

Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica



**Modelado y análisis térmico de semiconductores de potencia para la reconfiguración
dinámica de módulos fotovoltaicos.**

Documento de tesis sometido a consideración para optar por el grado académico de Maestría en
Electrónica con Énfasis en Sistemas Microelectromecánicos

Mauricio Javier Mendoza Colindres

03 de mayo de 2022

Declaro que el presente documento de tesis ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos y resultados experimentales propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de tesis realizado y por el contenido del presente documento.

Mauricio Javier Mendoza Colindres

Cartago, 03 de mayo de 2022

Céd: 8-0092-0973

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Electrónica
Tesis de Maestría
Tribunal Evaluador

Tesis de maestría defendida ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el grado académico de maestría, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Dr. Johán Carvajal Godínez
Coordinador Unidad de Posgrado IE



Dr. Luis Diego Murillo Soto
Profesor lector



M.Sc. Adrián Quesada Martínez
Profesor lector



Dr. Juan José Negroni Vera
Profesor externo



Dr. Carlos Meza Benavides
Director de tesis

Los miembros de este Tribunal dan fe de que la presente tesis de maestría ha sido aprobada y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 03 de mayo de 2022

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo general diseñar una estructura para disipar calor con ayuda de modelos matemáticos y herramientas de simulación multifísica para cumplir de manera eficaz con las especificaciones operacionales de los semiconductores de potencia de un circuito de reconfiguración dinámica de módulos fotovoltaicos.

Se consultan diversas fuentes para entender cuál es el estado del arte en aspectos de disipación térmica, desde varias aristas, para incorporar variables estratégicas que permitan presentar un modelo de solución depurado.

Como parte de esas variables se incorporan elementos tales como los mecanismos pasivos y activos de disipación, las vías de disipación térmica y la estrategia de disipación que toma ventaja del cambio de estado de la materia.

Se desarrolla desde la base el modelado físico matemático del circuito térmico equivalente y posteriormente se calculan los dimensionamientos aproximados de los disipadores térmicos teóricos, utilizando dos mecanismos básicos de disipación: convección natural y convección forzada. Posteriormente, se identifican para ese modelo físico, el disipador comercial disponible en el mercado con el fin de hacer la comparativa entre el disipador teórico muy conservador y el disipador comercial muy ambicioso.

Seguidamente se llevan a cabo las simulaciones físicas matemáticas con el software de simulación multifísica (COMSOL 5.6) para modelar y evaluar el desempeño de los diferentes tipos de disipadores, considerando las diferentes variables que se definieron en el modelo teórico de disipación aproximado.

Finalmente se brindan los resultados y se presenta el disipador mediante tubos de calor como el que cumple con las especificaciones y mejor se desempeña desde el punto de vista de capacidad de disipación térmica, sin requerimiento adicional de potencia por parte del circuito de reconfiguración dinámica de módulos fotovoltaicos.

Palabras clave: modelación y simulación multifísica, disipador, circuito térmico.

Abstract

The general objective of this research work is to design a structure to heat dissipation with the help of mathematical models and multiphysics simulation tools to effectively meet the operational specifications of the power semiconductors of a photovoltaic module dynamic reconfiguration circuit.

Various sources are consulted to understand the state of the art in aspects of heat dissipation from various angles to incorporate strategic variables that allow presenting a refined solution model.

As part of these variables, elements such as passive and active heat dissipation mechanisms, heat dissipation pathways and the heat exchanging strategy that takes advantage of the change in the state of matter are incorporated.

The mathematical physical modeling of the equivalent thermal circuit is developed from the base and subsequently the approximate dimensions of the theoretical heatsinks are calculated using two basic heat dissipation mechanisms: natural convection and forced convection. Subsequently, for that physical model, the commercial heatsink available on the market is identified in order to make the comparison between the very conservative theoretical heatsink and the very ambitious commercial heatsink.

Next, the mathematical physical simulations are made with the multiphysics simulation software (COMSOL 5.6) to model and evaluate the performance of the different types of heatsinks considering the different variables that were defined in the approximate theoretical model of heatsinks.

Finally, the results are shown, and the heat piping is presented as the one that meets the specifications and performs better from the point of view of heat dissipation capacity without additional power requirement by the photovoltaic module dynamic reconfiguration circuit.

Keywords: multiphysics modeling and simulation, heatsink, thermal circuit.

Una dedicación póstuma a mis queridos padres...

Agradecimientos

El resultado de este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de mi madre Ángela Estela Colindres Prado y mi querida esposa Enid González Ibarra.

Mauricio Javier Mendoza Colindres

Cartago, 03 de mayo de 2022

Índice general

Índice de figuras.....	1
Índice de tablas	4
Capítulo 1 Introducción	6
1.1 Objetivos y estructura del documento	7
Contribuciones del proyecto.....	7
Capítulo 2 Marco teórico	8
2.1 Circuitos térmicos y modelado de sistemas.....	8
2.1.1 Pared plana	8
2.1.2 Cálculo de transferencia de calor de un arreglo de aletas.....	11
2.2 Modelado térmico del MOSFET	15
2.2.1. Temperatura máxima de la unión (T_{jmax})	17
2.2.2. Máxima Potencia de Disipación Permitida	18
2.3 Impedancia térmica	18
2.4 Principio de transferencia de calor por vías térmicas	21
2.4.1 Diseño de vías térmicas	22
2.4.2 Vías huecas vs. vías rellenas.....	23
2.5 Modelado térmico del semiconductor-PCB con vías-disipador	23
2.5.1 Ruta de disipación térmica	24
2.5.2 Ruta de enfriamiento de doble cara	24
2.6 Estrategia de enfriamiento pasivo mediante tubos de disipación de calor	26
2.6.1 Antecedentes.....	26
2.6.2 Evaluación de los límites de operación	26
2.6.2 Supuestos.....	27
2.6.3 Geometría y condiciones de operación.....	27
2.6.4 Configuración del modelo	27
Capítulo 3 Metodología de la investigación y diseño utilizado	29
3.1 Diseño de la investigación.....	30
3.2 Materiales y Herramientas.....	31
3.3 Diseño instrumental o interpretación, del proyecto, según sea el caso.....	32
3.4 Metodología de validación	35
Capítulo 4 Resultados y análisis	35
4.1 Definición de alcance y especificaciones	36
4.2 Modelado del sistema	36
4.4 Propuesta de solución con disipador comercial por convección natural	47

4.5 Propuesta de solución con disipador comercial por convección forzada	49
4.6 Simulación del arreglo con vías de disipación	51
4.7 Simulación del arreglo por efecto de la distancia de separación	57
4.8 Simulación del arreglo por efecto del tipo de material del disipador	61
4.9 Simulación del arreglo por efecto de la geometría del disipador	63
4.10 Simulación del arreglo por efecto del mecanismo de disipación.....	66
4.11. Matrices de resultados	70
Capítulo 5 Conclusiones	73
Apéndice A Esquemáticos para prueba experimental.....	74
Apéndice B Introducción a la transferencia de calor	75
Bibliografía	80

Índice de figuras

Figura 1. Pared plana.

Figura 2. Pared compuesta.

Figura 3. Circuito térmico en serie-paralelo-serie.

Figura 4. Analogía eléctrica correspondiente a la transmisión de calor a través de una pared plana con convección en sus dos caras.

Figura 5. Utilización de aletas para mejorar la transferencia de calor de una pared plana.

Figura 6. Aletas rectas de sección transversal uniforme. (a) Aletas rectangulares. (b) Aletas cilíndricas.

Figura 7. Arreglo característico de múltiples aletas rectangulares.

Figura 8. Gráfico de eficiencia de tres perfiles diferentes de aletas rectas (perfil rectangular, triangular y parabólico).

Figura 9. Modelo multicapa de un semiconductor montado sobre un disipador para analizar la transferencia de calor desde el silicio hacia el ambiente.

Figura 10. Equivalente circuital ley de Ohm eléctrica/térmica [5].

Figura 11. Comparativa con los elementos de un montaje real.

Figura 12. Circuito equivalente térmico del MOSFET en estado estacionario [8].

Figura 13. Circuito equivalente eléctrico con el modelo de impedancia térmica [5].

Figura 14. Respuesta a dos pulsos de temperatura [5].

Figura 15. Curva del fabricante para el cálculo de $Z_{jc}(t)$ [5].

Figura 16. Resistencia térmica para un tren de pulsos [5].

Figura 17. Curvas de resistencia térmica transitoria [6].

Figura 18. Geometría de sección transversal típica para una placa FR-4 de dos capas (sin escala).

Figura 19. Geometría de sección transversal típica para una placa FR-4 con vías térmicas (sin escala).

Figura 20. Chip montado en una cavidad con ruta térmica optimizada.

Figura 21. Vista de la sección transversal del paquete semiconductor GaNPX y la ruta de disipación térmica.

Figura 22. Configuración de la simulación del enfriamiento térmico de doble cara.

Figura 23. Diagrama general de un segmento de “Heat Pipe” para la simulación en COMSOL

Figura 24. Arreglo de 32 transistores MOSFET del sistema de recombinación para los módulos fotovoltaicos [1].

Figura 25. Corte transversal de un arreglo físico de un par de MOSFETs con disipador.

Figura 26. Circuito térmico equivalente en modo estático de un par de MOSFETs IRLH5030PBF con disipador.

Figura 27. Curva característica de Temperatura de la juntura versus Resistencia $R_{DS(ON)}$ normalizada del MOSFET IRLH5030PBF.

Figura 28. Corte transversal de un arreglo físico de dieciséis pares de MOSFETs con disipador.

Figura 29. Circuito térmico equivalente del arreglo de 16 pares de transistores MOSFET del sistema de recombinación para los módulos fotovoltaicos.

Figura 30. Curva característica de máxima impedancia térmica transitoria efectiva en la juntura con la base.

Figura 31. Circuito térmico equivalente en modo dinámico de un par de MOSFETs IRLH5030PBF con disipador.

Figura 32. Respuesta del circuito térmico equivalente en modo dinámico de la figura 29 ante una fuente pulsante de baja frecuencia (2 Hz).

Figura 33. Respuesta del circuito térmico equivalente en modo dinámico de la figura 29 ante una fuente pulsante de muy baja frecuencia (0,02 Hz).

Figura 34. Disipador de temperatura marca DISIPA Heat S.L. modelo P20040. Con dimensiones de 200mm x 100mm x 40mm).

Figura 35. Diagrama isométrico del disipador de temperatura marca DISIPA Heat S.L. modelo P20040. Con dimensiones de 200mm x 100mm x 40mm).

Figura 36. Intercambiador de calor de alta eficiencia marca GUASCH.

Figura 37. Curva de resistencia térmica equivalente del intercambiador de calor marca GUASCH.

Figura 38. Proceso constructivo en COMSOL de las vías en la PCB. a. huella de 20 vías de 1,6 mm de diámetro. b. 20 vías de cobre de 1,6 mm de diámetro y 2 mm de longitud. c. Placa de contacto de cobre de 5 mm x 5 mm x 0,2 mm para garantizar buena transferencia térmica. d. Placa aislante eléctrica de 4 mm x 4 mm x 0.2 mm para evitar conducción eléctrica. e. MOSFET montado en la placa aislante. f. Lámina de cobre que está en contacto con el disipador en la parte posterior de la PCB.

Figura 39. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación en COMSOL de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 100mm x 40mm para dos MOSFETs en paralelo montados en una PCB con vías de disipación de 1,6 mm de diámetro.

Figura 40. Resultados de simulación en COMSOL de transferencia de calor por convección natural. (a) Disipador de cobre de 200mm x 100mm x 40mm. (b) Disipador de grafito de 200mm x 100mm x 40mm.

Figura 41. Proceso constructivo en COMSOL de las vías en la PCB. a. huella de 20 vías de 2,6 mm de diámetro. b. MOSFET montado en la placa aislante eléctricamente.

Figura 42. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación en COMSOL de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 100mm x 40mm para dos MOSFETs en paralelo montados en una PCB con vías de disipación de 2,6 mm de diámetro.

Figura 43. Proceso constructivo en COMSOL de las vías en la PCB. a. huella de placa de cobre. b. MOSFET montado en la placa aislante eléctricamente.

Figura 44. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación en COMSOL de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 100mm x 40mm para dos MOSFETs en paralelo montados en una placa de cobre.

Figura 45. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación en COMSOL de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 100mm x 40mm para dos MOSFETs encendidos en paralelo, montados en una placa de cobre y separados entre sí 95 mm.

Figura 46. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación en COMSOL de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 100mm x 40mm para dos MOSFETs en paralelo montados en una placa de cobre y separados entre sí 18 mm.

Figura 47. Diagrama de dimensionamiento y resultados en COMSOL de simulación de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 300mm x 80mm junto a PCB con vías de cobre de 1,875 mm de diámetro y 2 mm de longitud. (a) Geometría general del disipador de aluminio. (b) Enmallado general del disipador de aluminio. (c) Resultados del perfil de temperatura del disipador con la potencia nominal de 16 MOSFETs IRLH5030PBF.

Figura 48. Diagrama de dimensionamiento y resultados en COMSOL de simulación de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 300mm x 80mm junto a

PCB con vías de cobre de 1,875 mm de diámetro y 2 mm de longitud. (a) Geometría general del disipador de aluminio. (b) Enmallado general del disipador de aluminio. (c) Resultados del perfil de temperatura del disipador con la potencia nominal de 16 MOSFETs IRLH5030PBF.

Figura 49. Diagrama de dimensionamiento y resultados en COMSOL de simulación de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 300mm x 80mm junto a PCB con vías de cobre de 1,6 mm de diámetro y 2 mm de longitud. (a) Geometría general del disipador de aluminio. (b) Enmallado general del disipador de aluminio. (c) Resultados del perfil de temperatura del disipador con la potencia nominal de 16 MOSFETs IRLH5030PBF.

Figura 50. Resultados del perfil de temperatura del disipador de aluminio con la potencia nominal de treinta y dos (32) MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

Figura 51. Resultados del perfil de temperatura del disipador de cobre con la potencia nominal de dieciséis (16) MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

Figura 52. Resultados del perfil de temperatura del disipador de grafito con la potencia nominal de dieciséis (16) MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

Figura 53. Resultados del perfil de temperatura del disipador con aletas rectangulares y la potencia nominal de dos MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

Figura 54. Resultados del perfil de temperatura del disipador con aletas tubulares cilíndrica y la potencia nominal de dos MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

Figura 55. Resultados del perfil de temperatura del disipador con aletas tubulares hexagonales y la potencia nominal de dos MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

Figura 56. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación de transferencia de calor por convección forzada de un disipador de aluminio de 150mm x 100mm x 40mm. (a) Resultados del perfil de temperatura del disipador con la potencia nominal de dieciséis MOSFETs IRLH5030PBF encendidos. (b) Resultado del perfil de velocidad de la corriente de aire a la que se expone el disipador. (c) Resultado del perfil de presión estática de la corriente de aire a la que se expone el disipador. (d) Distribución geométrica de los dieciséis MOSFETs en la parte posterior del disipador.

Figura 57. Resultado del perfil de temperatura de un disipador de cobre de 150mm x 100mm x 40mm expuesto a una corriente de aire de 1m/s con la potencia nominal de dieciséis MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

Figura 58. Resultado del perfil de temperatura de un disipador de cobre de 150mm x 100mm x 40mm expuesto a una corriente de aire de 1m/s con la potencia nominal de dieciséis MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

Figura 59. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación de transferencia de calor por tubos de calor (“heat pipe”) de un disipador de cobre de 200mm x 150mm x 30mm. a) Curva de la conductividad térmica equivalente versus la longitud del tubo de calor (“heat pipe”). b) Diagrama del enmallado en COMSOL de un cuarto del disipador por tubo de calor (“heat pipe”). c) Resultados del perfil de temperatura del disipador con la potencia nominal de dieciséis MOSFETs IRLH5030PBF encendidos. d) Curva de la temperatura del condensador del tubo de calor versus la longitud del tubo de calor (“heat pipe”).

Figura 60. Prototipo de PCB y rutas de interconexión de un arreglo de ocho MOSFETs para prueba experimental.

Figura 61. Distribución de la temperatura y la velocidad en convección natural sobre una placa plana inclinada [2].

Figura 62. Distribución de la temperatura y la velocidad sobre una placa plana en convección forzada [2].

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros de transferencia de calor para convección natural entre placas paralelas verticales [3]

Tabla 2. Valores típicos de variación de T_{jmax} [5].

Tabla 3. Protocolo para el logro de los objetivos del proyecto de investigación

Tabla 4. Propiedades del material para el arreglo con vías de disipación.

Tabla 5. Parámetros del modelo para el arreglo con vías de disipación.

Tabla 6. Propiedades del material el mecanismo por tubos de calor.

Tabla 7. Parámetros del modelo para el mecanismo por tubos de calor.

Tabla 8. Matriz de capacidad de disipación del disipador en función del diámetro de las vías sólidas del PCB.

Tabla 9. Matriz de capacidad de disipación del disipador en función de la distancia entre MOSFETs.

Tabla 10. Matriz de capacidad de disipación del disipador en función del material.

Tabla 11. Matriz de capacidad de disipación del disipador en función de la geometría.

Tabla 12. Matriz de capacidad de disipación del disipador en función del mecanismo de disipación.

Nomenclatura utilizada en el presente trabajo

Símbolo	Unidades	Definición
\vec{q}	W/m ²	Vector densidad de flujo de calor
Qc	J	Cantidad de calor transmitida
∇T	K	Gradiente de temperaturas
k	W/mK	Conductividad térmica
L	m	Espesor de la pared
C _p	J/K	Capacidad de calor
c	J/kgK	Calor específico
ρ	m ³	Densidad
S	J/m ³	Tasa de generación de energía por unidad de volumen
T	K	Temperatura
t	s	Tiempo
h_{CF}	W/m ² K	Coefficiente de transmisión de calor por convección
A	m ²	Área superficial
η	Pa·s	Viscosidad dinámica del fluido
u_F	m/s	Velocidad del fluido
R _t	°C/W	Resistencia térmica
C _t	°C/s·W	Capacidad térmica
Pr		Numero de Prandt
ν	m ² /s	Viscosidad cinemática
μ	Pa·s	Viscosidad dinámica
α	m ² /s	Difusividad térmica
Gr		Numero de Grashof
g	m/s ²	Constante de aceleración de la gravedad
Ra		Número de Rayleigh
P _d	W	Potencia de disipación térmica
θ	°C/W	Resistencia térmica
r(t)		Resistencia térmica normalizada
Z _{jc} (t)		Impedancia térmica transitoria
D	mm	Diámetro de la vía
t	mm	Espesor del chapado

Capítulo 1

Introducción

Un módulo fotovoltaico es un conjunto de celdas solares fotovoltaicas conectadas en serie y dispuestas sobre una estructura mecánica y robusta. Un módulo fotovoltaico comercial genera entre 330 y 500 W y tiene una dimensión de entre 1.5 y 2 m².

Varios módulos fotovoltaicos son conectados entre sí para alcanzar niveles de tensión y potencia mayores. Una instalación fotovoltaica residencial puede estar conformada por unas cuantas decenas de módulos fotovoltaicos, mientras que una instalación para la generación de energía puede alcanzar los millones de módulos. El conjunto de módulos fotovoltaicos se asocia a uno o varios inversores que convierten la energía en corriente directa generada a corriente alterna. La cantidad de potencia que se puede extraer de un conjunto de módulos fotovoltaicos se maximiza si éste se divide en subconjuntos conformados por paneles con condiciones de operación homogéneas. Para lograr la optimización en el proceso de extracción de energía cada subconjunto debe estar asociado a un convertidor de potencia, como, por ejemplo, un inversor fotovoltaico.

Se conoce como una cadena de módulos fotovoltaicos a varios módulos fotovoltaicos conectados únicamente en serie. Una matriz fotovoltaica se forma cuando varias cadenas se conectan en paralelo. Cuando uno o más paneles fotovoltaicos de una cadena se encuentran en condiciones de irradiación o temperatura distintas se produce un desbalance en las características eléctricas de todo el conjunto que pueden ocasionar deterioro en uno o varios módulos. Para evitar condiciones de deterioro se colocan diodos de paso (*bypass diodes*) cuya función es sacar de operación a los módulos que generan menos potencia. Lo anterior puede ocasionar una reducción significativa en la potencia de generación de los módulos fotovoltaicos.

Las pérdidas de potencia debido a condiciones heterogéneas se pueden mitigar agrupando módulos con condiciones similares. Este agrupamiento se puede realizar por medio de interruptores que conecten eléctricamente los módulos que tienen condiciones similares. Este proceso de interconexión por medio de interruptores se denomina reconfiguración tal y como se menciona en [93].

Ahora bien, las condiciones eléctricas de un módulo fotovoltaico varían en el tiempo con respecto a las condiciones atmosféricas y a su deterioro. En este sentido, es de utilidad que la reconfiguración de módulos fotovoltaicos sea dinámica.

Existen diversas topologías de interruptores que permiten cambiar la posición de un módulo fotovoltaico en una matriz. Estos interruptores han sido implementados normalmente utilizando relés o contactores, los cuales son voluminosos y propensos a fallas.

Como parte integral del proyecto de reconfiguración previamente mencionado, en el Laboratorio de Sistemas Electrónicos para la Sostenibilidad (SESLab) se plantea un circuito de interconexión basado en MOSFET de potencia, lo cual permite reducir significativamente el tamaño y la vida útil del sistema de interconexión.

No obstante, para que un módulo fotovoltaico pueda interconectarse eléctricamente de forma dinámica con otros módulos fotovoltaicos son necesarios cuatro MOSFETs de potencia. Para un sistema de doce módulos harían falta 48 MOSFETs.

Es importante tomar en cuenta que la eficiencia y vida útil de un MOSFET depende de su temperatura de operación. Entre mayor es la temperatura en el dispositivo, menor es su eficiencia y su vida útil. De esta forma, una matriz de interruptores implementada con MOSFET requiere de un análisis detallado de la temperatura, tanto desde el punto de vista estático como dinámico. Incrementos abruptos, o fuera de rango de la temperatura exponen a los transistores de potencia (MOSFET) a alguno de los siguientes efectos dañinos para la integridad de todas sus partes:

1. Envejecimiento prematuro o reducción en el tiempo de vida de los dispositivos de potencia y componentes aledaños.
2. Desprendimiento y posible destrucción de los componentes principales de soporte estructural y los elementos de conducción/aislamiento térmico por incompatibilidad en los coeficientes de expansión.
3. Reducción en la velocidad de conmutación y baja eficiencia por el aumento fuera de los rangos de operación óptimo de los dispositivos de potencia.

1.1 Objetivos y estructura del documento

Objetivo general

Diseñar una estructura para disipar calor con ayuda de modelos matemáticos y herramientas de simulación multifísica, cumpliendo de manera eficaz con las especificaciones operacionales de los semiconductores de potencia de un circuito de reconfiguración dinámica de módulos fotovoltaicos.

