecia que conforme el esfuerzo es mayor el tiempo de vida del dispositivo disminuye, esto se puede corroborar con ayuda de la relación vida-esfuerzo.

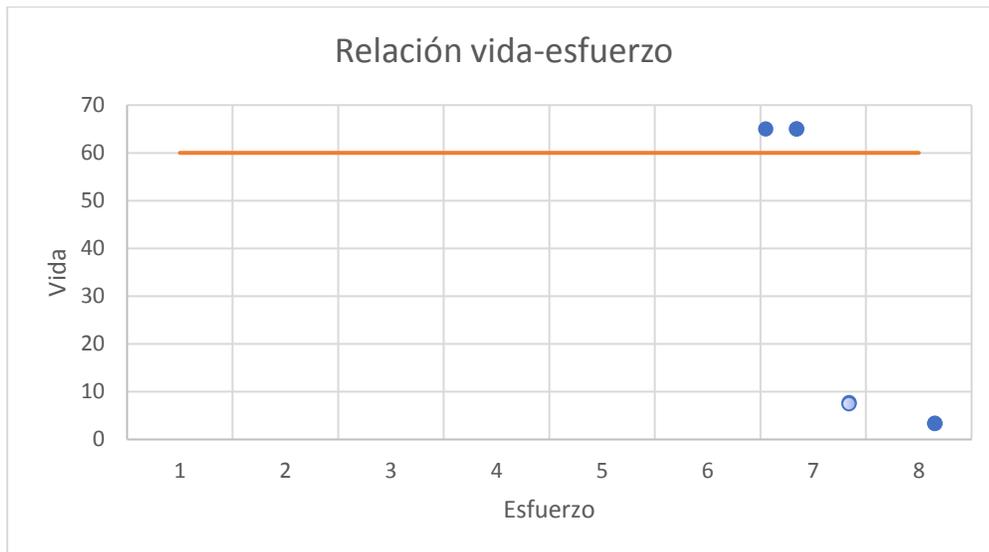


Figura 4.6. Relación vida-esfuerzo para las pruebas de vida acelerada en el circuito IGBT simple.

En la figura 4.6 se muestra la relación vida-esfuerzo de las pruebas de corriente sin inductor, en donde se encuentran tres datos censurados, esto debido a que después de 60 minutos no fallaron, y cuatro datos con el tiempo de falla dependiendo del esfuerzo aplicado.

Los datos presentados en la tabla 4.2 se analizaron mediante el software Minitab, en donde se pueden obtener los valores de los parámetros de forma y de escala de la distribución de Weibull, recordando que los dispositivos electrónicos siguen ésta distribución de vida, además de la gráfica de probabilidad dos niveles de esfuerzo que tuvieron fallas con sus respectivos tiempos de falla.

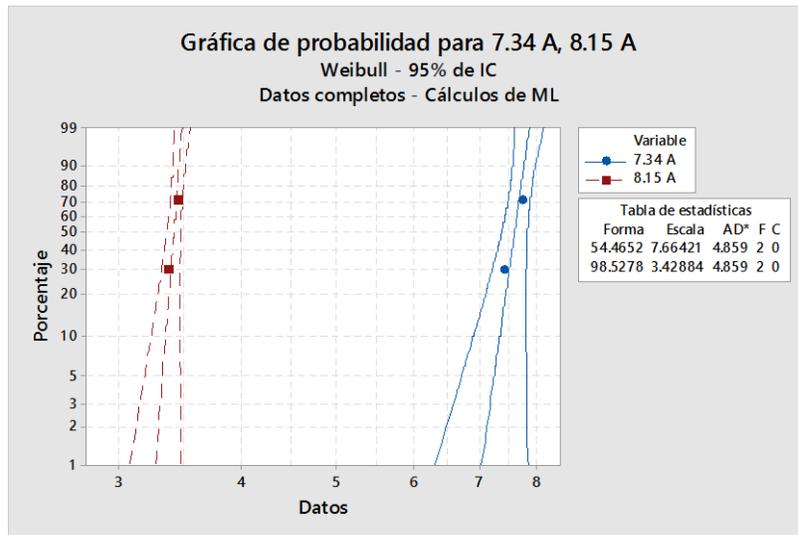


Figura 4.7. Gráfica de probabilidad de Weibull para las pruebas de vida acelerada en el circuito IGBT simple.

Con la gráfica de la figura 4.7 podemos comprobar que las fallas siguen una distribución de probabilidad de Weibull, además de conocer los parámetros necesarios para el cálculo de las constantes K y N de la ecuación (2.23). Los parámetros arrojados por el sistema se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Parámetros de la distribución de Weibull.

Esfuerzo	α	β	MTTF
7.34 A	7.66421	54.5766	7.59 minutos
8.15 A	3.42884	98.1288	3.41 minutos

Con los parámetros de la tabla 4.3 se calculó la relación lineal entre el $\ln(\alpha)$ y el $\ln(I)$ (tabla 4.4), como indica la ecuación (2.26), por medio de una hoja de cálculo de Excel.

Tabla 4.4. Parámetros de linealización.

$\ln(I)$	$\ln(\alpha)$
1.99333884	6.13092862
2.09801793	5.32654033

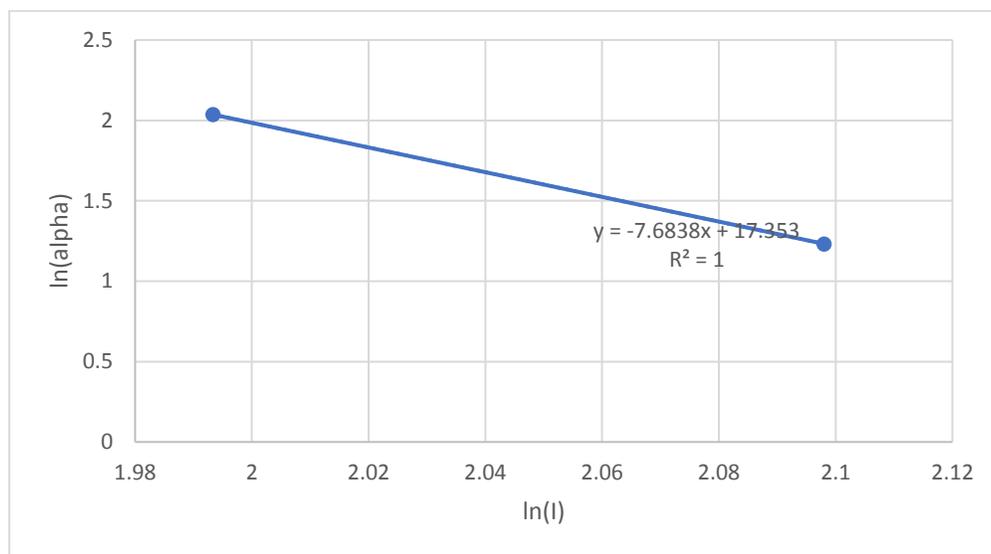


Figura 4.8. Relación lineal entre $\ln(I)$ y $\ln(\alpha)$.

De acuerdo a la figura 4.8 la ecuación de la recta está dada por $y = -7.6838x + 17.353$, y de acuerdo a las igualdades $y = \ln(\alpha(V))$, $-N = m$, $\ln(V) = x$, $\ln(K) = b$, se determina el valor de las constantes quedando de la siguiente manera: $K = \exp(17.353) = 34,380,496.52$ y $N = 7.6838$.

Con los valores de las constantes K y N se puede encontrar el valor del factor de aceleración, determinando primeramente los tiempos de falla de las pruebas en condiciones normales y en condiciones aceleradas, con ayuda de la ecuación (2.23), y posteriormente despejando la ecuación (2.15) con los valores de dichos tiempos.