Objetivos específicos

- 1) Desarrollar elementos matemáticos de modelado, apoyados en simulaciones numéricas multifísicas, que permitan describir el comportamiento térmico estático y dinámico de un conjunto de MOSFETs, en la placa PCB del circuito de reconfiguración dinámica de los módulos fotovoltaicos.
- 2) Diseñar un sistema de disipación térmica, en donde estén determinados la distribución de los MOSFETs en el PCB, la geometría y el material del disipador de calor, que se aproxime a las especificaciones operacionales de un arreglo de semiconductores de potencia, minimizando el impacto económico y ambiental.
- 3) Validar por medio de simulaciones numéricas la propuesta del disipador y sus determinar sus especificaciones.

Contribuciones del proyecto

Una propuesta de disipación eficaz y confiable para la óptima transferencia de calor de los transistores de potencia (MOSFET) de los módulos fotovoltaicos. Adicionalmente, se abre un abanico de posibilidades para extrapolar los resultados a otros ámbitos industriales que demanden una disipación eficiente en los procesos de transferencia de calor, como es el caso de los enfriadores de agua para los sistemas de aire acondicionado.

Capítulo 2

Marco teórico

El siguiente capítulo tiene como objetivo presentar las bases teóricas sobre las que se sustenta la propuesta de modelado y análisis térmico de semiconductores de potencia para la reconfiguración dinámica de módulos fotovoltaicos. La introducción a la transferencia de calor, sus generalidades, los principios básicos y mecanismos de transferencia de calor se describen en el apéndice B del presente documento. Este apartado inicia, entonces, a partir del planteamiento y modelado teórico del sistema térmico desde el punto de vista fisicomatemático de un circuito eléctrico. Prosigue con el modelado térmico particular del arreglo MOSFET-PCB-disipador de calor. Se introduce el significado de la impedancia térmica, los principios de transferencia de calor por vías térmicas, se presentan las consideraciones generales para el modelado térmico del arreglo semiconductor-PCB con vías-disipador y se finaliza con la presentación de la estrategia de enfriamiento pasivo mediante tubos de disipación de calor.

2.1 Circuitos térmicos y modelado de sistemas

En términos de modelado físico matemático, este apartado inicia con el concepto de pared plana como elemento básico para la transferencia de calor. Continúa con el cálculo de transferencia de calor de un arreglo de aletas (arreglo de paredes planas con diferentes geometrías) e incorpora los dos mecanismos clásicos de transferencia de calor para este particular: convección natural y convección forzada.

2.1.1 Pared plana

Una aplicación inmediata de la ley de Fourier según [2] corresponde al caso de la transmisión del calor unidimensional, estacionaria y sin generación interna de calor, a través de una pared plana, Fig. 1. En este caso, cuando las superficies de la pared se encuentran a temperaturas diferentes, el calor fluye sólo en dirección perpendicular a las superficies.

Si la conductividad térmica es uniforme, la integración de la ecuación (58) del Apéndice B, proporciona:

$$Q_k = -\frac{kA}{L}(T_2 - T_1) = \frac{kA}{L}(T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{kA}} \quad (1)$$

en la que L es el espesor de la pared, T_1 es la temperatura de la superficie de la izquierda en $x = 0$, y T_2 es la temperatura de la superficie de la derecha en $x = L$.

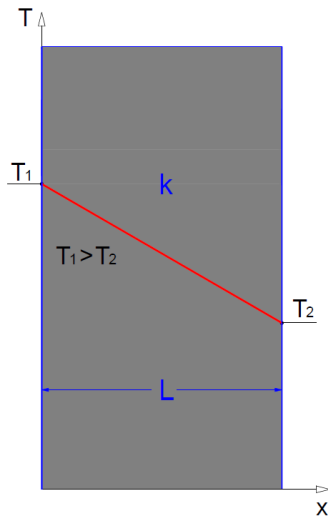


Figura 1. Pared plana.

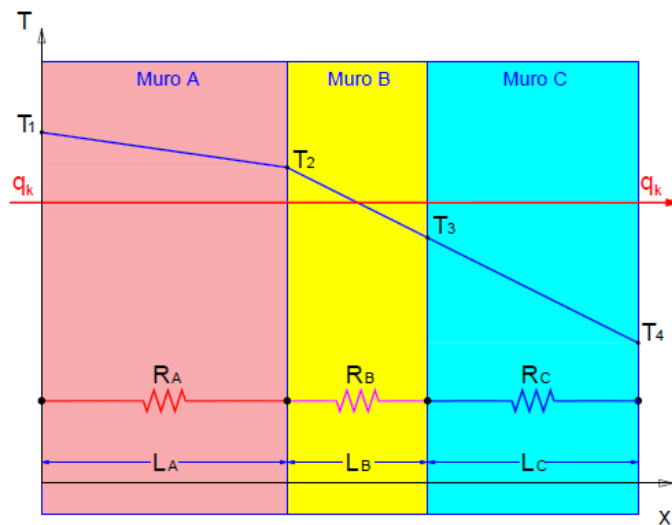


Figura 2. Pared compuesta.

Si se considera un conjunto de n capas en perfecto contacto térmico, el flujo de calor es:

$$Q_k = \frac{T_i - T_{i+1}}{\left(\frac{L}{kA}\right)_i} = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{L}{kA}\right)_i} \quad (2)$$

en la que T_1 y T_{n+1} son la temperatura superficial de la capa 1 y la temperatura superficial de la capa n , respectivamente.

Una aplicación más compleja del enfoque del circuito térmico sería la indicada en la Fig. 3, en la que el calor se transfiere a través de una estructura formada por una resistencia térmica en serie, otra en paralelo y una tercera en serie; para este sistema, el flujo térmico por unidad de superficie es:

$$Q_k = \frac{\Delta T_{global}}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{\Delta T_{global}}{R_A + R_2 + R_D} = \left| \begin{array}{l} \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} \\ R_2 = \frac{R_B R_C}{R_B + R_C} \end{array} \right| = \frac{\Delta T_{global}}{R_A + \frac{R_B R_C}{R_B + R_C} + R_D} \quad (3)$$

en la que n es el número de capas en serie, R_i es la resistencia térmica de la capa i , y ΔT_{global} es la diferencia de temperaturas entre las dos superficies exteriores.

El análisis del circuito precedente supone, por lo tanto, un flujo unidimensional. Si las resistencias R_B y R_C son muy diferentes, los efectos bidimensionales pueden ser importantes.

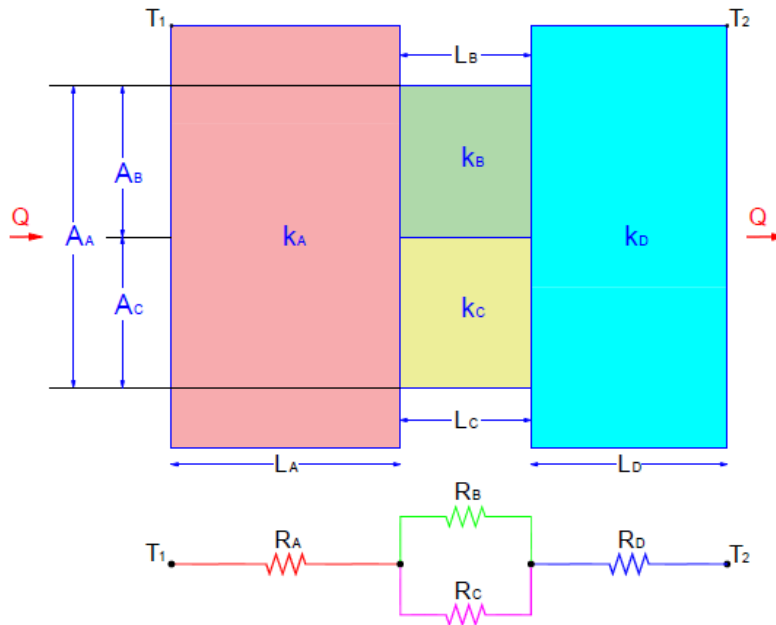


Figura 3. Circuito térmico en serie-paralelo-serie.

La transmisión de calor por convección se puede tratar también dentro de la estructura de una red de resistencias térmicas con la expresión $R_C = 1/(h_C A)$, donde h_C es el coeficiente de convección del calor en una interfaz superficie-fluido de área A , incorporándola fácilmente a una red térmica en la que participen otros mecanismos de transmisión de calor.

El calor transmitido en el ejemplo de la Fig. 4 entre dos fluidos separados por una pared plana, viene dado por:

$$Q = \frac{T_i - T_o}{\sum_{i=1}^3 R_i} = \frac{T_i - T_o}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{h_{Ci} A} + \frac{e}{kA} + \frac{1}{h_{Co} A}} \quad (4)$$

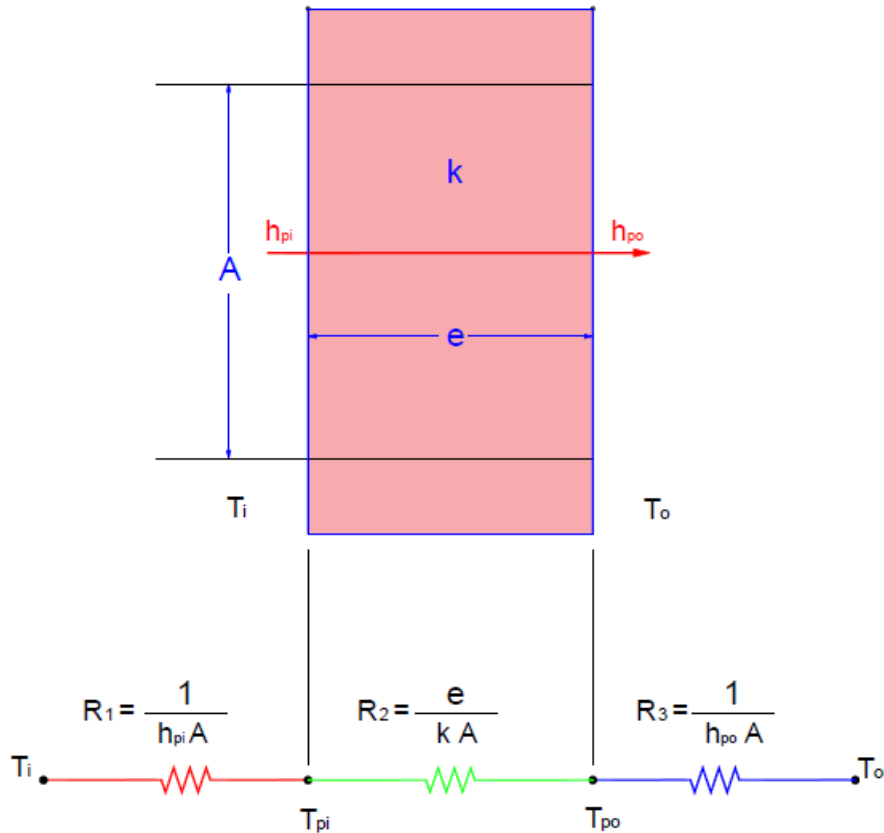


Figura 4. Analogía eléctrica correspondiente a la transmisión de calor a través de una pared plana con convección en sus dos caras.

2.1.2 Cálculo de transferencia de calor de un arreglo de aletas

De acuerdo con la práctica y según [1], los mecanismos de transferencia de calor por convección natural y convección forzada utilizan, para facilidad de cálculo, parámetros adimensionales que han demostrado su versatilidad y grado de exactitud en las estimaciones de capacidad de transferencia para diferentes geometrías características. Específicamente, estos parámetros son: el número de Grashof, el número de Prandtl, el número de Reynolds, el número de Rayleigh y el número de Nusselt. En las siguientes secciones se desglosa el detalle de cálculo para cada uno de ellos.

Caso I. Convección natural

Para el caso de la transmisión de calor por convección natural entre un fluido y un arreglo de aletas, toma mucha relevancia la distribución y el dimensionamiento geométrico del área en contacto hacia el fluido como se muestra a continuación.

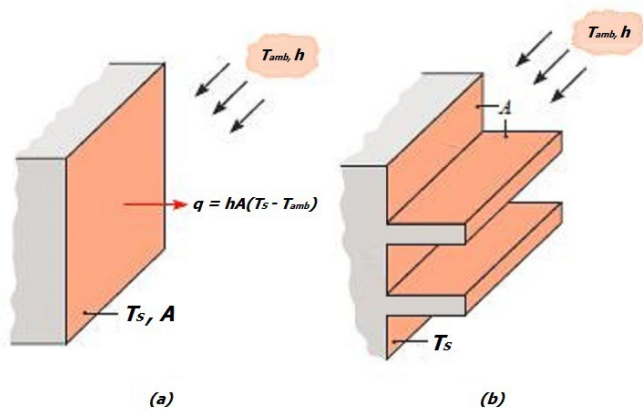


Figura 5. Utilización de aletas para mejorar la transferencia de calor de una pared plana.
 (a) Superficie lisa. (b) Superficie con aletas.

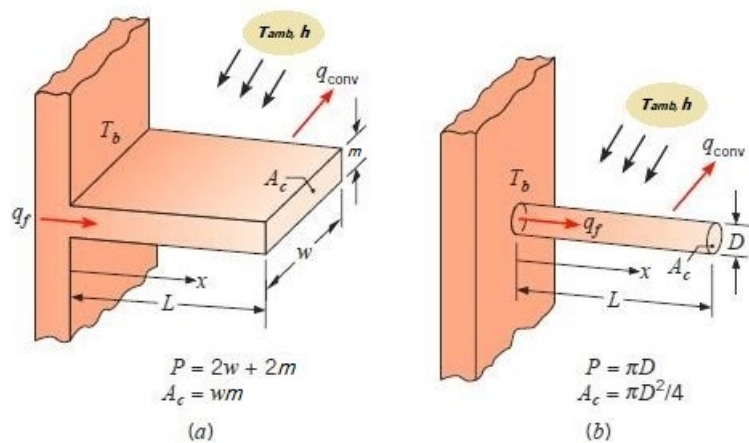


Figura 6. Aletas rectas de sección transversal uniforme. (a) Aletas rectangulares. (b) Aletas cilíndricas.

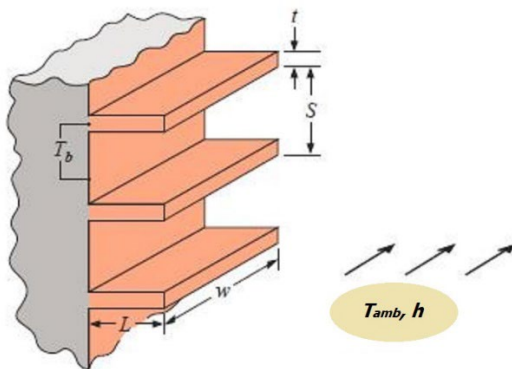


Figura 7. Arreglo característico de múltiples aletas rectangulares.

A continuación, se presenta las principales expresiones para determinar la transferencia de calor en aletas rectangulares y que hacen referencia a las Figs. 5, 6, 7 y 8 :

$$A_f = 2wL_c \quad (5)$$

$$A_c = wm \quad (6)$$

$$L_c = L + (m/2) \quad (7)$$

$$A_p = mL \quad (8)$$

$$p^2 = h_p / (kA_c) \quad (9)$$

$$n_f = \tanh pL_c / (pL_c) \quad (10)$$

$$n_o = 1 - (NA_f/A_t) (1 - n_f) \quad (11)$$

$$A_t = NA_f + A_b \quad (12)$$

$$R_{t,f} = 1 / (hA_f n_f) \quad (13)$$

$$R_{t,o} = 1 / (n_o hA_t) \quad (14)$$

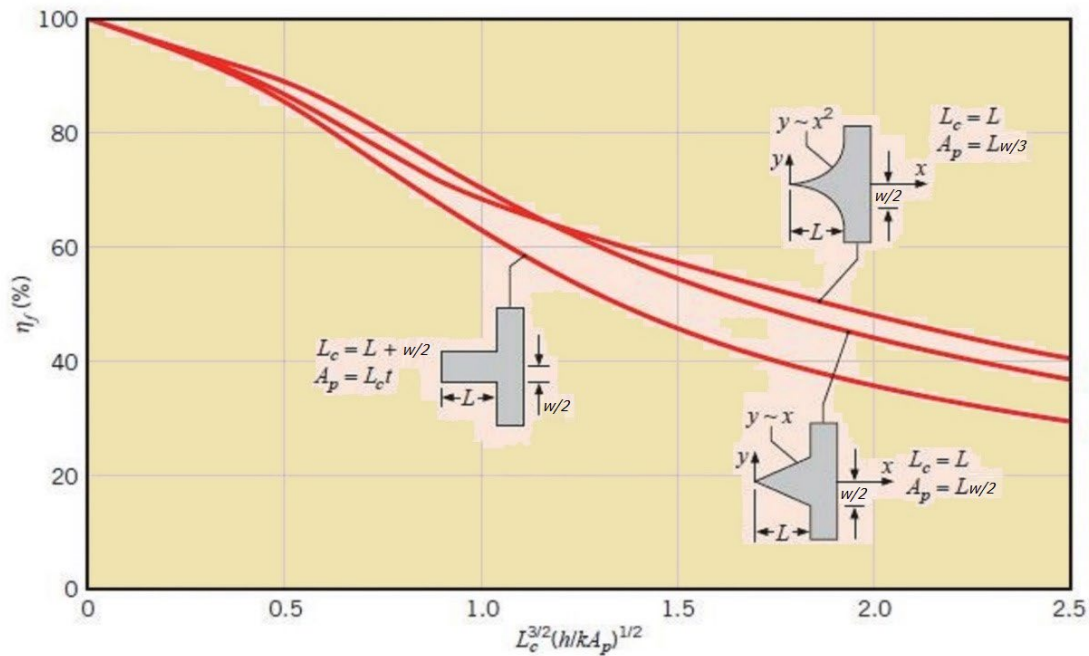


Figura 8. Gráfico de eficiencia de tres perfiles diferentes de aletas rectas (perfil rectangular, triangular y parabólico).

Para aletas delgadas y espaciadas, n_f se aproxima a 1 (véase Fig. 8) por lo tanto n_o también se aproxima a 1. De ahí que el valor de resistencia térmica se determina finalmente con la fórmula general definida para paredes planas:

$$R_{th} = \frac{1}{hA_t} \quad (15)$$

Los parámetros adimensionales que entran en juego son el número de Grashof (Gr), el número de Prandtl (Pr), el número de Rayleigh (Ra) y el número de Nusselt (Nu) y se definen a continuación.

Número de Prandtl (razón entre la difusividad del momento y la difusividad térmica)

$$Pr = c_p \mu / \kappa = \nu / \alpha \quad (16)$$

Número de Grashof (razón entre la fuerza boyante y las fuerzas viscosas)

$$Gr = g \beta (T_s - T_\infty) L^3 / \nu^2 \quad (17)$$

donde

$$\beta = 1/\rho (\partial\rho/\partial T)_p = 1/\rho (p/RT_2) = 1/T \quad (18)$$

Número de Rayleigh (razón entre la fuerza boyante y el producto de la difusividad del momento por la difusividad térmica)

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (19)$$

Sin embargo, la siguiente relación empírica es válida para paredes verticales con una distancia de separación S , siempre que la relación S/L no supere una constante empírica equivalente a la que se indica en la tabla 1.

$$Ra = g \beta (T_s - T_\infty) S^3 / (\alpha \cdot \nu) \quad (20)$$

Número de Nusselt

$$Nu = h \cdot L / k = f(Ra, Pr) \quad (21)$$

$$Nu = \left[\frac{c_1}{(Ra_S S/L)^2} + \frac{c_2}{(Ra_S S/L)^{1/2}} \right]^{-1/2} \quad (22)$$

Condición de superficie	C_1	C_2	S_{opt}	S_{max}/S_{opt}
Placa isotérmica simétrica ($T_{s,1} = T_{s,2}$)	576	2.87	$2.71(Ra_S/S^3L)^{-1/4}$	1.71
Placa isoflujo simétrica ($q''_{s,1} = q''_{s,2}$)	48	2.51	$2.12(Ra_S^*/S^4L)^{-1/5}$	4.77
Placa isotérmica/adiabática ($T_{s,1}, q''_{s,2} = 0$)	144	2.87	$2.15(Ra_S/S^3L)^{-1/4}$	1.71
Placa isoflujo/adiabática ($q''_{s,1} = q''_{s,2} = 0$)	24	2.51	$1.69(Ra_S^*/S^4L)^{-1/5}$	4.77

Tabla 1. Parámetros de transferencia de calor para convección natural entre placas paralelas verticales [3]

Caso II. Convección forzada

Para el caso de la transmisión de calor de un arreglo de aletas por convección forzada, además de la distribución y el dimensionamiento geométrico del área en contacto, toman mucha relevancia la velocidad y el régimen del movimiento del fluido.

Los parámetros adimensionales que entran en juego son el número de Prandtl, el número de Reynolds, el número de Rayleigh y el número de Nusselt y se describen a continuación.

Para facilidad del lector, se repite la formula (16), numero de Prandtl

$$Pr = c_p \mu / \kappa = \nu / \alpha \quad (23)$$

Numero de Reynolds (Razón entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas)

$$Re = VL/\nu \quad (24)$$

Numero de Rayleigh

$$Ra = Re \cdot Pr \quad (25)$$

Para flujo laminar

$$Nu = 0.453 \cdot Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad \text{para todo } Pr \geq 0.6 \quad (26)$$

Para flujo turbulento

$$Nu = 0.0308 \cdot Re_x^{4/5} Pr^{1/3} \quad \text{para todo } 0.6 \leq Pr \leq 60 \quad (27)$$

2.2 Modelado térmico del MOSFET

Un semiconductor de potencia montado en un disipador puede analizarse térmicamente con analogía a los circuitos eléctricos, de forma que el flujo de corriente se reemplaza por el de transferencia de calor y las impedancias eléctricas por las resistencias térmicas. La unidad de transferencia de calor se mide en J/s o W, y la unidad de resistencia térmica en °C/W. Por lo tanto, si P_d es la potencia térmica que se está disipando en un componente, en vatios, y dT es la diferencia de temperatura en el componente en grados centígrados, entonces la resistencia térmica R_{th} del componente está dada por $R_{th} = dT/P_d$ (°C/W) [4].

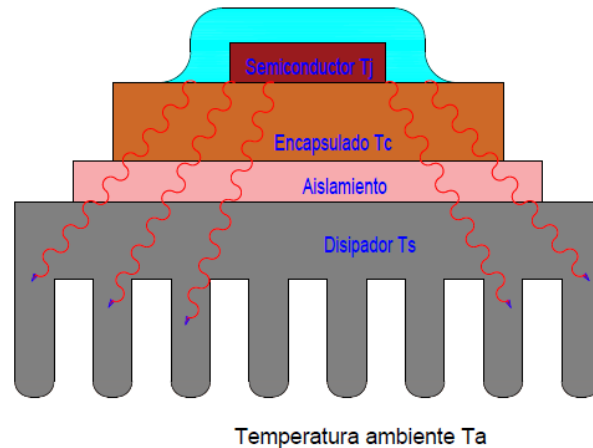


Figura 9. Modelo multicapa de un semiconductor montado sobre un disipador para analizar la transferencia de calor desde el silicio hacia el ambiente.