A continuación, se presenta el procedimiento para determinar el factor de aceleración, en donde se despeja éste término de la ecuación (2.15), quedando de la siguiente manera:

$$\epsilon = \frac{t_0}{t_\epsilon} \quad (4.1)$$

De acuerdo a dicha ecuación se tiene que t_0 es el tiempo de falla del dispositivo en condiciones normales (2.9 Amperes) y t_ϵ en condiciones aceleradas (7.34 Amperes). Para determinar el valor de dichos parámetros se utiliza la ecuación (2.23) para cada uno de los casos utilizando los valores de las constantes K y N obtenidas.

$$t_0 = \frac{K}{V^N} = \frac{34,380,496.52}{(2.9^{7.6838})} = 9,623.62 \quad (4.2)$$

$$t_\epsilon = \frac{K}{V^N} = \frac{34,380,496.52}{(7.34^{7.6838})} = 7.66 \quad (4.3)$$

Una vez obtenido los valores de las ecuaciones (4.2) y (4.3) se sustituyen en la ecuación (4.1) quedando de la siguiente manera:

$$\epsilon = \frac{t_0}{t_\epsilon} = \frac{9,623.62}{7.66} = 1256.2131 \quad (4.4)$$

Entonces el factor de aceleración para las pruebas de esfuerzo en corriente de 7.34 Amperes con respecto a las condiciones nominales es de 1256.2131.

El cálculo del factor de aceleración es muy importante, debido a que éste nos puede proporcionar información sobre el tiempo en el que puede fallar el componente en condiciones nominales. El factor de aceleración también juega un papel importante en el área de confiabilidad, como se pudo observar en la ecuación (2.16) la cual sirve para determinar un valor de confiabilidad de las pruebas de vida acelerada con distribución de probabilidad de Weibull, como se realizó en este caso de estudio.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A continuación, se expresan las conclusiones del presente trabajo de tesis, conforme a los resultados obtenidos. Además se proponen las actividades o pruebas que se pueden realizar posteriormente para el enriquecimiento del presente trabajo.

5.1. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de tesis, se realizó el estudio de las pruebas de vida acelerada aplicadas en los dispositivos IGBT. En la literatura se han encontrado bastantes trabajos en donde se desarrollan pruebas de vida acelerada en distintos productos, como por ejemplo: convertidores CD-CD, capacitores, sensores, etc., con el fin de demostrar la confiabilidad de éstos. El presente trabajo se enfocó en el estudio de éstas pruebas y la manera de cómo aplicarlas en un dispositivo IGBT.

Para lograr lo anterior, se realizó el estudio de los conceptos más importantes, además de la revisión del estado del arte de los trabajos que ayudarían a la realización del trabajo.

En el desarrollo de las actividades se presentan varios puntos importantes que son necesarios mencionar. Se propusieron dos circuitos de prueba en donde se someterían a los dispositivos IGBT bajo condiciones de estrés superiores: el primero fue un circuito “chopper”, el cual es muy utilizado en el área de diagnóstico de fallas de los dispositivos semiconductores de potencia, y el segundo fue un circuito IGBT simple, en donde solo se encuentra el IGBT conectado a una fuente de voltaje y a un circuito de activación de compuerta.

Se realizó la construcción de los circuitos, y se determinó el tipo de esfuerzo a emplearse en las pruebas de vida acelerada. El esfuerzo seleccionado fue la corriente debido a que éste parámetro es uno de los más relevantes en cuanto la duración de la vida del dispositivo. Con el esfuerzo seleccionado se continuó con el desarrollo de las pruebas para los dos circuitos implementados.