Para que un semiconductor disipe la potencia demandada, es necesario mantener la temperatura de la unión por debajo del máximo indicado por el fabricante.

El paso de la corriente eléctrica produce un aumento de la temperatura de la unión (T_J). Si ésta se quiere mantener a un nivel seguro, se debe evacuar al exterior la energía calorífica generada por la

unión. Para que se produzca un flujo de energía calorífica de un punto a otro, debe existir una diferencia de temperatura. El calor pasará del punto más caliente al más frío, pero aparecen factores que dificultan este paso, llamados resistencias térmicas ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) y que vienen a indicar el grado de dificultad para evacuar el calor de un dispositivo. Por lo tanto, aprovechando la ley de Ohm se realiza la siguiente comparación eléctrica mostrada en la Fig. 10. En dicho símil, se asemeja las temperaturas a tensiones, las resistencias térmicas a las resistencias óhmicas y el flujo de calor o potencia disipada a una corriente eléctrica [5].

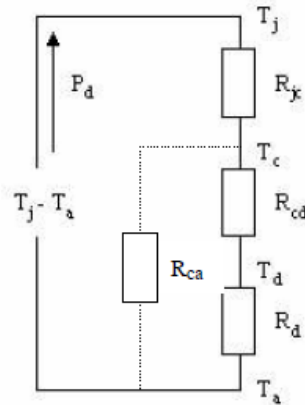


Figura 10. Equivalente circuital ley de Ohm eléctrica/térmica [5].

Inicialmente, cuando no se tiene un elemento refrigerador, radiador o disipador, R_d en la Fig.10, la resistencia es $R_{jc} + R_{ca} = R_{ja}$ que nos dará la máxima potencia que es capaz de disipar el dispositivo en ausencia del elemento refrigerador. Como R_{ca} es elevada, se introduce un elemento disipador que reducirá la resistencia final: $R_{ca} \gg R_{cd} + R_d$.

Según [5] al igual que en un circuito eléctrico, se puede decir que:

$$T_j - T_a = P_d \cdot R_{ja} \quad (28)$$

La ecuación (28) corresponde a la formulación matemática de la llamada Ley de Ohm térmica, en donde:

T_j = temperatura de la unión del semiconductor

T_a = temperatura ambiente

P_d = potencia que disipa el dispositivo

R_{ja} = resistencia térmica entre la unión y el ambiente

De la Fig. 10 se obtiene la expresión para cuando existe elemento disipador:

$$P_d = \frac{T_j - T_a}{R_{jc} + R_{cd} + R_d} \quad (29)$$

y la expresión para cuando no existe elemento disipador:

$$P_d = \frac{T_j - T_a}{R_{jc} + R_{ca}} \quad (30)$$

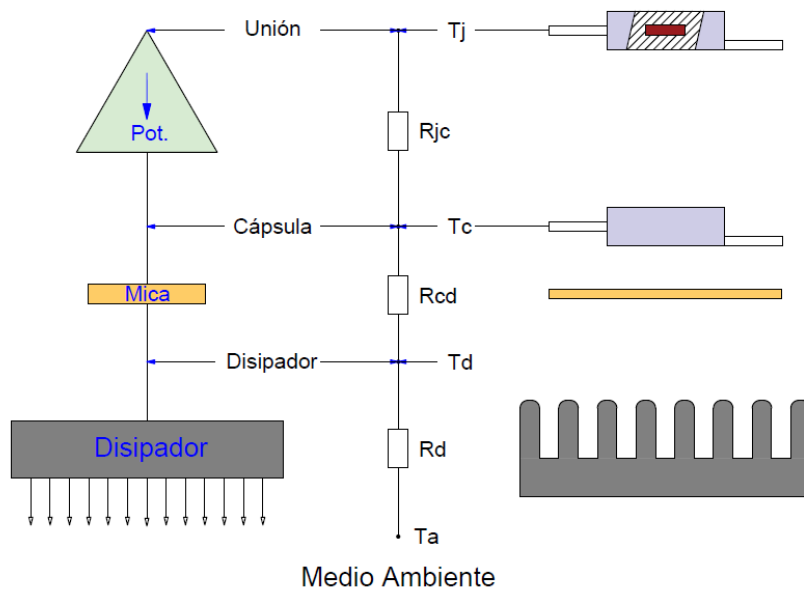


Figura 11. Comparativa con los elementos de un montaje real.

2.2.1. Temperatura máxima de la unión (T_{jmax})

La temperatura máxima de la unión (T_{jmax}) representa el límite superior de temperatura a la que no se debe llegar y, por supuesto, no sobrepasar si se quiere evitar la destrucción de la unión o del dispositivo semiconductor. Este dato es un valor que se suele suministrar, normalmente, en los manuales de los fabricantes de semiconductores. Si este valor no se refleja en dichos manuales o, simplemente, no se encuentra, se pueden adoptar unos valores típicos en función del dispositivo a refrigerar como los mostrados en la tabla 2.

Dispositivo	Rango de T_{jmax}
De unión de germanio	Entre 100 °C y 125 °C
De unión de silicio	Entre 150 °C y 200 °C
JFET	Entre 150 °C y 175 °C
MOSFET	Entre 175 °C y 200 °C
Tiristores	Entre 100 °C y 125 °C
Transistores uniunión	Entre 100 °C y 125 °C
Diodos de silicio	Entre 150 °C y 200 °C
Diodos Zener	Entre 150 °C y 175 °C

Tabla 2. Valores típicos de variación de T_{jmax} [5].

2.2.2. Máxima Potencia de Disipación Permitida

De acuerdo con [6], en equilibrio térmico, la disipación de potencia máxima P_D (máx.) de un MOSFET de potencia puede expresarse de la siguiente manera en términos de temperatura ambiente, T_a , temperatura máxima del canal del MOSFET T_{ch} (máx) y el canal a la resistencia térmica ambiente $R_{th}(ch-a)$, según lo determinado por las condiciones de disipación de calor discutidas en esta sección.

$$P_d(max)(T_a) = \frac{T_{ch(max)} - T_a}{R_{th(ch-a)}} \quad (31)$$

El flujo de calor se puede modelar por analogía a un circuito eléctrico. Usando este modelo, el flujo de calor desde el canal de un MOSFET al aire ambiente se deriva de las resistencias térmicas y capacidades térmicas [6].

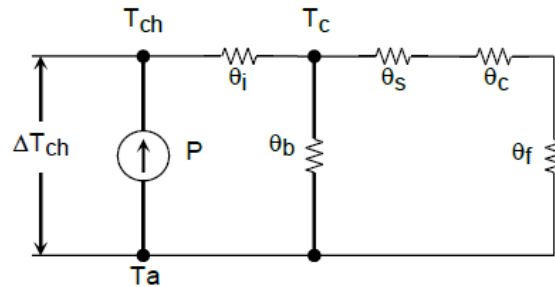


Figura 12. Circuito equivalente térmico del MOSFET en estado estacionario [8].

- θ_i : resistencia térmica interna (canal a paquete)
- θ_b : resistencia térmica externa (paquete a aire ambiente)
- θ_s : resistencia térmica de un escudo de aislamiento
- θ_c : resistencia térmica de contacto (en la interfaz con una aleta térmica)
- θ_f : resistencia térmica del disipador de calor.

$$R_{th(ch-a)} = \theta_i + \frac{\theta_b(\theta_s + \theta_c + \theta_f)}{(\theta_b + \theta_s + \theta_c + \theta_f)} \quad (32)$$

2.3 Impedancia térmica

Si se trabaja en régimen transitorio, por ejemplo en régimen de impulsos, el modelo térmico debe ser modificado para contar con la capacidad térmica introducida por la unión, el encapsulado, el aislante y el disipador, pues la temperatura de la unión puede sobrepasar los valores que permite calcular la expresión (según Fig. 10) [5].

$$T_j - T_c = (P_d \cdot R_{jc}) \quad (33)$$

En la ecuación anterior, R_{jc} es la resistencia térmica unión-encapsulado en régimen estable o permanente (transcurrido un tiempo suficientemente grande). Es necesario entonces recurrir al concepto de impedancia térmica.

Como ya se ha comentado, para estas aplicaciones, el modelo térmico debe ser modificado para contar con la capacidad térmica introducida por la unión, el encapsulado, el aislante y el disipador. Un

modelo térmico que contempla la operación pulsante es el mostrado en la Fig. 13 donde cada componente lleva asociada su capacidad térmica correspondiente.

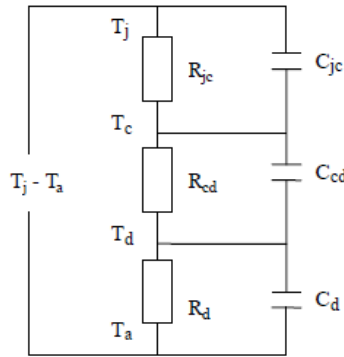


Figura 13. Circuito equivalente eléctrico con el modelo de impedancia térmica [5].

Para un elemento estructural dado, C_t depende del calor específico, c , del volumen, V y de la densidad, ρ , de acuerdo con la expresión:

$$C_t = c \cdot \rho \cdot V \quad (34)$$

donde únicamente se considerará el volumen que se calienta cuando se disipa la potencia.

En el circuito eléctrico de la Fig. 13, que representa la analogía con el comportamiento térmico, se pueden ver una serie de grupos $R_t - C_t$ cada uno con su correspondiente constante de tiempo característica $\tau = R_t \cdot C_t$. El valor de esta constante de tiempo determina si cada uno de los grupos $R_t - C_t$ alcanza el equilibrio rápida o lentamente. Cada grupo produce un incremento de temperatura que viene dado por la expresión:

$$\Delta T = t_2 - t_1 = R_t \cdot P_d \cdot \left[1 - e^{\frac{-t}{R_t C_t}} \right] \quad (35)$$

donde R_t es la resistencia térmica del grupo $R_t - C_t$ y C_t es la capacidad térmica del grupo $R_t - C_t$ y se mide en $J/^\circ C$.

Cuando se aplica un pulso de potencia, la temperatura va aumentando de valor con la consiguiente carga de las capacidades térmicas. A partir de este momento el valor alcanzado en régimen estable depende solamente de las resistencias térmicas. Si a esta red se aplica un pulso de potencia, el valor de pico para T_j depende de la amplitud del pulso de potencia y de la anchura del pulso de potencia, t_{on} .

En la Fig. 14 se muestra la respuesta de T_j a dos pulsos de diferente anchura, pero del mismo valor de pico. De dicha figura se puede observar que, si se aplica un pulso lo suficientemente ancho, la temperatura de la unión alcanzará el régimen estable. Si la duración del pulso aplicado no permite a T_j llegar al régimen permanente, la impedancia térmica cobra importancia relevante [5].

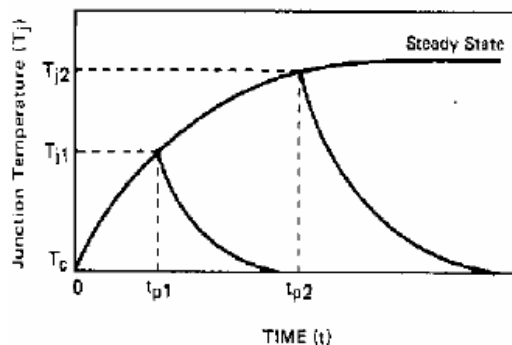


Figura 14. Respuesta a dos pulsos de temperatura [5].

La variación de la impedancia térmica, $Z_{jc}(t)$, con la anchura del pulso la puede proporcionar el fabricante directamente, pero lo normal es que suministre una curva como la mostrada en la Fig. 15.

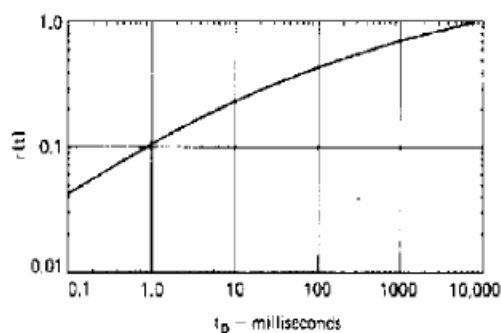


Figura 15. Curva del fabricante para el cálculo de $Z_{jc}(t)$ [5].

En la Fig. 15 se utiliza $r(t)$ que es el resultado de normalizar la impedancia térmica transitoria $Z_{jc}(t)$ con la resistencia térmica R_{jc} (en régimen estable) de la siguiente forma:

$$r(t) = \frac{Z_{jc}(t)}{R_{jc}} \quad (36)$$

donde $Z_{jc}(t)$ es la impedancia térmica transitoria, R_{jc} es la resistencia térmica en régimen estable y $r(t)$ es la resistencia térmica normalizada (inferior a la unidad).

Para pulsos de corta duración, $r(t)$ es bastante pequeño, pero al incrementarse t_{on} , $r(t)$ se aproxima a la unidad. Esto quiere decir que para pulsos de larga duración la impedancia transitoria $Z_{jc}(t)$ se aproxima a la resistencia R_{jc} en régimen estable.

Conociendo t_{on} , es posible obtener $r(t)$ a partir de la Fig. 15 y la impedancia térmica se obtiene utilizando la expresión:

$$Z_{jc}(t) = r(t) \cdot R_{jc} \quad (37)$$

En algunas ocasiones el fabricante suministra las curvas de la resistencia térmica transitoria para trenes de pulsos en función del ciclo de trabajo (D), tal y como se puede observar en la Fig. 16 y la Fig. 17.

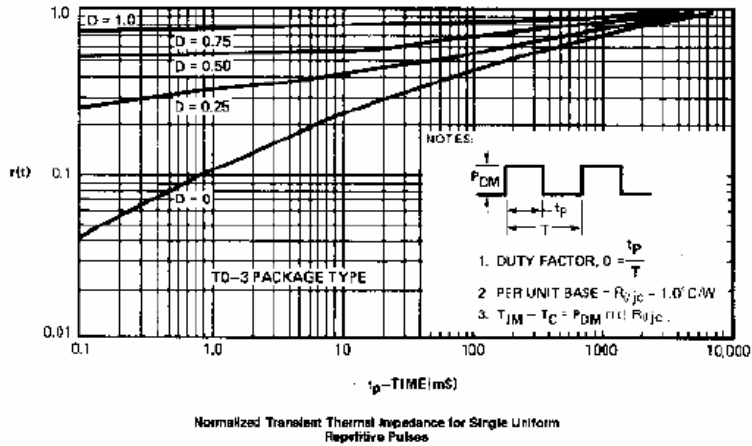


Figura 16. Resistencia térmica para un tren de pulsos [5].

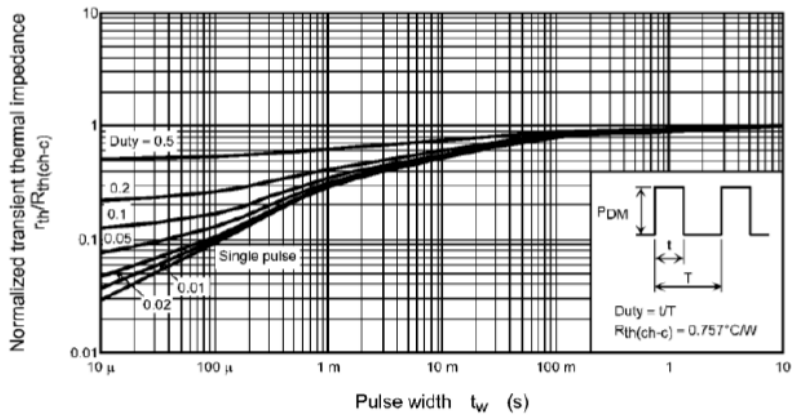


Figura 17. Curvas de resistencia térmica transitoria [6].

2.4 Principio de transferencia de calor por vías térmicas

En [7] se muestra una técnica para diseñar una placa de circuito impreso (PCB) de bajo costo que optimiza la transferencia de calor del LED. La técnica implica el uso de PCB basadas en *FR-4*, que cuestan menos que las placas de circuito impreso de núcleo de metal (MCPCB), pero tienen una mayor resistencia térmica. El uso de orificios o vías revestidos de metal debajo de las almohadillas térmicas LED es un método para disipar el calor a través de una PCB *FR-4* y en un disipador de calor apropiado.

FR-4 es uno de los materiales de PCB usados más comúnmente y es la designación de la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA) para un *laminado epoxi reforzado con fibra de vidrio y retardante de llama* (“*flame retardant*” por sus siglas en inglés). Un resultado de esta construcción es que *FR-4* tiene muy baja conductividad térmica.

La Fig. 18 a continuación muestra una geometría de sección transversal típica para una placa *FR-4* de dos capas.

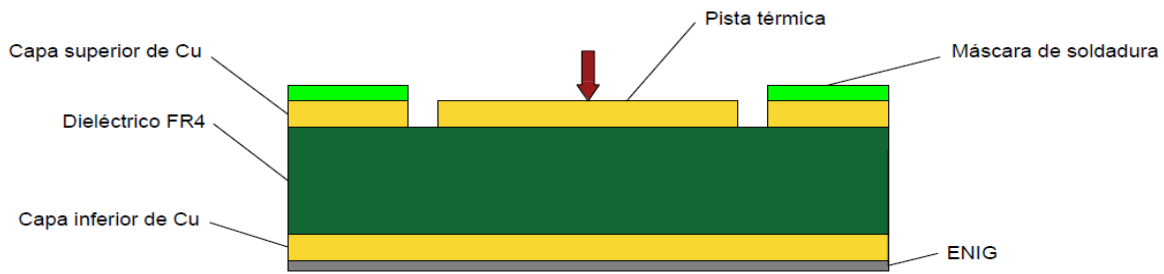


Figura 18. Geometría de sección transversal típica para una placa FR-4 de dos capas (sin escala).

2.4.1 Diseño de vias térmicas

Una forma económica según [7], de mejorar la transferencia térmica para los PCB *FR-4* es agregar conductos térmicos (agujeros pasantes plaqueados) (PTH) entre las capas conductoras. Las vias se crean perforando agujeros y recubriéndolos con cobre, de la misma manera que se usa una PTH o vía para las interconexiones eléctricas entre capas.

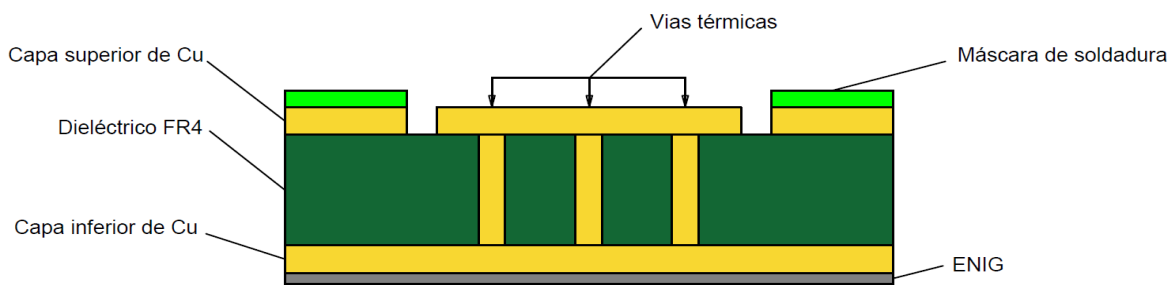


Figura 19. Geometría de sección transversal típica para una placa FR-4 con vias térmicas (sin escala).

Agregar vias de forma adecuada mejorará la resistencia térmica de una placa *FR-4*. La resistencia térmica de una sola vía se puede calcular con la misma fórmula, $\theta = l / (k \cdot A)$. Cuando se usan N -vias, el área aumenta por un factor de N_{vias} , lo que resulta en:

$$\theta_{vias} = l / (N_{vias} \cdot k \cdot A) \quad (38)$$

Hay que tener en cuenta que esto solo es aplicable si la fuente de calor es directamente normal a la vía térmica; de lo contrario, la resistencia aumenta debido a los efectos de expansión térmica. Para calcular la resistencia térmica total para la región debajo (o normal) de la almohadilla térmica, se debe determinar la resistencia térmica equivalente para la capa y las vias dieléctricas. Para simplificar, las dos resistencias se tratan en paralelo aplicando la expresión siguiente:

$$\theta_{vias} \parallel FR-4 = [(1/\theta_{vias}) + (1/\theta_{FR-4})]^{-1} \quad (39)$$

2.4.2 Vías huecas vs. vías rellenas

Las vías huecas dan como resultado una mayor resistencia térmica que las vías rellenas porque el área normal a la fuente de calor se reduce según la fórmula:

$$A = j \cdot [D \cdot (w - w_2)] \quad (40)$$

donde j es el número de vías, D es el diámetro de la vía y $(w - w_2)$ es el espesor del chapado.

Para un diámetro de 0,6 mm con recubrimiento de cobre de 35 μm (1 oz), el área normal a la almohadilla térmica es de solo 0,06 mm^2 en comparación con 0,28 mm^2 para una vía con soldadura. Lo anterior da como resultado una resistencia térmica de 64 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ por vía, comparado con 42 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ si se rellena con soldadura o 14 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ si se rellena completamente con cobre.

En general, el aumento del grosor del chapado durante la producción de PCB mejora la resistencia térmica de las vías. En el ejemplo anterior, aumentar el espesor de recubrimiento a 70 μm (2 oz) disminuye la resistencia térmica a 34 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ por vía.

Las vías huecas pueden rellenarse con soldadura durante el reflujo. Sin embargo, dependiendo de una serie de factores, esto puede no ocurrir de manera confiable y, como resultado, las vías conducirán el calor de manera menos efectiva.

Una opción para crear una vía sólida es llenar las vías con un material térmicamente conductor, como epoxi, como parte del proceso de fabricación de PCB. Esto agrega un paso adicional a la fabricación y puede aumentar el costo de la placa [7].

2.5 Modelado térmico del semiconductor-PCB con vías-disipador

La razón principal de las deficiencias de los sistemas eléctricos además del polvo, la vibración y la humedad es, con mucho, el impacto de la temperatura. Por lo tanto, un concepto de gestión térmica eficiente en la PCB es crucial para la fiabilidad de los sistemas electrónicos de potencia.

Una eliminación de calor efectiva puede basarse en una trayectoria corta de conducción de calor a un disipador de calor perpendicular a través de la PCB (por ejemplo, vías térmicas) o mediante una capa conductora que actúa como un difusor de calor lateral (almohadillas térmicas extendidas) o una combinación de ambas.

Existen muchos desarrollos diferentes y bien conocidos para estos conceptos de eliminación de calor en PCB. Los enfoques de cobre grueso en los PCB garantizan un muy buen efecto de expansión del calor lateral, debido a la excelente conductividad térmica del cobre y se usan muy bien para reducir los puntos calientes.

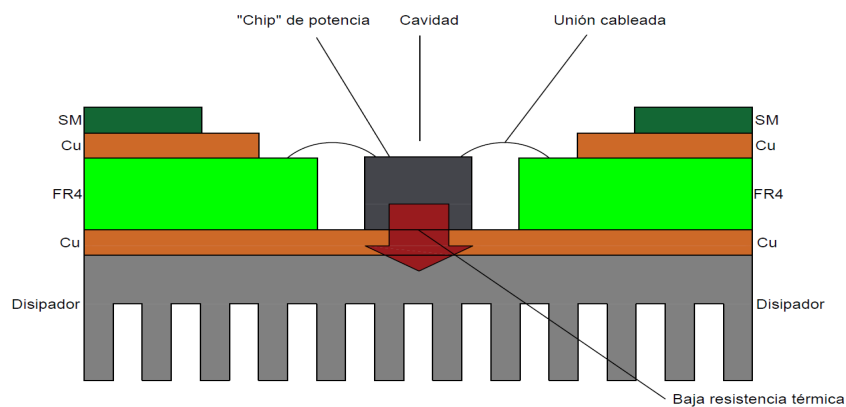


Figura 20. Chip montado en una cavidad con ruta térmica optimizada.

2.5.1 Ruta de disipación térmica

De acuerdo con [8], el enfriamiento del lado inferior con un disipador de calor a través de PCB es el método de enfriamiento más efectivo para el semiconductor GaNPX. Las rutas primarias de disipación de calor del paquete GaNPX, montadas en la PCB, se ilustran en la Fig. 21. La mayoría del calor generado en la matriz fluye hacia la almohadilla térmica y luego se transfiere a la PCB. Los planos de cobre en la PCB están cumpliendo ya que los difusores de calor y las vías térmicas proporcionan una ruta de baja resistencia térmica, desde el lado superior de cobre al inferior de la PCB. Un disipador de calor se conecta al plano de cobre inferior a través de un material de interfaz térmica (TIM) y disipa el calor al ambiente.

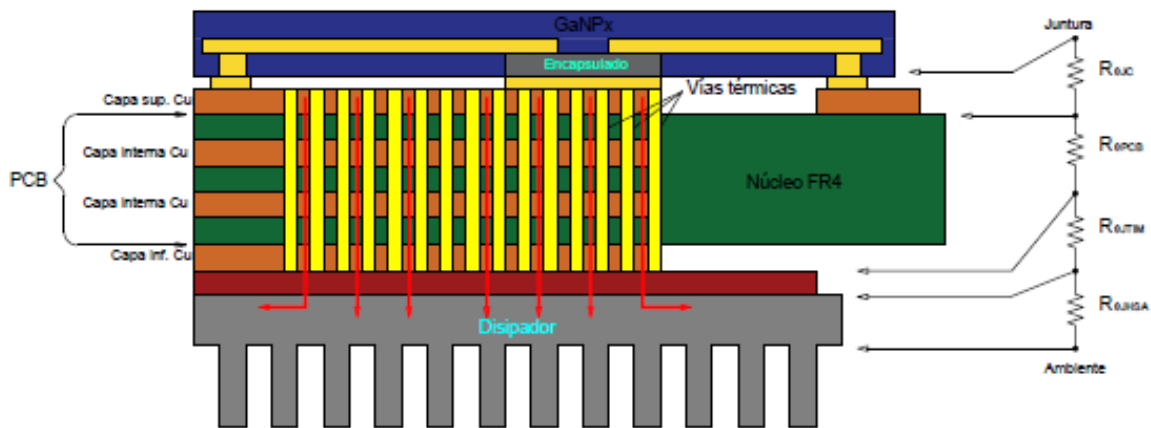


Figura 21. Vista de la sección transversal del paquete semiconductor GaNPX y la ruta de disipación térmica.

$R_{\theta HS}$ es la resistencia térmica total desde la juntura hasta la superficie del disipador y está definida como:

$$R_{\theta HS} = R_{\theta JC} + R_{\theta PCB} + R_{\theta TIM} \quad (41)$$

2.5.2 Ruta de enfriamiento de doble cara

Como se menciona en la sección 2.5.1 y en [8], durante el enfriamiento tradicional del GaNPX, el calor es transferido desde la matriz a través del PCB al disipador térmico. GaNPX es un paquete muy delgado, con un grosor de 0,45 mm. La eliminación adicional de calor se puede crear mediante el uso de disipador de calor en la parte superior del paquete, que está cubierto por una capa de máscara de soldadura y serigrafía. Tiene una superficie irregular y no está diseñado para soportar alto voltaje o proporcionar aislamiento de seguridad. Si se conecta un disipador de calor en la parte superior del paquete, se debe agregar una capa de material de interfaz con aislamiento de alto voltaje (HV) entre el disipador de calor y la superficie superior del dispositivo, para llenar el espacio y proporcionar aislamiento de seguridad.

La configuración de simulación térmica para el enfriamiento a doble cara se muestra en la Fig. 22. El dispositivo GS66508P se montó en PCB de 4 capas y 1,6 mm con 123 vías térmicas GAP3000S30R, 0,25 mm de espesor y conductividad térmica de 3 W/m·K. La capa TIM se utilizó en la parte superior

del paquete y se asumieron disipadores de calor infinitos en la parte superior del paquete y en la parte inferior de la capa TIM, debajo de la PCB, proporcionando temperaturas de 25 ° C en las capas de TIM.

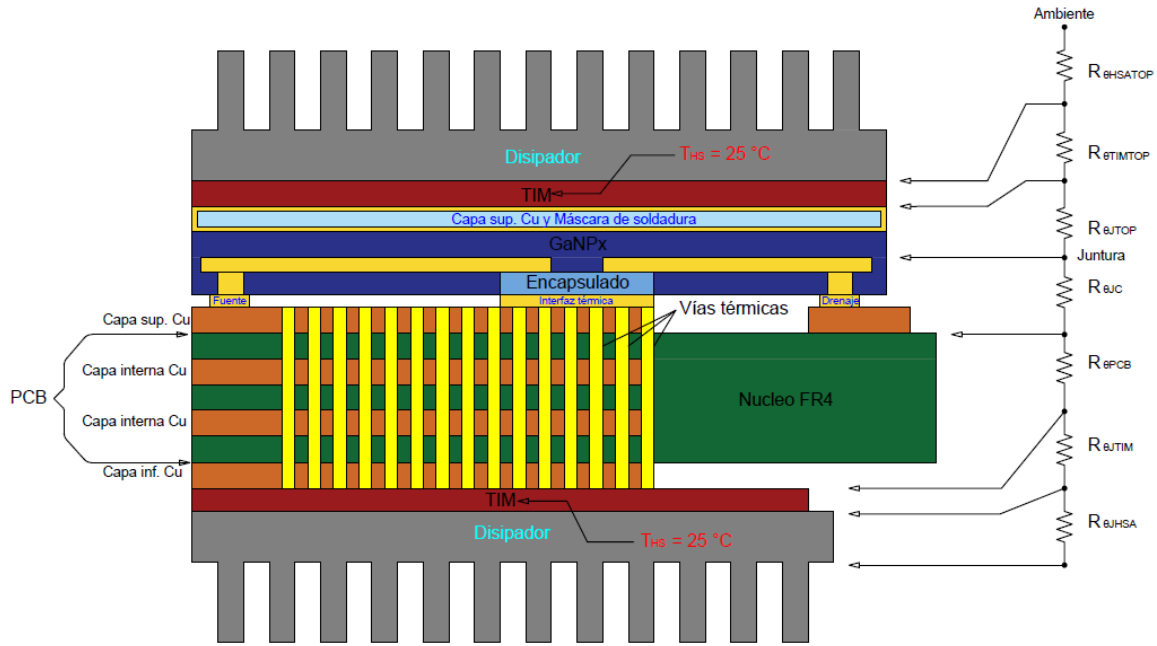


Figura 22. Configuración de la simulación del enfriamiento térmico de doble cara.

Según [8], la resistencia térmica $R_{\theta JHS}$ se puede calcular utilizando un modelo unidimensional. Como el calor se transfiere a través de los lados superior e inferior del paquete, se deben considerar las resistencias térmicas a los lados superior e inferior. La resistencia térmica junta-disipador puede calcularse usando la ecuación para la conexión en paralelo de resistencias térmicas:

$$R_{\theta JHS} = \frac{R_{\theta JHSBottom} \cdot R_{\theta JHSTop}}{R_{\theta JHSBottom} + R_{\theta JHSTop}} \quad (42)$$

donde:

$R_{\theta JHSBottom}$ - resistencia térmica junta-disipador inferior [véase (25)]

$R_{\theta JHSTop}$ - resistencia térmica junta-disipador superior que está definida como:

$$R_{\theta JHSTop} = R_{\theta JTop} + R_{\theta TIMTop} \quad (43)$$

2.6 Estrategia de enfriamiento pasivo mediante tubos de disipación de calor

2.6.1 Antecedentes

Los tubos planos de disipación de calor (“*flat heat pipes*” por su nombre en inglés) se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde sistemas microelectrónicos hasta grandes dispositivos de enfriamiento en la industria de naves espaciales.

El siguiente modelo desarrollado con el software de simulación COMSOL (Fig. 23), muestra la configuración básica para representar los mecanismos de transferencia de calor en un tubo plano de disipación de calor. El enfoque también se puede usar en otras configuraciones de tubos de disipación de calor (“*heat pipes*”). El modelo puede analizar la influencia de diferentes parámetros de geometría o condiciones de operación. Este modelo no predice los límites operativos del tubo de disipación de calor.

2.6.2 Evaluación de los límites de operación

Estimación de los límites de operación antes de la simulación en COMSOL.

En la mayoría de los casos, el efecto limitante se debe a la presión capilar, expresada como:

$$\Delta p_c = \frac{2\sigma}{r_c} \quad (44)$$

debe ser mayor que todas las otras caídas de presión en la tubería (caída de presión de vapor, caída de presión del líquido y efecto de la gravedad):

$$\Delta p_c = \Delta p_v + \Delta p_l + \Delta p_g \quad (45)$$

$$\Delta p_l = \left(\frac{\mu_l}{K A_w L_v \rho_l} \right) L_{eff} q \quad (46)$$

La caída de presión de vapor Δp_v a menudo puede despreciarse y sin efectos de gravedad $\Delta p_g \approx 0$ entonces: $\Delta p_c = \Delta p_l$

El límite de capilaridad, que representa q es:

$$q = \frac{2\sigma K A_w L_v \rho_l}{L_{eff} r_c \mu_l} \quad (47)$$

donde:

μ_l (Pa · s)	Viscosidad dinámica del líquido
ρ_l (kg/m ³)	Densidad del líquido
L_{eff} (m)	Largo efectivo del tubo de calor
σ (N/m)	Tensión superficial
r_c (m)	Radio de capilaridad
K (m)	Permeabilidad de la malla
A_w (m ²)	Área transversal de la malla
L_v (J/kg)	Calor latente de evaporación

2.6.2 Supuestos

En la modelación, se supone que los efectos de gravedad pueden ser despreciados, la transferencia de calor es debida principalmente a la evaporación/condensación y convección de vapor, de modo que el transporte de calor se simplifica como conducción con un coeficiente de transferencia de calor efectivo. Además, se asume que las propiedades materiales se mantienen constantes, con excepción de la densidad de vapor.

2.6.3 Geometría y condiciones de operación

Se considera un tubo plano de disipación de calor (“*Flat Heat Pipe*” por su denominación en inglés) de cobre relleno de agua, una malla de polvo de cobre sinterizado, modelando solamente $\frac{1}{4}$ de la cámara por razones de simetría.

En este modelo particular, se considera un coeficiente de transferencia de calor por convección y una temperatura ambiente exterior, respectivamente iguales a $h = 1100 \frac{W}{m^2K}$ y $T_{ext} = 301K$.

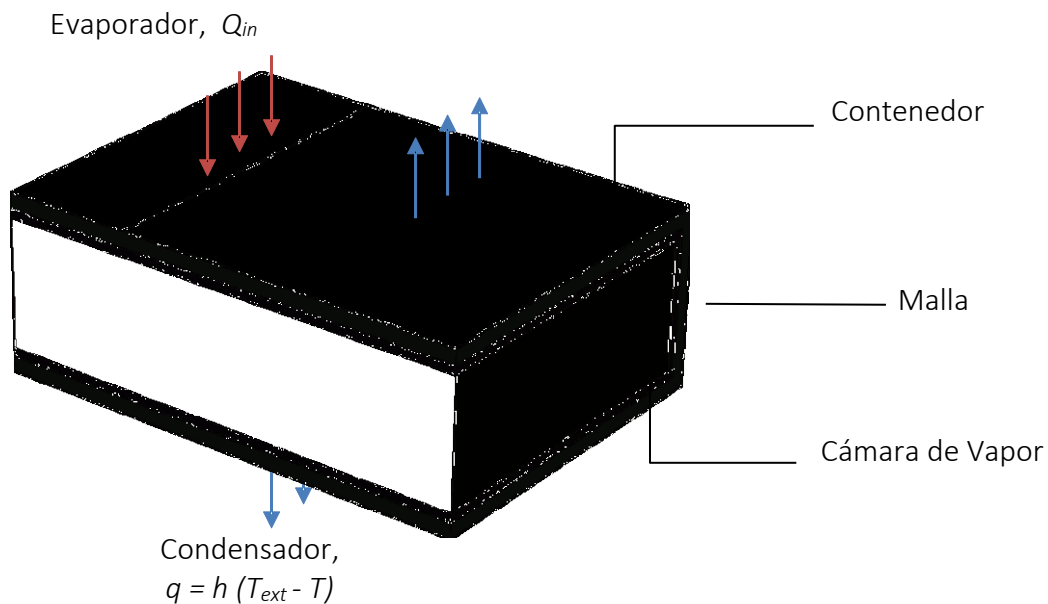


Figura 23. Diagrama general de un segmento de “Heat Pipe” para la simulación en COMSOL

2.6.4 Configuración del modelo

Interfaces

Se asume un flujo no isotérmico y una interfaz multifísica laminar para modelar la transferencia de calor por convección y conductividad, junto con el mecanismo de evaporación / condensación. También se supone un flujo laminar en la cámara de vapor y una transferencia de calor en pared, malla y cámara de vapor.

Límites de operación

Para el límite de capilaridad se utilizan los siguientes valores:

$$\begin{aligned}\sigma &= 0.073 \text{ N/m} \\ K &= 7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \\ A_w &= 523.8 \text{ mm}^2 \\ L_v &= 2473 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ \rho_L &= 1000 \text{ kg/m}^3 \\ r_c &= 0.031 \text{ mm} \\ \mu_l &= 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s} \\ q &\approx \frac{2\sigma K A_w L_v \rho_L}{L_{eff} r_c \mu_l} \\ q &\approx 900 \text{ [W]}\end{aligned}$$

Para la pared porosa se toma una malla de polvo de cobre sinterizado, conductividad térmica efectiva (porosidad $\varphi = 0.5$)

$$k_{eff} = \frac{k_f(k_f+k_s-(1-\varphi)(k_f-k_s))}{k_f+k_s+(1-\varphi)(k_f-k_s)} \quad (48)$$

La densidad de vapor se define de acuerdo con la Ley del Gas Ideal, i.e.,

$$\rho = \frac{p}{R_s T} \quad (49)$$

Configuración del flujo

Flujo Compresible Laminar

Entrada / salida en el lado del evaporador / condensador de la interfaz de malla / vapor con presión de saturación (de Clausius-Clapeyron):

$$p = p_{sat}(T) = p_{ref} \cdot \exp\left(\frac{\lambda}{R_s} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (50)$$

Flujo de masa resultante (normal) de agua de evaporación/condensación:

$$\dot{m} = \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \text{ en la interfaz malla/vapor} \quad (51)$$

Se incluye la disipación viscosa

Configuración de la transferencia de calor

Conducción de calor en contenedor y malla

Conducción y convección en cámara de vapor

Fuente de calor límite que representa el calor de evaporación / condensación:

$$q = \dot{m} \cdot \lambda \quad (52)$$

Metodología

Los estudios correlacionales miden el grado de asociación entre dos o más variables (cuantifican relaciones), es decir miden cada variable presuntamente relacionada y, después, miden y analizan la correlación. Tales correlaciones se sustentan en hipótesis sometidas a prueba. Es importante recalcar que, en la mayoría de los casos, las mediciones de las variables a correlacionar provienen de los mismos sujetos, pues no es lo común que se correlacionen mediciones de una variable hechas en ciertas personas, con mediciones de otra variable realizadas en personas distintas.

Para el caso de esta investigación, según Hernández Sampieri en [14] se puede decir que se trata de un estudio cuantitativo correlacional. De acuerdo con la estimación y los objetivos planteados, esta investigación constituye particularmente un estudio correlacional ya que los antecedentes y la revisión bibliográfica proporcionan generalizaciones que vinculan variables (hipótesis) sobre las cuales trabajar. Los estudios correlacionales, señala Sampieri, pretenden determinar cómo se relacionan o vinculan diversos conceptos, variables o características entre sí o, también, si no se relacionan [14]. En este caso la corriente eléctrica en un conductor y la generación de calor por efecto Joule son ejemplos claros de correlación en un dispositivo semiconductor de potencia. Por su parte, la configuración geométrica del disipador de calor, la distribución espacial de los semiconductores de potencia en la superficie de intercambio de calor y el área total externa que se expone al ambiente, se correlacionan con el proceso de disipación general de calor, y este con la temperatura del encapsulado del semiconductor, que se espera ser demostrado en la investigación.

3.1 Diseño de la investigación

De acuerdo con la selección que indica Sampieri en [14], por tratarse esta investigación y la hipótesis de tipo correlacional, el diseño de la investigación es cuasi experimental.

Los diseños cuasi experimentales manipulan deliberadamente, al menos, una variable independiente para observar su efecto y relación con una o más variables dependientes, sólo que difieren de los experimentos “puros” en el grado de seguridad o confiabilidad que pueda tenerse sobre la equivalencia inicial de los grupos. En los diseños cuasi experimentales los sujetos no se asignan al azar a los grupos ni se emparejan, sino que dichos grupos ya están formados antes del experimento: son grupos intactos (la razón por la que surgen y la manera como se formaron es independiente o aparte del experimento). De ahí que sea un método menos preciso. Este es el caso para el presente tema de investigación, donde se tiene preestablecido el arreglo de la estructura para la disipación de calor: MOSFET-PCB con vías de disipación-disipador.

Sampieri indica que en la investigación correlacional existe el riesgo de que se presente una correlación espuria: el caso hipotético de que dos variables estén aparentemente relacionadas, pero que en la realidad no sea así. Podría ser el ejemplo de la temperatura de la capsula del MOSFET y la corriente de drenaje o “*drain*” (I_D).

La manipulación deliberada de una o más variables independientes al igual que el diseño experimental es requisito indispensable para el diseño cuasi experimental.

A pesar de que el diseño cuasi experimental carece de ciertas condiciones de robustez estadística como son la aleatoriedad y la selección al azar de los grupos que conforman el experimento, sigue siendo una metodología bastante robusta, por los resultados que puede arrojar desde el punto de vista de correlación multivariable.

3.2 Materiales y Herramientas

Los elementos de estudio de la investigación responden específicamente a la necesidad de desarrollar elementos matemáticos de modelado apoyados en simulaciones numéricas multifísicas. Esto con el propósito de diseñar un sistema de disipación térmica, determinando la distribución de los MOSFETs del sistema de recombinación para los módulos fotovoltaicos en el PCB, la geometría y el material del disipador de calor y en último validar el sistema diseñado por medio de simulaciones numéricas.

Para las diferentes etapas del proyecto de investigación ha sido necesario analizar material bibliográfico sobre técnicas y mecanismos de disipación térmica, hojas de especificaciones de los disipadores más comunes y de los transistores de potencia tipo MOSFET, modelos matemáticos simplificados y nuevas tecnologías de disipación térmica.

Adicionalmente se ha utilizado:

- El software de dibujo asistido por computadora (AUTOCAD) para dimensionar el dispositivo de disipación por tubos de calor (“heat pipes”);
- El software de conversión de archivos tipo jpg a diagramas editables para representarlos en el presente documento de tesis;
- El software de simulación de circuitos eléctricos NL5 v3.2 para representar circuitos eléctricos equivalentes a los circuitos térmicos simplificados del modelado físico matemático;
- El software de simulación multifísica (COMSOL 5.6) para modelar y simular el sistema de disipación térmica propuesto como solución definitiva al problema.