Ya con la realización de las pruebas se pudieron obtener los tiempos de falla de los dispositivos, y con ello se comenzó el análisis de los datos. En el análisis de resultados se obtuvo lo siguiente:

- Las gráficas de la relación vida-esfuerzo de las pruebas de vida acelerada en el circuito “chopper” y en el circuito IGBT simple.
- Los parámetros de forma y de escala de la distribución de probabilidad de Weibull.
- Las constantes del modelo de potencia inversa de Weibull.
- El factor de aceleración de las pruebas aceleradas (7.34 Amperes) con respecto a las pruebas en condiciones nominales (2.9 Amperes).

La metodología utilizada en el presente trabajo de tesis es la del plan tradicional de pruebas de vida acelerada, en donde por medio de los modelos de aceleración de estrés constante, como lo es el modelo de ley de potencia inversa de Weibull, se asegura la extrapolación de los tiempos de falla del dispositivo en condiciones aceleradas a condiciones nominales, esto con ayuda del factor de aceleración; sin éste, los tiempos de falla no podrían extrapolarse.

Para asegurar que los dispositivos no sufrieran fallas por otro tipo de condiciones, se requiere controlar todas las variables de aceleración, tanto eléctricas como mecánicas, por ejemplo, voltaje, corriente, humedad y temperatura, únicamente variando el esfuerzo definido en la prueba.

El presente trabajo explicó la metodología por la cual se puede obtener la confiabilidad del dispositivo bajo ciertas condiciones, sin embargo, se requieren de más pruebas para que el nivel de confiabilidad se pueda determinar de una manera adecuada.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

Se espera que, para enriquecer el presente trabajo, se realicen pruebas de vida acelerada con un tamaño de muestra mayor, es decir, sometiendo más dispositivos a las pruebas. En la literatura se maneja que el tamaño mínimo de muestra debe ser de 5, sin embargo, muchos trabajos mencionan que el tamaño ideal para la realización de las pruebas debe estar comprendido entre 10 y 15.

También es deseable que el tiempo de prueba se pueda incrementar, es decir, en lugar de acotar el tiempo de prueba a 60 minutos, esperar hasta que el dispositivo falle.

Se pretende que en actividades futuras se puedan hacer las pruebas de vida acelerada con diferentes parámetros, como son la temperatura, el voltaje y la humedad.

REFERENCIAS

- [1] Jiménez Hernández J. del C., Alamilla López N. E., López Cerino M., “Pruebas de vida acelerada en confiabilidad”, Temas de ciencia y tecnología, vol. 13, no. 38, pp. 33-37, mayo-agosto, 2009.
- [2] Mark D. Turner, “A practical application of quantitative accelerated life testing in power systems engineering”, IEEE transactions on reliability, vol. 59, no. 1, pp. 99-101, marzo, 2010.
- [3] Rodríguez M., Rodríguez M., Alvarado A., “Modelo de estrés constante aplicado a la degradación de sensores de humo”, Congreso Internacional de investigación Academia Journals, Ciudad Juárez, Chihuahua, vol. 4, no. 1, pp. 803-808, 2012.
- [4] Jiménez J., “Planes óptimos para pruebas de vida acelerada con esfuerzos escalonados”, Instituto de física y matemáticas, Universidad tecnológica de la mixteca, julio, 2014.
- [5] Urbano M., Cavazos A., Mireles J., Cabrera M., “Estudio de confiabilidad en lámparas automotrices”, Congreso Nacional de Control Automático A.M.C.A., Monterrey, Nuevo León, octubre, 2007.
- [6] Suhir E., “HALT, FOAT and Their Role in Making a Viable Device into a Reliable Product”, IEEE Aerospace conference, Big Sky, Montana, marzo, 2014.
- [7] Nicoletto G., Pirondi A., Cova P., “Accelerated life testing and thermo-mechanical simulation in power electronic device development”, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Universidad de Parma, Parma, Italia, marzo, 1999.
- [8] Pedruelo J., “Ensayos acelerados de dispositivos electrónicos LED”, Proyecto de fin de carrera, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, septiembre, 2013.
- [9] Ulín F., Salinas R., Gonzáles G., “Estimación de vida útil mediante análisis de datos censurados y pruebas de vida acelerada”, Conference: XIV Foro Nacional de Estadística, vol. 1, octubre, 2009.
- [10] Nelson W., “Analysis of accelerated life test data- least squares methods for the inverse power law model”, IEEE transactions on reliability, vol. R-24, no. 2, pp. 103-107, junio, 1975.
- [11] C.R. Yang, J.T. Kim, “Temperature accelerated life test (ALT) at the circuit board level”, Electronics Manufacturing Technology Symposium 'Manufacturing Technologies - Present and Future', Seventeenth IEEE/CPMT International, pp. 158-165, Austin, Texas, octubre, 1995.
- [12] ON Semiconductor, “Reliability and Quality for IGBTs”, Application note, Semiconductor Components Industries, LLC, febrero, 2016.