3.3 Diseño instrumental o interpretación, del proyecto, según sea el caso.

En la siguiente tabla se muestra un detalle de los instrumentos necesarios para llevar a cabo la investigación:

Tabla 3. Protocolo para el logro de los objetivos del proyecto de investigación

Objetivo General	Actividades
Diseñar una estructura para disipar calor con ayuda de modelos matemáticos y herramientas de simulación multifísica, cumpliendo de manera eficiente con las especificaciones operacionales de los semiconductores de potencia de los módulos fotovoltaicos.	Objetivos específicos

Enunciado de los objetivos específicos	¿Qué garantiza que se ha logrado dicho objetivo específico?	Actividades (objetivos de trabajo)	Materiales/Equipo
<p>1. Desarrollar elementos matemáticos de modelado apoyados en simulaciones numéricas multifísicas que permitan describir el comportamiento térmico estático y dinámico de un conjunto de MOSFETs en la placa PCB del circuito de reconfiguración dinámica de los módulos fotovoltaicos.</p> <p>Revisión de varias fuentes bibliográficas (libros y artículos científicos) que traten sobre el modelado térmico simplificado de un transistor MOSFET de potencia.</p> <p>Sintetizar y plantear un modelo térmico simplificado del conjunto MOSFETs-placa PCB-disipador basado en un circuito de reconfiguración dinámica tanto en modo estático como en modo dinámico.</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Marco contextual y conceptual debidamente redactado en las secciones destinadas para tal efecto en el documento. · Planteamiento teórico del modelo matemático del conjunto MOSFET-vías de disipación-disipador 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se extendió y completó el marco contextual. 2. Se realizó un estudio bibliográfico sobre el modelado térmico del MOSFET con el fin de identificar el que mejor se ajuste a las especificaciones funcionales del módulo fotovoltaico. Se tomaron en cuenta las capacitancias y resistencias térmicas. 3. Se realizó un estudio bibliográfico y una revisión del estado del arte sobre la técnica de evacuación térmica por vías para incorporarlo al modelo matemático del MOSFET previamente identificado. 4. Se realizó una revisión de patentes relacionadas con disipadores de calor para PCBs para incorporarlo al modelo matemático del conjunto MOSFET-vías de disipación. 	Material bibliográfico y listado de patentes

Enunciado de los objetivos específicos	¿Qué garantiza que se ha logrado dicho objetivo específico?	Actividades (objetivos de trabajo)	Materiales/Equipo
<p>2. Diseñar un sistema de disipación térmica en donde estén determinados la distribución de los MOSFETs en el PCB, la geometría y el material del disipador de calor que se aproxime a las especificaciones operacionales de un arreglo de semiconductores de potencia minimizando el impacto económico y ambiental.</p> <p>Con base en el modelo térmico planteado del conjunto MOSFETs-placa PCB-disipador presentar un primer boceto (física de estado sólido) para utilizarlo como fuente para una herramienta de simulación mediante elementos finitos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Archivo con los resultados de la herramienta de simulación para todas las corridas definidas en cada escenario. · Matriz comparativa entre los dos tipos de interfaz para la transferencia de calor del transistor MOSFET de potencia. · Matriz comparativa entre los tres tipos de disipador desde el punto de vista de geometría y distribución física. · Matriz comparativa entre los tres tipos de disipador desde el punto de vista de materiales de fabricación. · Matriz comparativa entre los tres tipos de disipador desde el punto de vista de mecanismos de transferencia de calor. 	<p>Se realizó el estudio térmico y multifísico con la herramienta de simulación (COMSOL Multiphysics u otra) para cada uno de los siguientes escenarios:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Un transistor MOSFET de potencia por el cual pasa una corriente de 15 A. La tensión máxima entre “<i>drain</i>” y “<i>source</i>” será de 600 V. Se debe suponer el MOSFET colocado sobre una superficie metálica y a una temperatura ambiente de 25°C. 2. Un transistor MOSFET de potencia (condiciones ideales) que ahora evacúa su calor por medio de vías térmicas. El disipador se encuentra en la otra cara del circuito impreso. Se supone una temperatura ambiente de 25°C. 3. Dos transistores MOSFETs de potencia ubicados sobre una misma superficie metálica. Evaluar efecto de distancia entre ambos. 4. Dieciséis transistores MOSFETs de potencia ubicados sobre un PCB con vías de evacuación térmica. Evaluar efecto de distancia entre ellos. 5. Dieciséis transistores MOSFETs de potencia ubicados en una posición óptima sobre un PCB con vías de evacuación térmica para tres tipos diferentes de disipador térmico en términos de material. 6. Dieciséis transistores MOSFETs de potencia ubicados en una posición óptima sobre un PCB con vías de evacuación térmica para dos tipos diferentes de disipador térmico en términos de geometría. 7. Dos transistores MOSFETs de potencia ubicados en una posición óptima sobre un PCB con vías de evacuación térmica para tres tipos diferentes de disipador térmico en términos de mecanismo. 	<ul style="list-style-type: none"> · Una PC/Servidor dedicado para el uso intensivo del software de simulación. · 32 GB de memoria RAM. · Licencia del programa COMSOL Multiphysics

Enunciado de los objetivos específicos	¿Qué garantiza que se ha logrado dicho objetivo específico?	Actividades (objetivos de trabajo)	Materiales/Equipo
<p>3. Presentar propuesta de disipador y sus especificaciones.</p> <p>Establecer las especificaciones de diseño del disipador de calor con base en los resultados obtenidos en la simulación para una posible implementación física del prototipo.</p> <p>Correr las simulaciones del modelo tomando en cuenta:</p> <p>a. Al menos una geometría de las aletas del disipador.</p> <p>b. Tres tipos de materiales para el disipador: aluminio, cobre y grafito.</p> <p>c. Al menos una razón de aspecto-área superficial de las aletas.</p> <p>Definir las especificaciones de diseño del disipador de calor con base en los resultados obtenidos en la simulación para una posible implementación física del prototipo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Archivo con los resultados de la herramienta de simulación para todas las corridas definidas en la tarea. · Resumen de especificaciones de diseño del disipador de calor para una posible implementación. 	<p>1. Se realizó el estudio térmico y multifísico con la herramienta de simulación (COMSOL Multiphysics u otra) de dieciséis MOSFETs ubicados sobre un PCB con vías de evacuación térmica y el disipador con la geometría y el material que resultó de la simulación anterior para optimizar el dimensionamiento que cumple con las especificaciones operacionales de los semiconductores de potencia de los módulos fotovoltaicos.</p> <p>2. Se definieron las especificaciones finales de diseño tanto en dimensiones como en estrategia y materiales para el disipador de calor que mejores resultados dio en la simulación previa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Una PC/Servidor dedicado para el uso intensivo del software de simulación. · 32 GB de memoria RAM. · Licencia del programa COMSOL Multiphysics

3.4 Metodología de validación

El proceso de validación de la investigación se basa en la ejecución de una serie de pruebas sistemáticas con diferentes herramientas de simulación, para obtener resultados estadísticamente repetibles y reproducibles, ante una posible implementación física de la solución definitiva.

En primera instancia, lo que se plantea es el modelado físico del problema base que corresponde a un par de transistores MOSFET, montados en un disipador sencillo de aletas rectangulares.

De acuerdo con el marco teórico, la primera aproximación como propuesta para el disipador es aprovechar el mecanismo más sencillo de transferencia térmica como es la convección natural. En términos de las restricciones, si este mecanismo no es suficiente para cumplir con las especificaciones operativas de diseño de los transistores, es preciso entonces recurrir a un siguiente mecanismo de transferencia térmica como lo es la convección forzada.

En todo caso, si este mecanismo resulta intensivo desde el punto de vista de consumo de energía y presente una probabilidad de fallo que puede comprometer la integridad de los transistores de potencia, se hace entonces necesario plantear un tercer mecanismo. Este último, además de ser pasivo, puede incorporar mecanismos de transferencia forzada que le dan robustez en caso de que exista una probabilidad remota de falla en el sistema principal de disipación térmica (colapso en alguna de las cámaras de transferencia térmica).

Capítulo 4

Resultados y análisis

4.1 Definición de alcance y especificaciones

El alcance del presente trabajo de investigación se delimita a plantear una solución para el sistema de recombinación para módulos fotovoltaicos conformado por treinta y dos MOSFETs de potencia modelo IRLH5030PBF, como el que se indica en la figura 25 del presente documento. De estos, dieciséis están en estado ON y los demás dieciséis en estado OFF.

Restricciones físicas

El espacio físico disponible es de un largo $\leq 300\text{mm}$, un ancho $\leq 300\text{mm}$ y un alto $\leq 100\text{mm}$. Se supone una temperatura ambiente, $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.2 Modelado del sistema

De acuerdo con el planteamiento teórico, el modelado físico matemático del sistema de disipación térmica para el sistema de recombinación debe contemplar tanto el comportamiento en modo estático, como el en modo dinámico, el tipo material y la geometría de los elementos que conforman el arreglo MOSFET-PCB-disipador.

4.2.1 Comportamiento en modo estático de un par de MOSFETs

Inicialmente se considera un sistema con un un para de MOSFET tal y como se muestra en el diagrama de la Fig. 24, en donde se muestra cómo está dispuesto el disipador. Así mismo, la Figura 26 muestra el circuito térmico equivalente de este sistema.

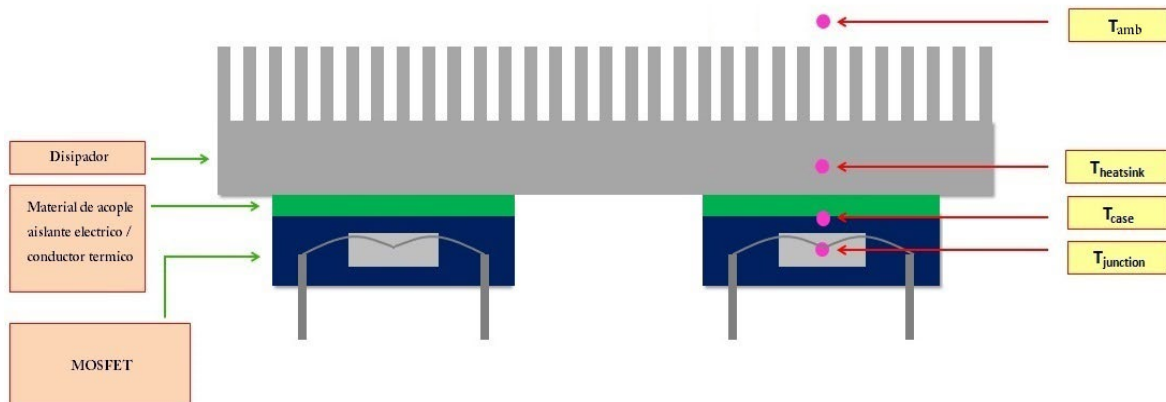


Figura 25. Corte transversal de un arreglo físico de un par de MOSFETs con disipador.

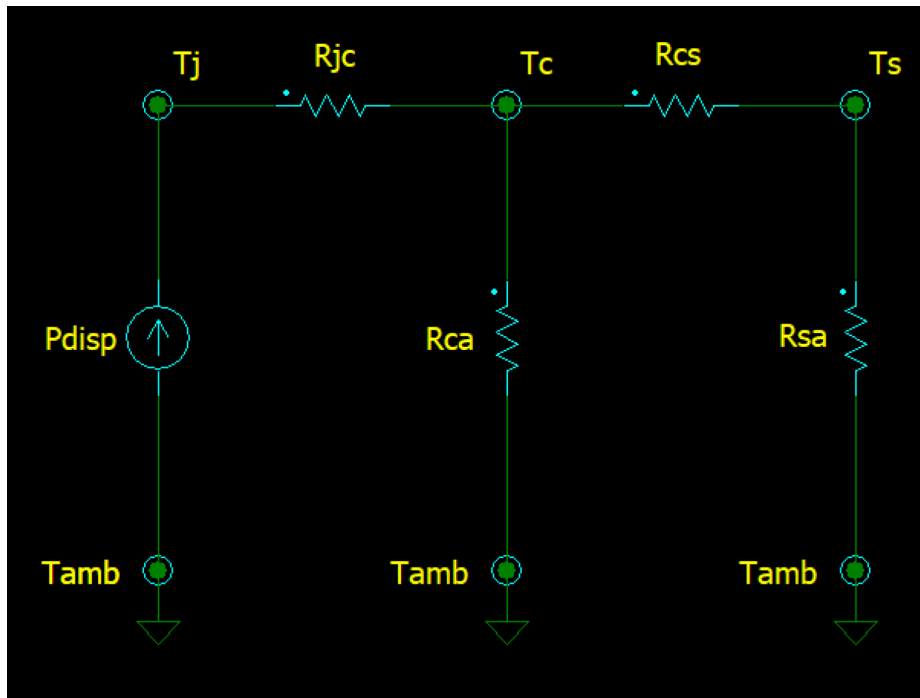


Figura 26. Circuito térmico equivalente en modo estático de un par de MOSFETs IRLH5030PBF con disipador.

De acuerdo con la hoja de datos del MOSFET IRLH5030PBF se utilizan los siguientes parámetros:

$$P_{disp} = 3,6 \text{ W}$$

$$T_{jmax} = 150 \text{ °C}$$

$$T_{amb} = 25 \text{ °C}$$

Como criterio de diseño para cálculo de disipador se utiliza la siguiente expresión

$$T_j = z \cdot T_{jmax}$$

en donde z es el factor de protección o margen de seguridad tomado es de $z = 0,5$. De esta forma se obtiene:

$$T_j = 75 \text{ °C}$$

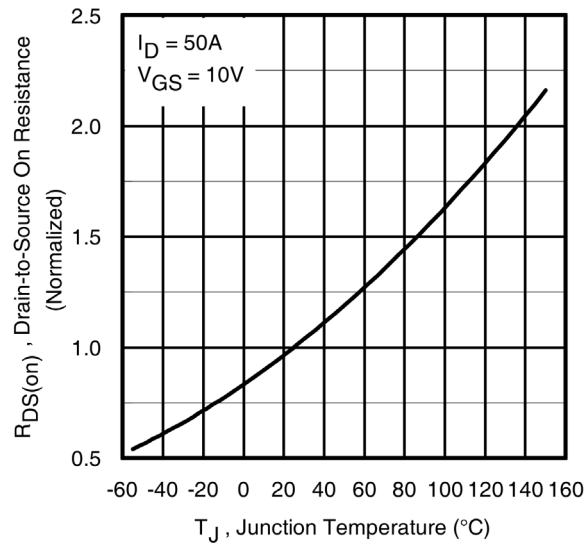


Figura 27. Curva característica de Temperatura de la juntura versus Resistencia $R_{DS(ON)}$ normalizada del MOSFET IRLH5030PBF.

Así mismo, se utiliza la curva de la Fig. 27, obtenida de la hoja de datos del MOSFET IRLH5030PBF en donde se tiene que para una $T_j = 75\text{ °C}$ se tiene que:

$$R_{DS(ON)} \approx 1,35 \times 9,9\text{ m}\Omega$$

$$R_{DS(ON)} \approx 13,365\text{ m}\Omega$$

Considerando una corriente, $I_D = 15\text{ A}$, se tiene que $P_{disp} = R_{DS(ON)} \times (I_D)^2$

$$= 13,365\text{ m}\Omega \times (15\text{ A})^2$$

$$= 3,01\text{ W}$$

De acuerdo con Ec. (28) se obtiene

$$P_{disp} = \frac{T_j - T_a}{R_{ja}}$$

$$R_{jc} = 15\text{ °C/W}$$

$$R_{cs} = 0,6\text{ °C/W}$$

De esta forma

$$R_{ja} = \frac{T_j - T_a}{P_{disp}}$$

$$R_{ja} = \frac{(75 - 25)\text{ °C}}{3,01\text{ W}}$$

$$R_{ja} = 16,6\text{ °C/W}$$

Como:

$$R_{ca} = 20 \text{ }^\circ\text{C/W} \gg R_{cs} + R_{sa}$$

$$R_{ja} \approx R_{jc} + R_{cs} + R_{sa}$$

Entonces:

$$R_{sa} \approx R_{ja} - R_{jc} - R_{cs}$$

$$R_{sa} \approx 16,6 \text{ }^\circ\text{C/W} - 15 \text{ }^\circ\text{C/W} - 0,6 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_{sa} \approx 1,0 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Para este primer arreglo, la resistencia térmica del disipador necesario para mantener una temperatura $T_j = 75^\circ\text{C}$ en un solo MOSFET IRLH5030PBF, debe ser menor o igual a $1,0 \text{ }^\circ\text{C/W}$. En este caso el aporte principal de la resistencia térmica del disipador es por convección dado que la transferencia de calor por conducción es despreciable, considerando por ejemplo los altos valores de la conductividad térmica del aluminio de alta pureza (238 W/mK) o del cobre electrolítico de alta pureza (400 W/mK).

4.2.1 Comportamiento en modo estático de dieciséis pares de MOSFETs

Ahora se considera el caso para dieciséis pares de MOSFETs como los que se indican en la Fig. 24, en donde se muestra un diagrama básico del arreglo físico con disipador. El circuito equivalente térmico se muestra en la Figura 29.

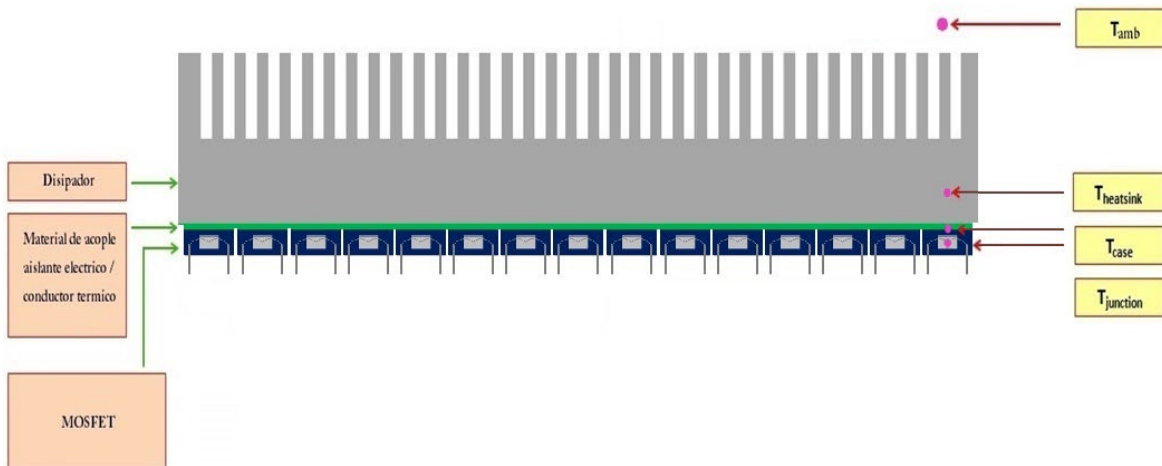


Figura 28. Corte transversal de un arreglo físico de dieciséis pares de MOSFETs con disipador.

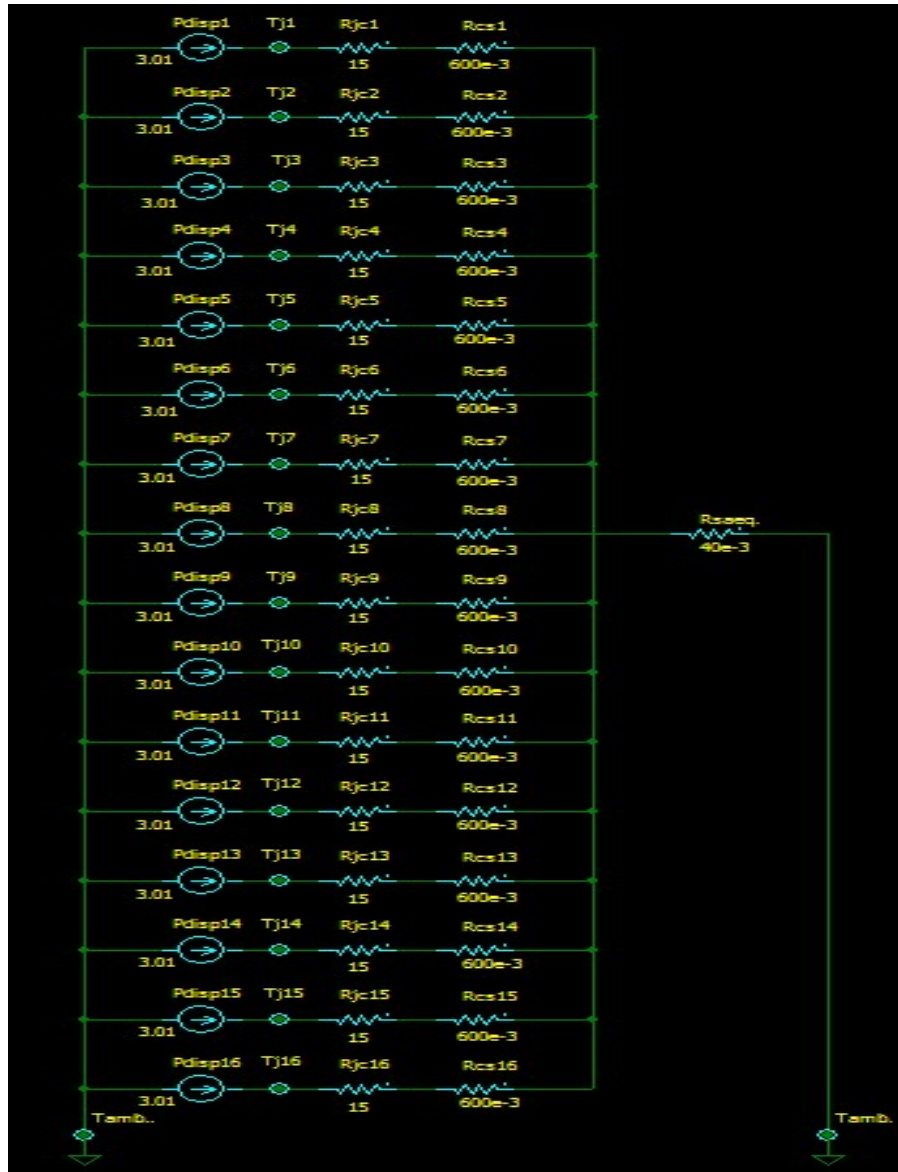


Figura 29. Circuito térmico equivalente del arreglo de 16 pares de transistores MOSFET del sistema de recombinación para los módulos fotovoltaicos.

Para este caso se tiene que

$$T_j = 75 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{jc} = 15 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_{cs} = 0,6 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Con lo cual siguiendo un procedimiento similar al caso de dos MOSFET se obtiene que

$$R_{sa.eq.} \approx 1/16 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_{sa.eq} \approx 0,0625 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Para este segundo arreglo, la resistencia térmica del disipador necesario para mantener una temperatura $T_j = 75^\circ\text{C}$ en un solo MOSFET IRLH5030PBF, debe ser menor o igual a $0,0625^\circ\text{C/W}$. Al igual que en el primer arreglo, el aporte principal de la resistencia térmica del disipador es por convección, pues por conducción es despreciable, igualmente por el valor de la conductividad térmica del aluminio de alta pureza (238 W/mK) o del cobre electrolítico de alta pureza (400 W/mK).

En retrospectiva, para el MOSFET IRLH5030PBF, la mayor disipación de potencia térmica ocurre en la juntura, pues representa una resistencia que es mucho mayor que la resistencia equivalente del disipador de potencia. Solo en la juntura se presenta un incremento térmico de hasta 45°C . En tanto que en el disipador se presenta un diferencial de temperatura de apenas 3°C . Las vías de disipación de la PCB, así como las placas de aislamiento eléctrico, pueden aportar un diferencial de temperatura que puede oscilar entre 1°C y 5°C . Finalmente, en el modelo, el incremento térmico se debe a la temperatura ambiente. Una potencia térmica nominal de $3,01\text{ W}$ en el MOSFET y una temperatura ambiente de 28°C hacen que el dispositivo semiconductor alcance fácilmente los 75°C . Por lo tanto, si se desea plantear una solución más generalizada, que permita aprovechar los circuitos de recombinación en ambientes severos, como pueden ser los de la región de Guanacaste (con condiciones de temperatura ambiente de hasta 34°C), se hace indispensable cambiar el modelo del MOSFET por uno que tenga una resistencia térmica R_{jc} de hasta 5°C/W como máximo.

4.2.2 Comportamiento en modo dinámico del arreglo MOSFET-PCB-disipador

Con base en la hoja de especificaciones del fabricante, el MOSFET IRLH5030PBF tiene un comportamiento térmico dinámico como se muestra en la Figura 30.

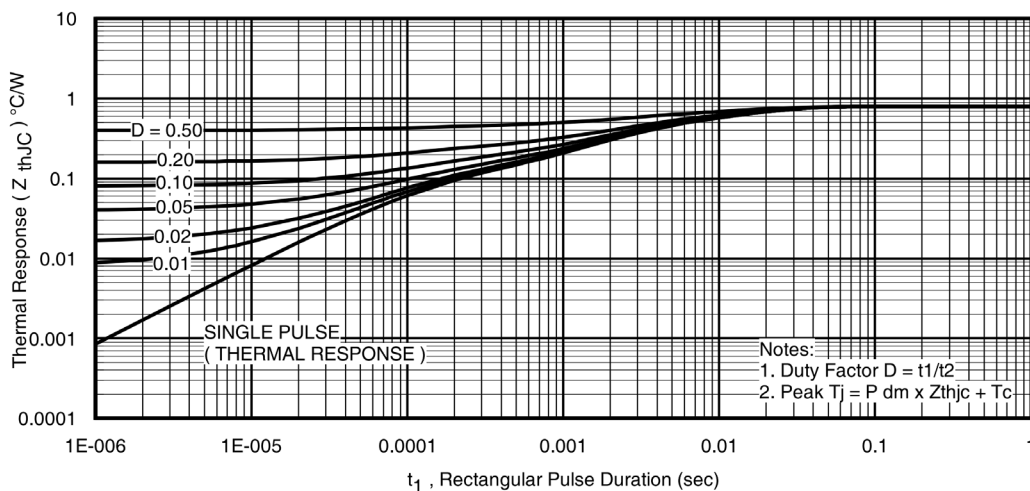


Figura 30. Curva característica de máxima impedancia térmica transitoria efectiva en la juntura con la base.

El circuito térmico que modela el comportamiento dinámico se muestra en la Fig. 31, en donde C_{jc} es la capacitancia térmica del MOSFET, C_{cs} es la capacitancia térmica del disipador y C_{sa} es la capacitancia térmica del volumen de aire en contacto con el disipador.

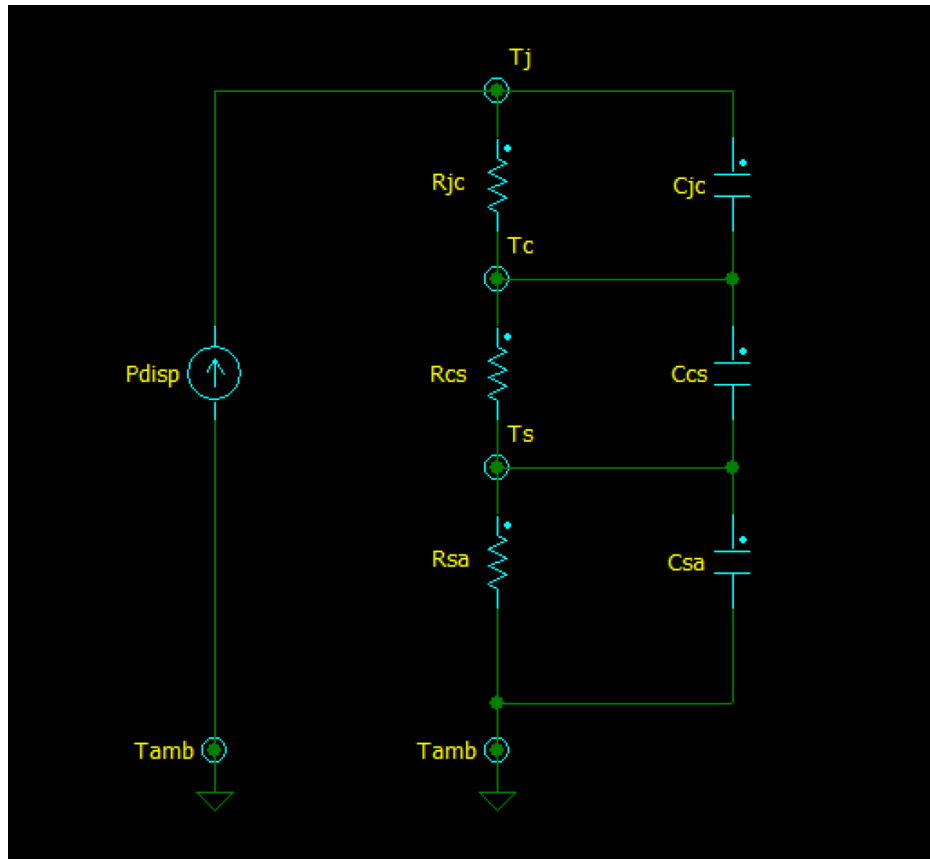


Figura 31. Circuito térmico equivalente en modo dinámico de un par de MOSFETs IRLH5030PBF con disipador.

De la Fig. 26 se deducen los siguientes valores

$$C_{jc} \approx R_{jc} / 1s$$

$$C_{jc} \approx 15 \text{ } ^\circ\text{C/W} / 1s$$

$$C_{jc} \approx 15 \text{ } ^\circ\text{C/s}\cdot\text{W}$$

$$V_{disp} \approx 0,20 \text{ m} \times 0,30 \text{ m} \times 0,08 \text{ m}$$

$$V_{disp} \approx 0,0048 \text{ m}^3$$

$$V_{cs} = V_{disp} * 0,20$$

$$V_{sa} = V_{disp} * 0,80$$

Y de acuerdo con la Ec. (23) se obtienen los siguientes resultados:

$$C_{cs} \approx c(\text{Al}) * \rho(\text{Al}) * V_{cs}$$

$$C_{cs} \approx 900 * 2700 * 0,0048 * 0,20 \text{ K/s}\cdot\text{W}$$

$$C_{cs} \approx 2332,0 \text{ }^\circ\text{C/s}\cdot\text{W}$$

$$C_{sa} \approx c(\text{Aire}) * \rho(\text{Aire}) * V_{sa}$$

$$C_{sa} \approx 1000,5 * 1,23 * 0,0046 * 0,80 \text{ }^\circ\text{C/s}\cdot\text{W}$$

$$C_{sa} \approx 4,72 \text{ }^\circ\text{C/s}\cdot\text{W}$$

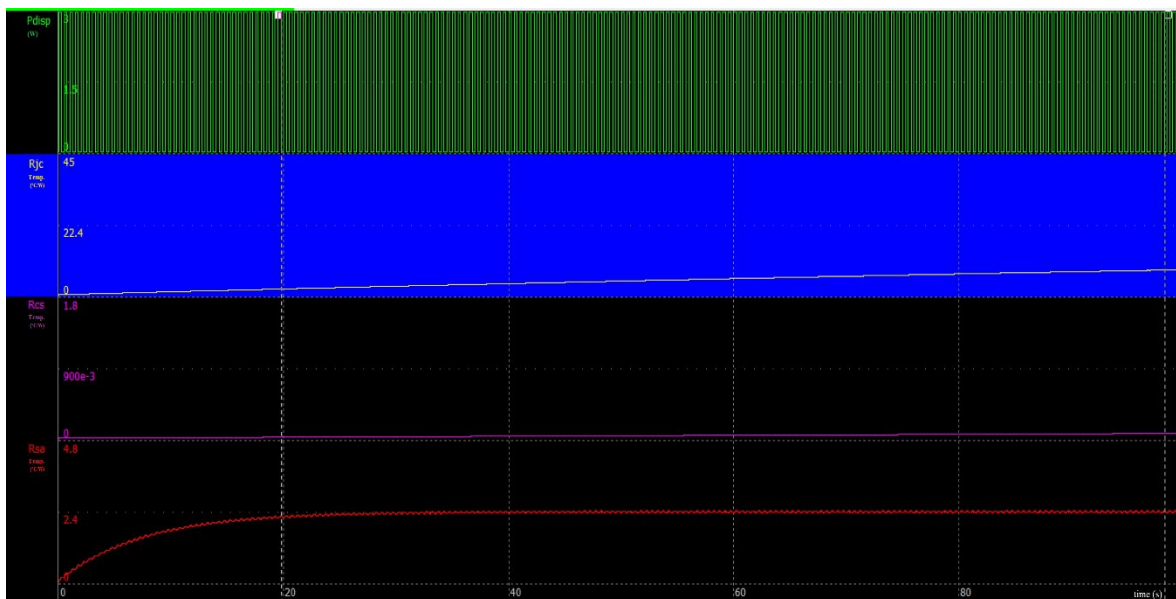


Figura 32. Respuesta del circuito térmico equivalente en modo dinámico de la figura 29 ante una fuente pulsante de baja frecuencia (2 Hz).

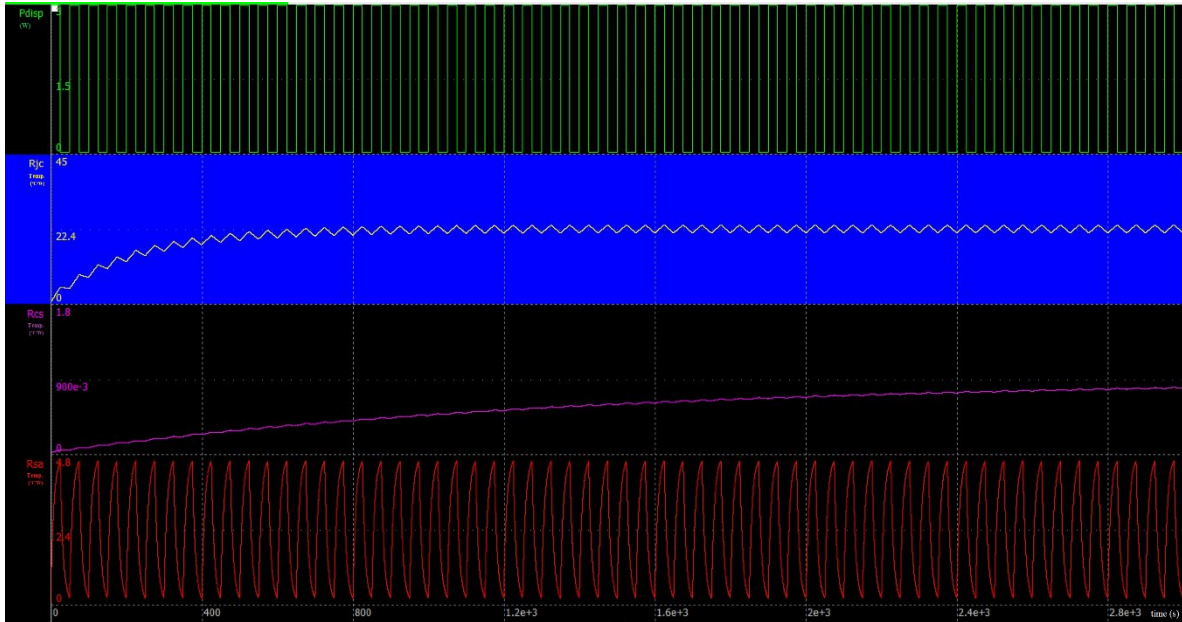


Figura 33. Respuesta del circuito térmico equivalente en modo dinámico de la figura 29 ante una fuente pulsante de muy baja frecuencia (0,02 Hz).

Por lo tanto, se concluye que para el modelado térmico de este transistor el escenario de mayor disipación térmica es cuando el sistema se acerca al modo estático (frecuencia cero).

4.2.3 Tipo de materiales para disipador convencional

Un disipador como el de la Fig. 25 normalmente se fabrica de aluminio (Al 6063 según [9]) y para casos muy especiales también se puede fabricar de cobre o de grafito. De acuerdo con el modelado estático, la resistencia entre el encapsulado y el disipador R_{cs} es la suma de la resistencia de contacto entre el dispositivo electrónico y el disipador y la resistencia térmica equivalente por conducción del disipador R_{disp} . La resistencia térmica equivalente por conducción del disipador R_{disp} está en función del espesor de la base o superficie de contacto, la conductividad térmica del material y del área perpendicular al dispositivo electrónico (MOSFETs IRLH5030PBF).

La resistencia térmica del disipador (por conducción) está definida de acuerdo con la siguiente expresión

$$R_{disp} = w / (k \cdot A_p)$$

En donde

w es el espesor de la base

k es la conductividad térmica del material del disipador

A_p es el área perpendicular del disipador

De esta forma, para un disipador de una aleación de aluminio (Al) 6063 se tienen los siguientes valores

$$R_{disp} = w / (k_{Al} \cdot A_P) = 0,0025m / (218 \text{ W/m}^\circ\text{C} \cdot 0,001 \text{ m} \cdot 0,15 \text{ m})$$

$$R_{disp} = 0,0765 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$T_{disp} = R_{disp} \times P_{disp} = 0,0765 \text{ }^\circ\text{C/W} \cdot 49,0 \text{ W}$$

$$T_{disp} = 3,748 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para un disipador de cobre electrolítico (Cu) se obtiene que

$$R_{disp} = w / (k_{Cu} \cdot A_P) = 0,0025m / (400 \text{ W/ m}^\circ\text{C} \cdot 0,001 \text{ m} \cdot 0,15 \text{ m})$$

$$R_{disp} = 0,0417 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$T_{disp} = R_{disp} \times P_{disp} = 0,0417 \text{ }^\circ\text{C/W} \cdot 49,0 \text{ W}$$

$$T_{disp} = 2,0417 \text{ }^\circ\text{C}$$

Y para un disipador de grafito (C)

$$R_{disp} = w / (k_C \cdot A_P) = 0,0025m / (940 \text{ W/ m}^\circ\text{C} \cdot 0,001 \text{ m} \cdot 0,15 \text{ m})$$

$$R_{disp} = 0,0177 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$T_{disp} = R_{disp} \times P_{disp} = 0,0177 \text{ }^\circ\text{C/W} \cdot 49,0 \text{ W}$$

$$T_{disp} = 0,8687 \text{ }^\circ\text{C}$$

El diferencial de temperatura de la resistencia por conducción entre un disipador de aluminio (Al 6063), uno de cobre (Cu electrolítico) y uno de grafito es como sigue: 1,7 °C más que el cobre y 2,5 °C más que el grafito. Este último diferencial representa apenas una reducción de un 3% de la temperatura máxima total que puede soportar el encapsulado del dispositivo electrónico (75 °C). Esta reducción, no justifica el diferencial de costo entre una placa de aluminio versus una placa de cobre y esta versus una placa de grafito de alta conductividad térmica. Pues según [35] en marzo de 2022, el costo promedio del aluminio por tonelada métrica es de \$3675,26, el costo promedio del cobre es de \$11510,87 (tres veces más caro que el aluminio) y el costo aproximado del grafito es de \$12798,00. (cuatro veces más caro que el aluminio).

4.3 Dimensionamiento teórico del disipador

Con base en las restricciones definidas en el modelado físico matemático del primer arreglo MOSFET-PCB-disipador de la Fig. 25 y en términos de lo que recomienda la teoría respecto de los mecanismos de transferencia de calor menos intensivos, se plantea un dimensionamiento teórico del disipador, inicialmente haciendo uso de la convección natural y luego de la convección forzada.

4.3.1 Convección natural

De acuerdo con la Ec. (15), el número de Prandtl para el aire es $de Pr = 0,707$ a una temperatura de 300K.

De acuerdo con las Ec. (17), el número de Rayleigh para el caso de un arreglo de múltiples aletas se calcula de acuerdo con la siguiente expresión.

$$Ra = g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot S^3 / (\alpha \cdot \nu)$$

En donde

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\beta = 1/T = 0,0035 \text{ K}^{-1}$$

$$(T_s - T_\infty) = 125 \text{ K}$$

$$S^3 = (0.01\text{m})^3$$

$$(\alpha \cdot \nu) = (15,89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \cdot (22,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$$

$$Ra = 11432,77$$

Así mismo, de la Ec. (21) se obtiene que

$$Nus = \left[\frac{c_1}{(Ra_S S/L)^2} + \frac{c_2}{(Ra_S S/L)^{1/2}} \right]^{-1/2}$$

$$Nus = 3,67$$

Y según la Ec. (20) se tiene que:

$$Nu = h \cdot L/k$$

En donde, para $L = 0,2$ y $k = 26,3 \times 10^{-3} \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$ se obtiene

$$h \approx 1 \text{ [W/m}^2\cdot\text{K]}$$

Para un disipador por convección natural, de acuerdo con la Ec. (12):

$$R_{sa} = \frac{1}{h \cdot A_f}$$

donde A_f = área total de la superficie del disipador.

Para un par MOSFETs, como ya se sabe, el valor de $R_{sa} = 1,0 \text{ }^\circ\text{C/W} = 1 \text{ K/W}$, entonces el área final del disipador debe ser igual a

$$A_f = \frac{1}{h \cdot R_{sa}}$$

$$A_f = 1 \text{ m}^2 = 10000 \text{ cm}^2$$

Eso equivale a un disipador teórico de 20 aletas de 200mm x 200mm x 150mm.

4.3.2 Convección forzada

Por convección forzada, de acuerdo con las Ec. (23), el número de Prandtl para el aire es de $Pr = 0,707$ a una temperatura de 300K.

De acuerdo con las Ec. (24), el número de Reynolds para el caso de un arreglo de múltiples aletas se calcula de acuerdo con la siguiente expresión

$$Re = V \cdot L / \nu$$

$$Re = 1 \text{ m/s} \cdot 0,2 \text{ m} / (15,89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$$

$$Re = 12586,53$$

Para flujo turbulento

$$Nu = 0,0308 \cdot Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$$

$$Nu = 52,27$$

De la Ec. (20) se obtiene que:

$$Nu = h \cdot L/k$$

Para $L = 0,2$ y $k = 26,3 \times 10^{-3}$ [W/m·K]

$$h \approx 6,87 \text{ [W/m}^2\cdot\text{K]}$$

Y de acuerdo con la Ec. (12) se define para un disipador por convección forzada:

$$R_{sa} = \frac{1}{h \cdot A_f}$$

donde A_f = área total de la superficie del disipador.

Para un par MOSFETs, como ya se sabe, el valor de $R_{sa} = 1,0 \text{ }^\circ\text{C/W} = 1 \text{ K/W}$

Entonces el área final del disipador debe ser igual a

$$A_f = \frac{1}{h \cdot R_{sa}}$$

$$A_f = 0,15 \text{ m}^2 = 1500 \text{ cm}^2$$

Eso equivale a un disipador teórico de 15 aletas de 200mm x 100mm x 50mm

4.4 Propuesta de solución con disipador comercial por convección natural

De acuerdo con los cálculos obtenidos en el modelado del sistema, las especificaciones de un posible disipador comercial por convección natural para un par de MOSFETs deben tener una resistencia térmica máxima de $1,0 \text{ }^\circ\text{C/W}$. El disipador comercial específico marca DISIPA Heat S.L., modelo P20040, presenta una resistencia térmica equivalente a $0,9 \text{ }^\circ\text{C/W}$ y cumple con los requerimientos mínimos de transferencia de calor del circuito térmico de la Fig. 26.

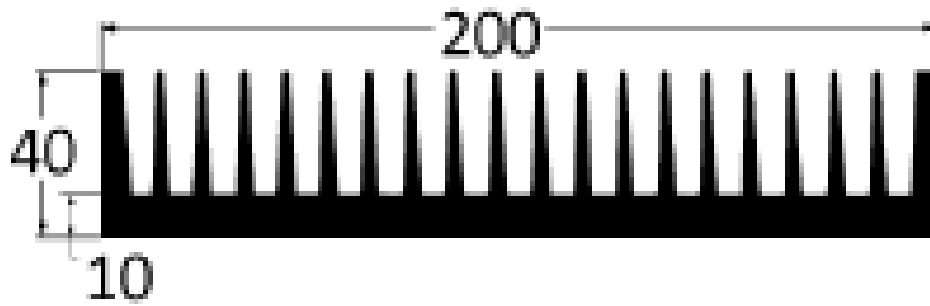


Figura 34. Disipador de temperatura marca DISIPA Heat S.L. modelo P20040. Con dimensiones de 200mm x 100mm x 40mm).

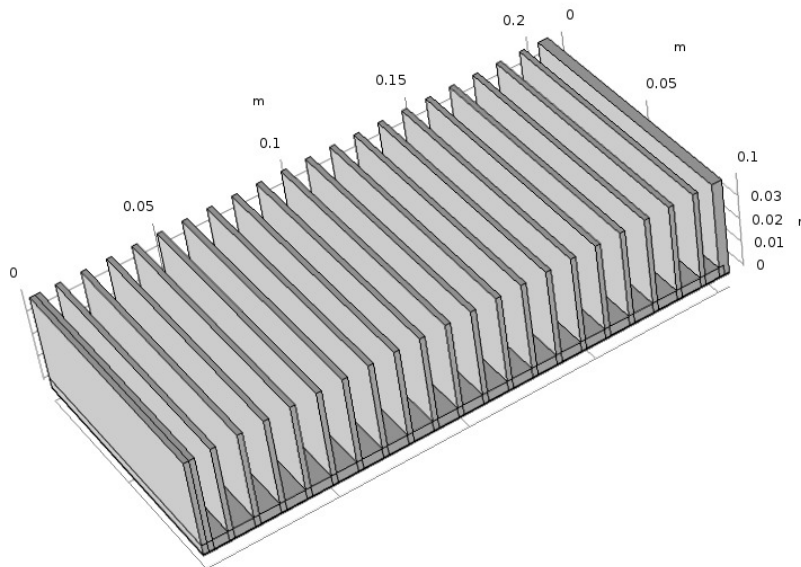


Figura 35. Diagrama isométrico del disipador de temperatura marca DISIPA Heat S.L. modelo P20040. Con dimensiones de 200mm x 100mm x 40mm).

Para este caso, el fabricante estima un coeficiente de convección h_{CF} de aproximadamente 6,25 [W/m²·K], seis veces más que el obtenido en el dimensionamiento teórico del disipador. Se necesitan, por lo tanto, dieciséis disipadores con esas dimensiones para resolver el problema de disipación térmica del arreglo de dieciséis pares de MOSFET de la Fig. 28 y representados en el circuito térmico de la Fig. 29. El espacio físico necesario para colocar esos disipadores en serie es de 200 mm largo por 1600 mm de ancho. Este espacio no está disponible en la estructura, pues supera en cuatro veces las dimensiones originales previamente definidas: (200mm x 300mm x 100mm) versus (200mm x 1600 mm x 80 mm). Por tal motivo, desde el punto de vista teórico, la convección natural se descarta como posible solución al problema de disipación. Se hace necesario entonces utilizar un método más eficiente en el uso del espacio y que sea eficaz para resolver el problema de disipación térmica para el arreglo de dieciséis pares de MOSFETs IRLH5030PBF (Figs. 28 y 29).

4.5 Propuesta de solución con disipador comercial por convección forzada

De acuerdo con los cálculos obtenidos en el modelado del sistema, las especificaciones de un posible disipador comercial por convección forzada para dieciséis pares de MOSFETs representados en el circuito térmico de la Fig. 29, debe tener una resistencia térmica máxima de 0,0625 °C/W. El dimensionamiento de un disipador comercial de calor de 0,0625 °C/W por convección forzada se muestra a continuación.