- [13] Reyes M., Rodríguez M., Reyes V., “Prueba de vida acelerada en un componente”, congreso internacional de investigación academia journals 2014, pp. 3981-3986, Guanajuato, Noviembre, 2014.
- [14] Patiño A., “Intervalos de predicción para el tiempo de vida de productos en operación”, tesis de maestría, facultad de ciencias, escuela de estadística, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Noviembre, 2012.
- [15] Díaz J., Rodríguez M., Molina R., Romero R., “Desarrollo de un plan de pruebas para pruebas de vida acelerada en el sensor knock”, CULCyT No. 55, pp. 115-164, enero-abril, 2015.
- [16] Vergara R., “La estadística en el mantenimiento y reemplazo óptimo en el control de calidad”, tesis de maestría, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, México D.F., febrero, 2014.
- [17] Nogueira E., “Análisis de fiabilidad de LEDs de AlInGaP de alta eficiencia luminosa”, tesis doctoral, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, octubre, 2013.
- [18] Chan F., “Estudio de sistemas fotovoltaicos de alta confiabilidad”, tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Electrónica, CENIDET, Cuernavaca, octubre, 2008.
- [19] Martínez L., “Métodos de inferencia para la distribución Weibull: aplicación en fiabilidad industrial”, tesis de maestría, Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Vigo, julio, 2011.
- [20] Chamund D., “IGBT Module Reliability”, Application note, AN5945, abril, 2015.
- [21] Memon H., Alam M., “Reliability, maintainability, availability and failure rate analysis of IGBT triggering system designed for marine environment”, 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan, enero 2016.
- [22] Forrest W. Brey Fogle III, “Implementing six sigma, smarter solutions using statistical methods”, Libro, Wiley, Hoboken New Jersey, 2003.
- [23] De León S., “Comparación de metodologías de evaluación de confiabilidad”, tesis de maestría, Departamento de Ingeniería Electrónica, CENIDET, Cuernavaca, 2011.
- [24] Wang H., Ma K., Blaabjerg F., “Design for reliability of power electronic systems”, 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 33-44, Montreal, QC, Canada, octubre, 2012.
- [25] Sanaie G., Schenkelberg F., “Using reliability modeling and accelerated life testing to estimate solar inverter useful life”, Reliability and maintainability symposium RAMS’13, Orlando, Florida, enero, 2013.
- [26] Nelson W., “Applied life data analysis”, Libro, John Wiley and Sons, 1982.

[27] Lawless J., “Statistical models and methods for lifetime data”, Libro, John Wiley and Sons, 1982.

[28] Meneses M., “Pruebas aceleradas para la fiabilidad de materiales. Superposición Tiempo/Temperatura”, tesis de maestría, Universidad de la Coruña, Junio, 2012.

[29] Griful E., “Pruebas de vida acelerada”, en *Fiabilidad industrial*, Libro, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, 2015, pp. 57-63.

[30] Flores E., “Análisis y diseño de un circuito de detección de fallas a través de las señales de compuerta”, tesis de maestría, Departamento de Ingeniería Electrónica, CENIDET, Cuernavaca, febrero, 2014.