RG42120N40/xxx

GENERAL SPECIFICATIONS	120FR	180FR	300FR	120AFR	180AFR	300AFR
Mounting position	Any					
Fans power (total)	42 W. @ 230V. 50 Hz		84 W. @ 230V. 50 Hz			
	36 W. @ 230V. 60 Hz		72 W. @ 230V. 60 Hz			
Fans power "H" version	38 W. @ 230V. 50 Hz		76 W. @ 230V. 50 Hz			
Total lenght (mm.)	198	258	378	276	336	456
Aprox. Weight (Kg.)	5,65	7,74	11,9	7,14	9,23	13,39

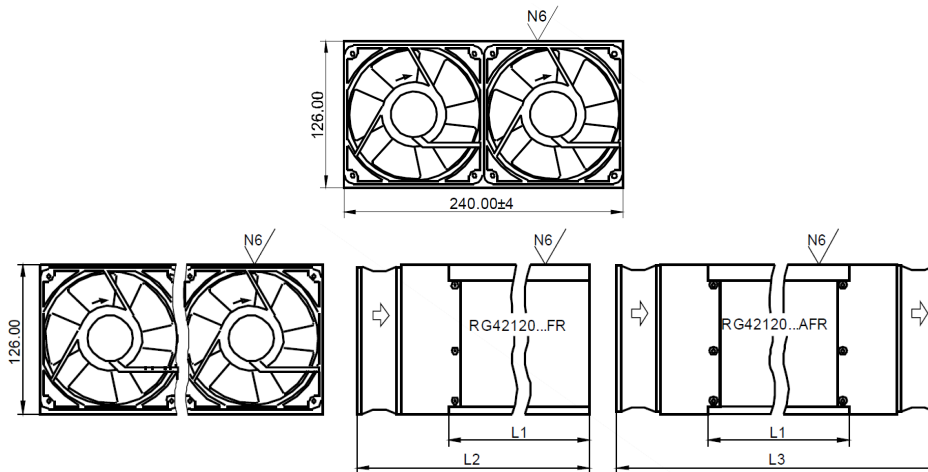


Figura 36. Intercambiador de calor de alta eficiencia marca GUASCH.

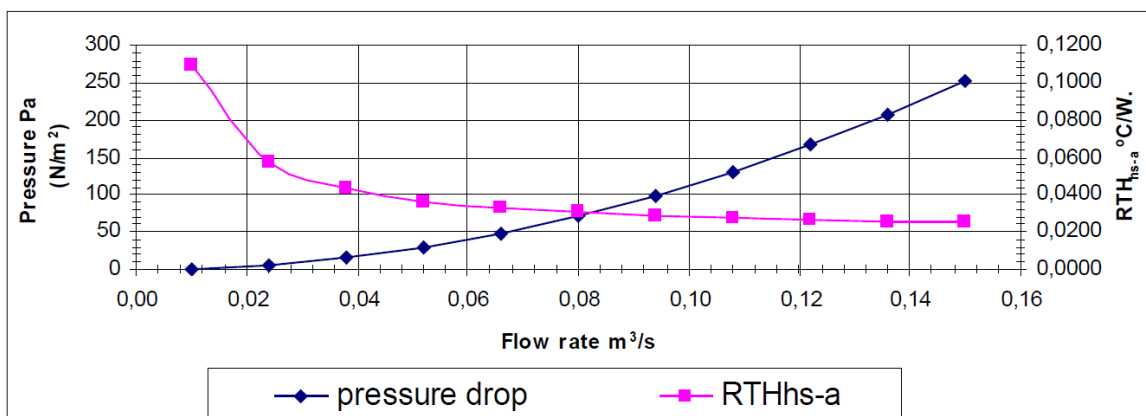


Figura 37. Curva de resistencia térmica equivalente del intercambiador de calor marca GUASCH.

Especificaciones de diseño

Modelo: disipador GUASH RG42120N40/120xxx

Potencia total de los ventiladores: 40W / 240 VAC/60Hz

Flujo de aire = 0,052 m³/s

Caída de presión = 25N/m²

Rth.eq. ≈ 0,040 °C/W

Este disipador comercial está en la capacidad de disipar los 48,16W de calor que generan dieciséis (16) MOSFETs de potencia encendidos como los del arreglo del sistema de recombinación que se muestra en la Fig. 24 y que corresponde al circuito térmico de la Fig. 29.

4.6 Simulación del arreglo con vías de disipación

Seguidamente, de acuerdo con el plan de la tabla 3 de la sección 3.3, se presentan a continuación los resultados obtenidos utilizando el software de simulación multifísica COMSOL, para el efecto que tienen el dimensionamiento de las vías de disipación. Particularmente, se evaluaron tres escenarios: vías de 1,6 mm, vías de 2,65 mm y contacto directo con placa de cobre.

Geometría y condiciones de operación

Disipador por convección natural de 200 mm x 100mm x 40 mm.

En este modelo particular, se consideran los valores:

$Q_{in} = 3,01W$ (1 par de MOSFETs) y $T_{ext} = 301.15K$

Parámetro	Aluminio (Al)	Cobre (Cu)	Grafito (C)
Conductividad térmica (W/m·K)	238	400	940
Densidad (kg/m ³)	2700	8960	1950
Calor específico (J/kg·K)	900	385	710

Tabla 4. Propiedades del material para el arreglo con vías de disipación.

Parámetros del modelo

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
wall_t1	0.1[cm]	0.001 m	Espesor del disipador
wall_t2	rect1/30	6.25E-4 m	Espesor de una aleta del disipador
rect1	1.875[cm]	0.01875 m	Separacion entre aletas
rect2	8.0[cm]	0.04 m	Altura de las aletas
wall_h	20.0[cm]	0.2 m	Largo del disipador
blk_w	16*rect1	0.1 m	Ancho del disipador
blk_d	0.2[cm]	0.002 m	Espesor de la PCB
blk_h	wall_h	0.2 m	Ancho de la PCB
sq_l	0.60[cm]	0.006 m	Largo del MOSFET
sq_h	0.2[cm]	0.002 m	Espesor del MOSFET
sq_h2	0.05[cm]	5E-4 m	Espesor del aislante eléctrico
Pwr	3.33[W]	3.33 W	Potencia de disipación
r1	rect1/25	8.0E-4 m	Radio de la vía

Tabla 5. Parámetros del modelo para el arreglo con vías de disipación.

4.6.1 Convección natural para dos MOSFETs en paralelo con vías de 1,6mm Ø

Esta simulación utiliza el dimensionamiento comercial de un disipador de aluminio por convección natural para dos MOSFETs en paralelo montados en una PCB con vías de disipación de 1,6 mm de diámetro y 2,0 mm de longitud.

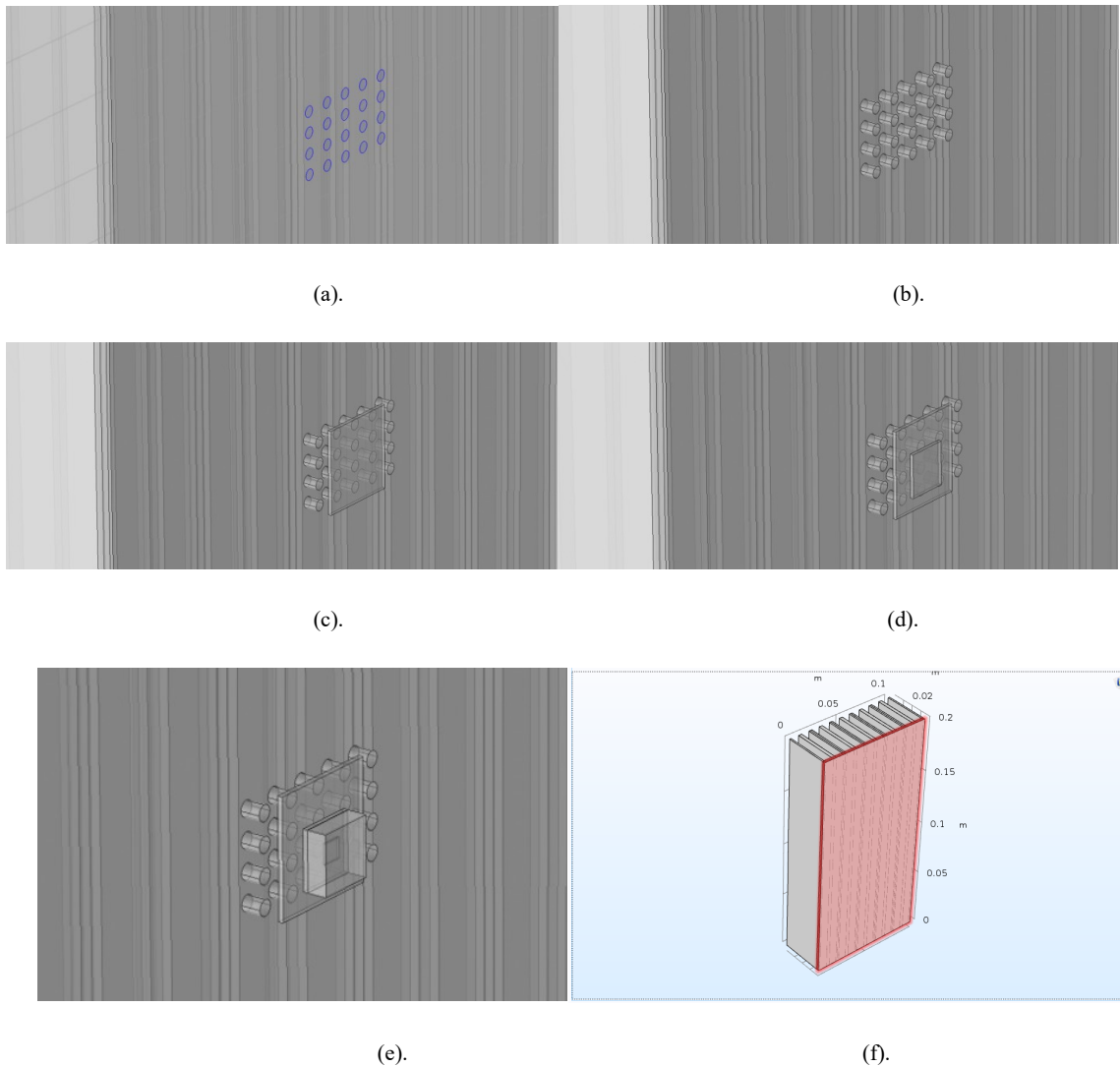


Figura 38. Proceso constructivo en COMSOL de las vías en la PCB. a. huella de 20 vías de 1,6 mm de diámetro. b. 20 vías de cobre de 1,6 mm de diámetro y 2 mm de longitud. c. Placa de contacto de cobre de 5 mm x 5 mm x 0,2 mm para garantizar buena transferencia térmica. d. Placa aislante eléctrica de 4 mm x 4 mm x 0,2 mm para evitar conducción eléctrica. e. MOSFET montado en la placa aislante. f. Lámina de cobre que está en contacto con el disipador en la parte posterior de la PCB.

En esta propuesta, las dimensiones del disipador de aluminio son: 200 mm x 100 mm x 40 mm

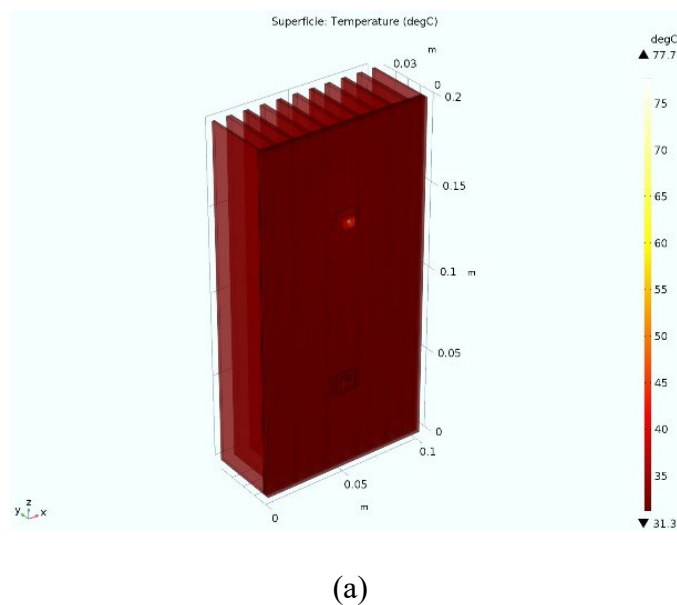
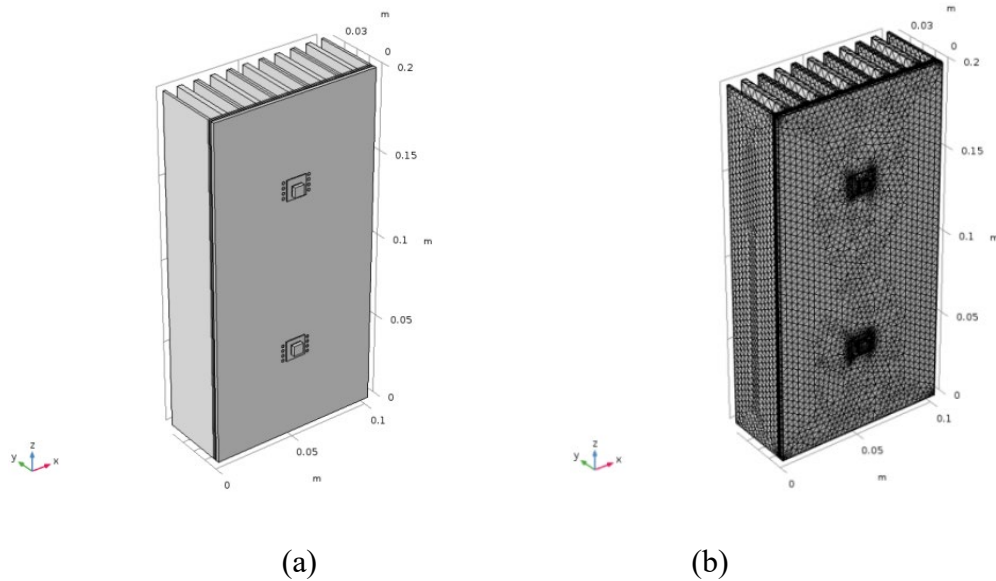


Figura 39. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación en COMSOL de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 100mm x 40mm para dos MOSFETs en paralelo montados en una PCB con vías de disipación de 1,6 mm de diámetro.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el punto más caliente del arreglo se presenta en el MOSFET y muestra un valor máximo aproximado de 77,7°C.

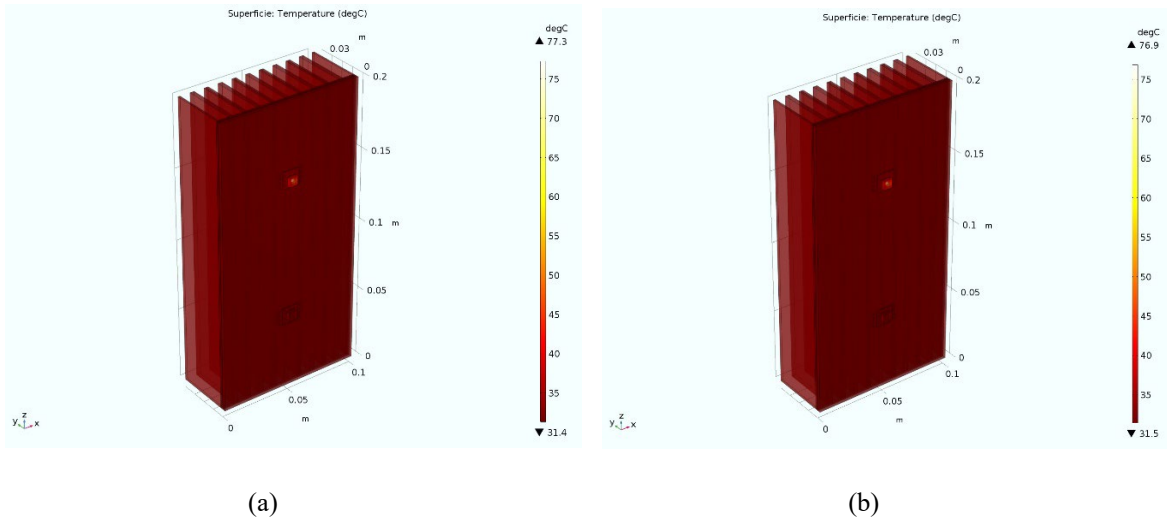


Figura 40. Resultados de simulación en COMSOL de transferencia de calor por convección natural. (a) Disipador de cobre de 200mm x 100mm x 40mm. (b) Disipador de grafito de 200mm x 100mm x 40mm.

Adicionalmente, como parte de esta simulación, se modificó el tipo de material del disipador por cobre y por grafito respectivamente. De acuerdo con la Fig. 40, los resultados arrojan que el diferencial de temperatura no es significativo respecto de los resultados de la Fig. 39 correspondientes al disipador de aluminio con las mismas dimensiones y misma fuente de calor: 3,01W (un MOSFET de potencia encendido).

4.6.2 Convección natural para dos MOSFETs en paralelo con vías de 2,6 mm Ø

Esta simulación utiliza el dimensionamiento comercial de un disipador de aluminio por convección natural para dos MOSFETs en paralelo, montados en una PCB con vías de disipación de 2,6 mm de diámetro y 2,0 mm de longitud.

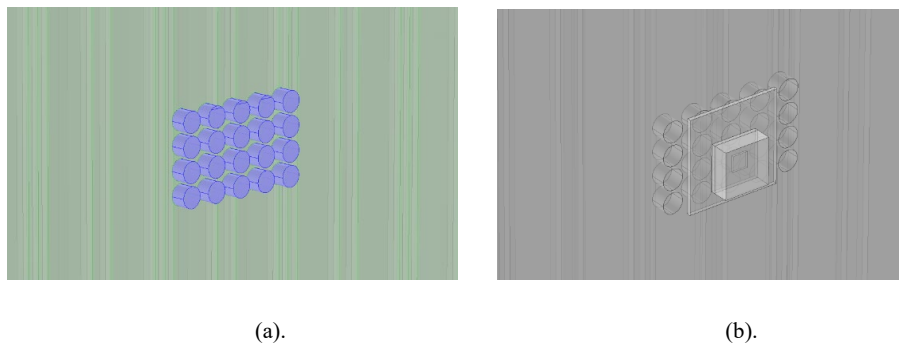


Figura 41. Proceso constructivo en COMSOL de las vías en la PCB. a. huella de 20 vías de 2,6 mm de diámetro. b. MOSFET montado en la placa aislante eléctricamente.

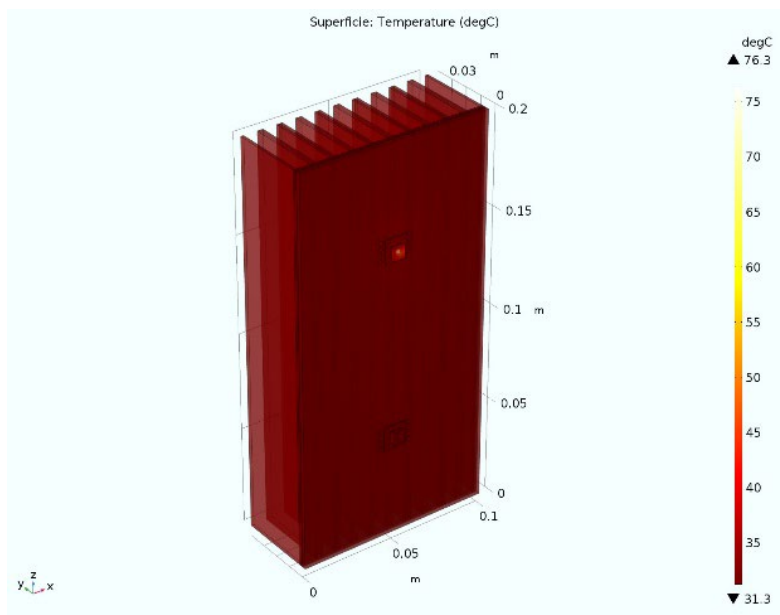
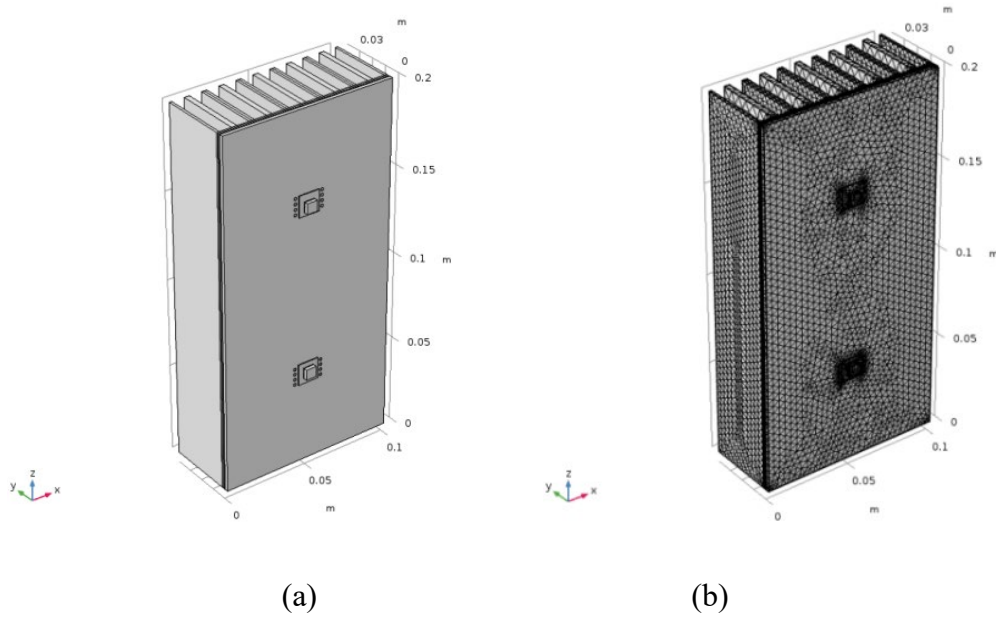


Figura 42. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación en COMSOL de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 100mm x 40mm para dos MOSFETs en paralelo montados en una PCB con vías de disipación de 2,6 mm de diámetro.

4.6.3 Convección natural para dos MOSFETs en paralelo montados en placa de cobre

Esta simulación utiliza el dimensionamiento comercial de un disipador de aluminio por convección natural para dos MOSFETs en paralelo montados en una placa de cobre.

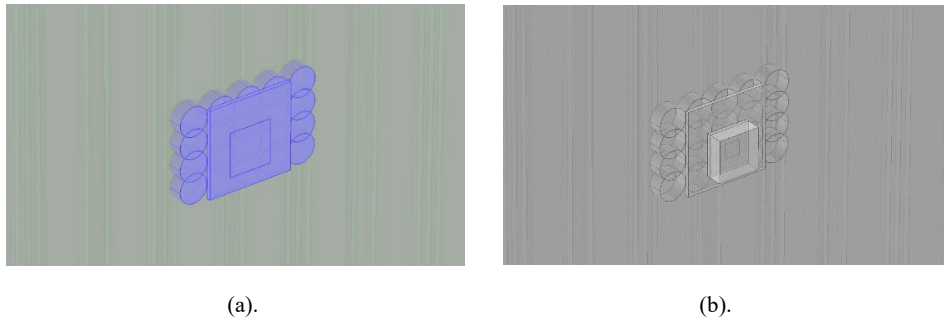


Figura 43. Proceso constructivo en COMSOL de las vías en la PCB. a. huella de placa de cobre. b. MOSFET montado en la placa aislante eléctricamente.

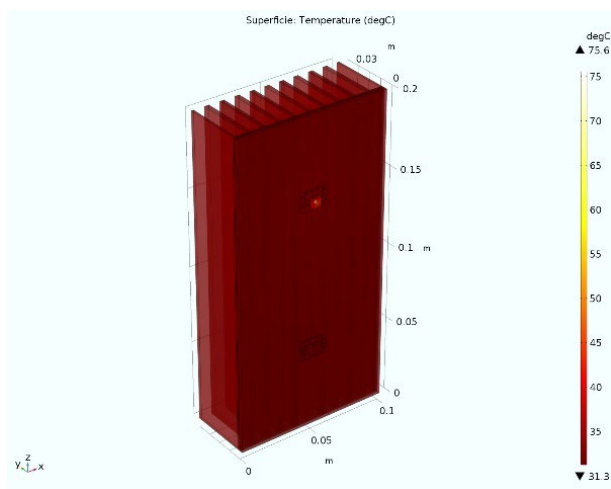
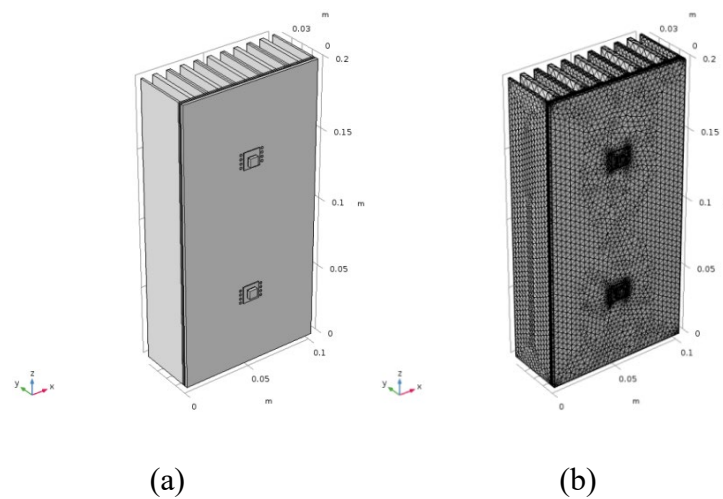


Figura 44. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación en COMSOL de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 100mm x 40mm para dos MOSFETs en paralelo montados en una placa de cobre.

4.7 Simulación del arreglo por efecto de la distancia de separación

Seguidamente, de acuerdo con el plan de la tabla 3, sección 3.3, se brindan a continuación los resultados obtenidos utilizando el software de simulación multifísica COMSOL, para el efecto que tiene la distancia de separación entre los MOSFETs de potencia en la capacidad de disipación térmica del disipador. Particularmente se evaluaron cuatro escenarios: un par de MOSFETs montados en vías de 1,6 mm, vías de 2,65 mm y en encima de una placa de cobre.

4.7.1 Convección natural para un par de MOSFETs separados 95 mm

Esta simulación utiliza los resultados obtenidos en el dimensionamiento comercial por convección natural para dos MOSFETs encendidos en paralelo, montados en una placa de cobre y separados entre sí 94 mm.

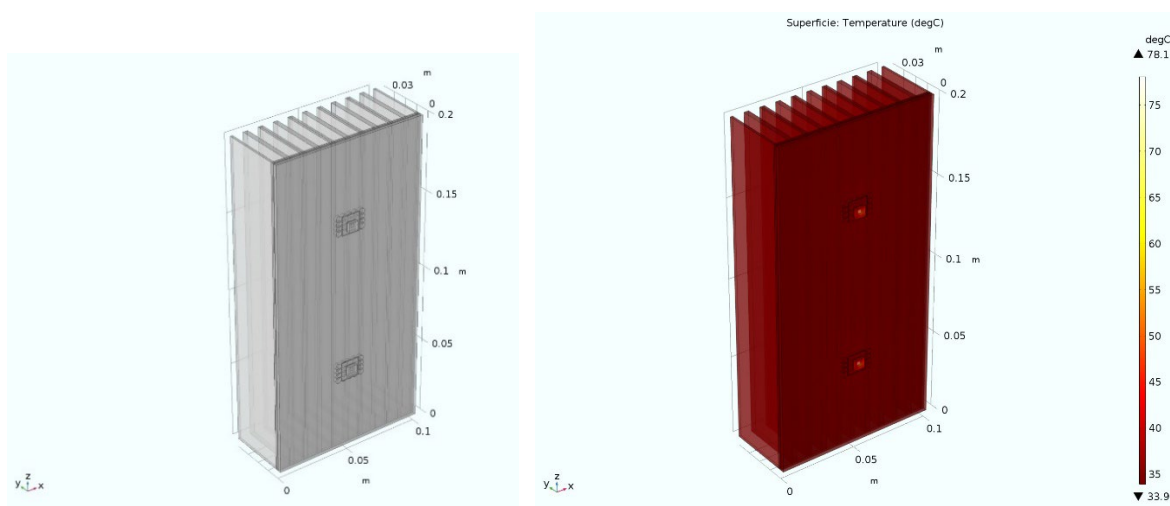


Figura 45. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación en COMSOL de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 100mm x 40mm para dos MOSFETs encendidos en paralelo, montados en una placa de cobre y separados entre sí 95 mm.

4.7.2 Convección natural para un par de MOSFETs separados 18 mm

Esta simulación utiliza los resultados obtenidos en el dimensionamiento comercial por convección natural para dos MOSFETs en paralelo, montados en una placa de cobre y separados entre sí 18 mm.

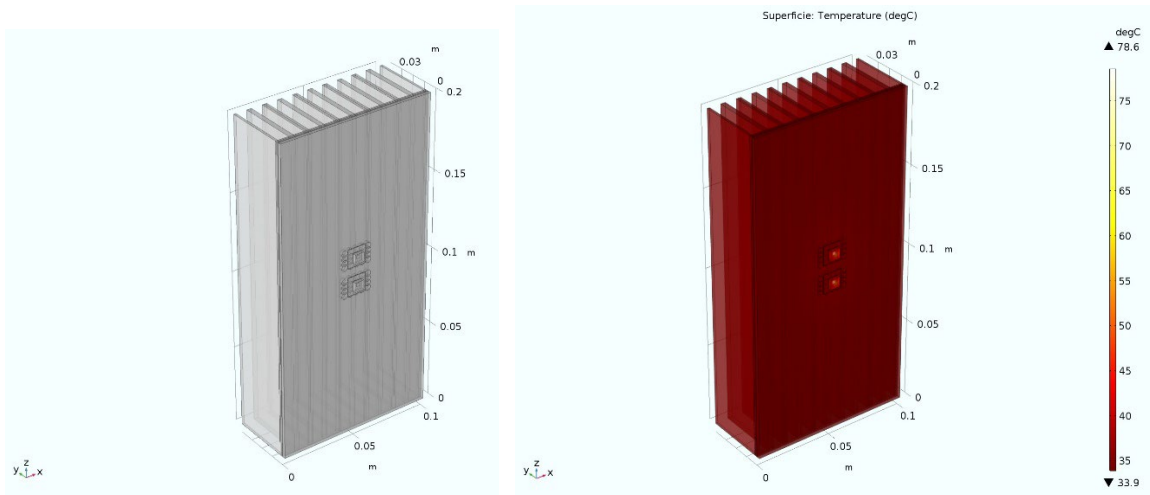


Figura 46. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación en COMSOL de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 100mm x 40mm para dos MOSFETs en paralelo montados en una placa de cobre y separados entre sí 18 mm.

4.7.3 Convección natural para arreglo de 16 pares de MOSFETs separados 95 mm

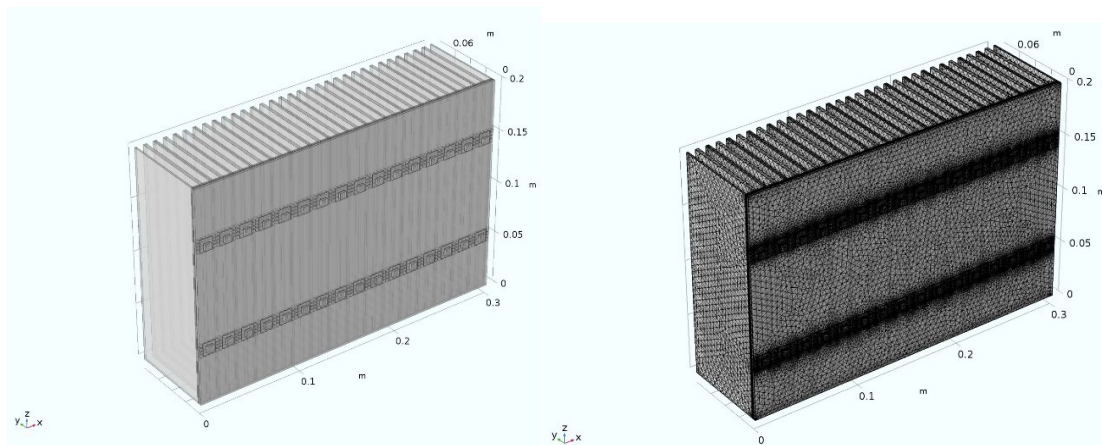
Esta simulación utiliza un disipador de aluminio de: 200 mm x 300 mm x 80 mm, que transfiere el calor por convección natural para dieciséis pares de MOSFETs en paralelo, montados en una placa de cobre y separados entre sí 95 mm.

Geometría y condiciones de operación

Disipador por convección natural de 200 mm x 300mm x 80 mm.

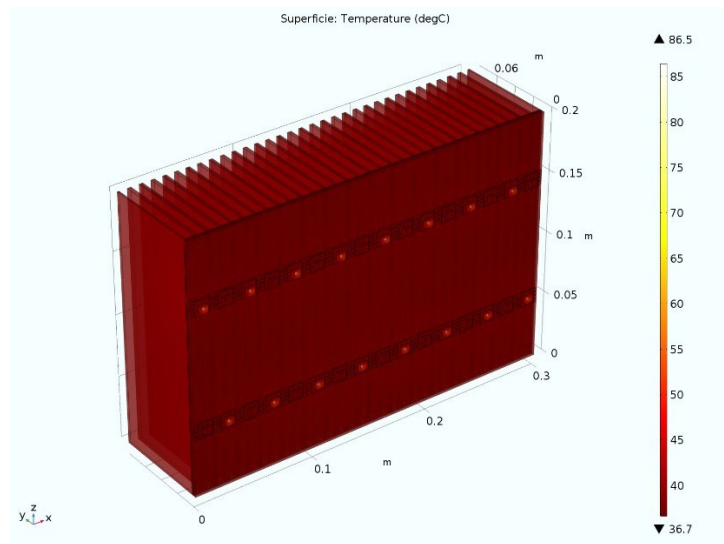
En este modelo particular, se consideran los siguientes valores:

$Q_{in} = 48,16W$ (1 par de MOSFETs) y $T_{ext} = 301.15K$



(a)

(b)

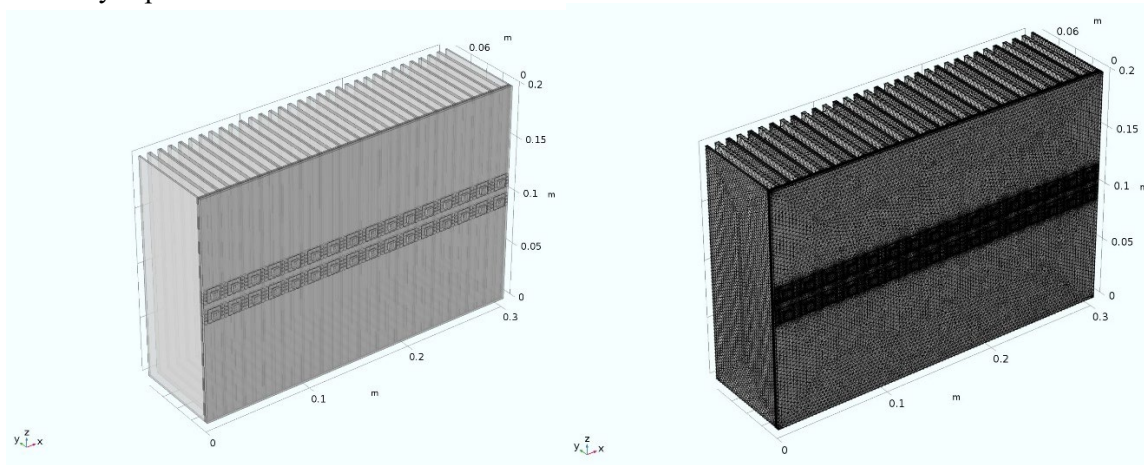


(c)

Figura 47. Diagrama de dimensionamiento y resultados en COMSOL de simulación de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 300mm x 80mm junto a PCB con vías de cobre de 1,875 mm de diámetro y 2 mm de longitud. (a) Geometría general del disipador de aluminio. (b) Enmallado general del disipador de aluminio. (c) Resultados del perfil de temperatura del disipador con la potencia nominal de 16 MOSFETs IRLH5030PBF.

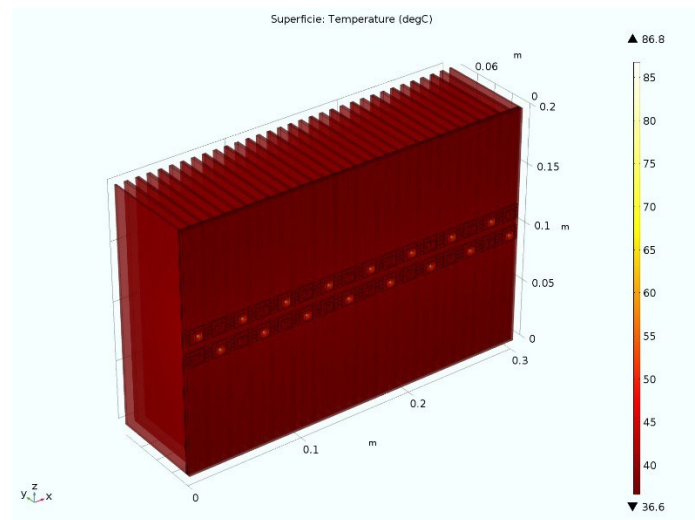
4.7.4 Convección natural para arreglo de 16 pares de MOSFETs separados 18 mm

Esta simulación utiliza un disipador de aluminio de: 200 mm x 300 mm x 80 mm, que transfiere el calor por convección natural para dieciséis pares de MOSFETs en paralelo, montados en una placa de cobre y separados entre sí 18 mm.



(a)

(b)



(c)

Figura 48. Diagrama de dimensionamiento y resultados en COMSOL de simulación de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 300mm x 80mm junto a PCB con vías de cobre de 1,875 mm de diámetro y 2 mm de longitud. (a) Geometría general del disipador de aluminio. (b) Enmallado general del disipador de aluminio. (c) Resultados del perfil de temperatura del disipador con la potencia nominal de 16 MOSFETs IRLH5030PBF.

4.8 Simulación del arreglo por efecto del tipo de material del disipador

De acuerdo con el plan de la tabla 3, sección 3.3, se evaluó el efecto del material sobre un arreglo de treinta y dos (16 pares) MOSFETs de potencia ubicados en una posición óptima sobre un PCB con vías de evacuación térmica, para tres tipos diferentes de disipador térmico en términos de material.

4.8.1 Convección natural para 32 MOSFETs montados en disipador de aluminio

Esta simulación utiliza un disipador de aluminio de: 200 mm x 300 mm x 80 mm, un PCB con vías de cobre de 1,5 mm de diámetro y 2 mm de longitud, por convección natural para un arreglo de treinta y dos (16 pares) MOSFETs de potencia.

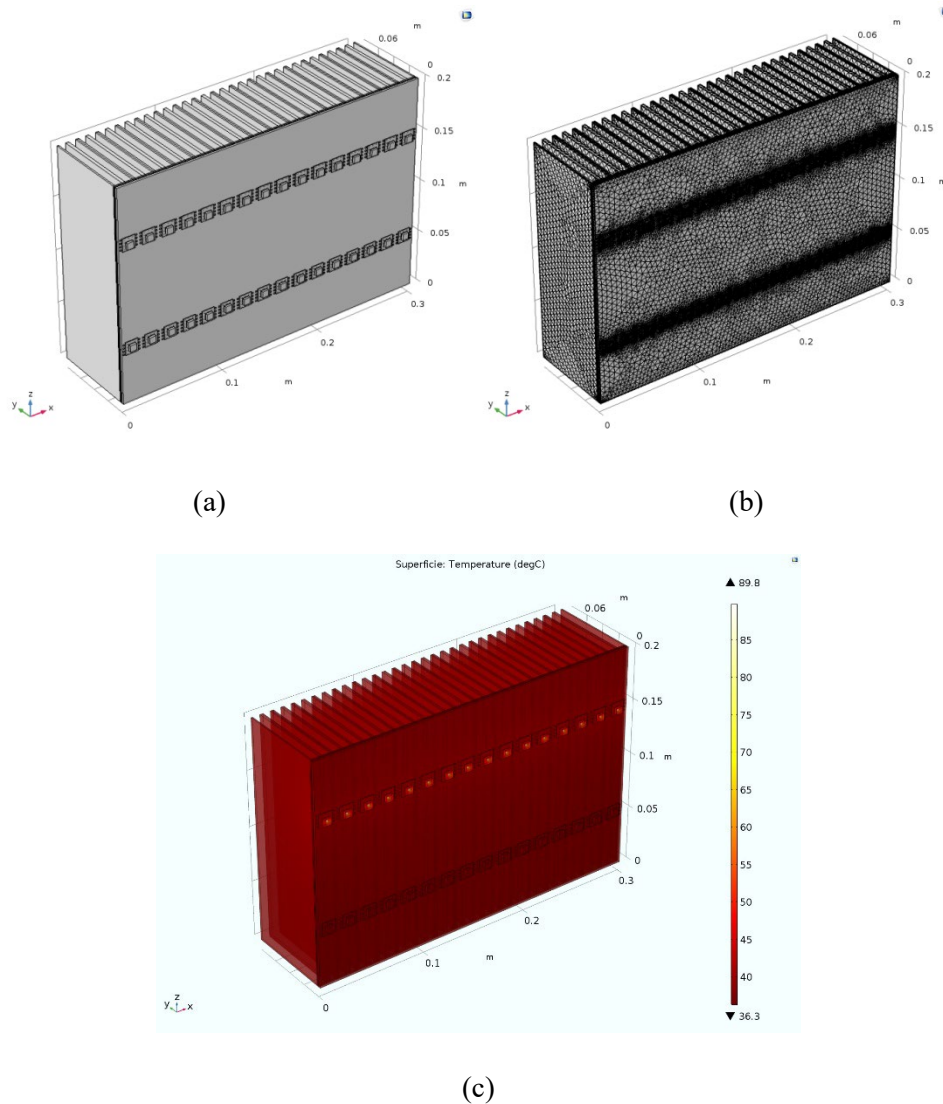


Figura 49. Diagrama de dimensionamiento y resultados en COMSOL de simulación de transferencia de calor por convección natural de un disipador de aluminio de 200mm x 300mm x 80mm junto a PCB con vías de cobre de 1,6 mm de diámetro y 2 mm de longitud. (a) Geometría general del disipador de aluminio. (b) Enmallado general del disipador de aluminio. (c) Resultados del perfil de temperatura del disipador con la potencia nominal de 16 MOSFETs IRLH5030PBF.

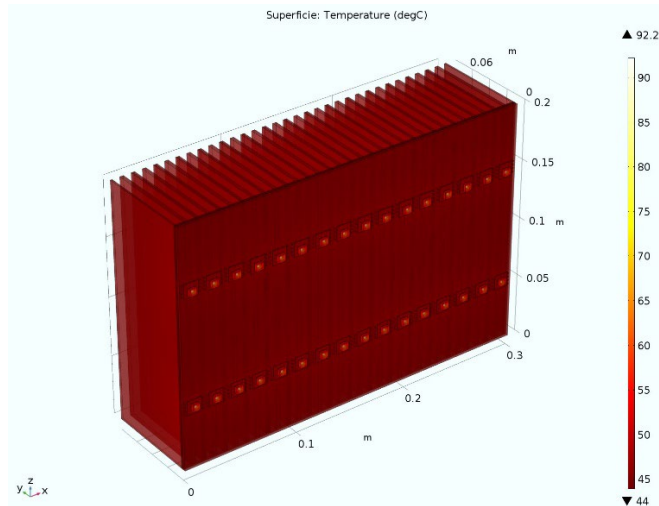


Figura 50. Resultados del perfil de temperatura del disipador de aluminio con la potencia nominal de treinta y dos (32) MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

Como se puede apreciar tanto en la Fig. 49 como en la Fig. 50, para ambas condiciones la máxima temperatura alcanzada en los componentes electrónicos supera los 75 °C.

4.8.2 Convección natural para 32 MOSFETs montados en disipador de cobre

Esta simulación utiliza un disipador de cobre de: 200 mm x 300 mm x 80 mm y un PCB con vías de cobre de 1,5 mm de diámetro y 2 mm de longitud, por convección natural para un arreglo de treinta y dos (16 pares) MOSFETs de potencia.

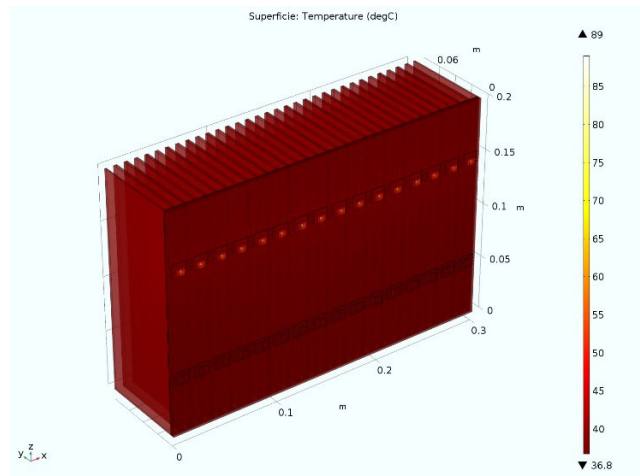


Figura 51. Resultados del perfil de temperatura del disipador de cobre con la potencia nominal de dieciséis (16) MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

4.8.3 Convección natural para 32 MOSFETs montados en disipador de grafito

Esta simulación utiliza un disipador de grafito de: 200 mm x 300 mm x 80 mm, un PCB con vías de cobre de 1,5 mm de diámetro y 2 mm de longitud, por convección natural para un arreglo de treinta y dos (16 pares) MOSFETs de potencia.

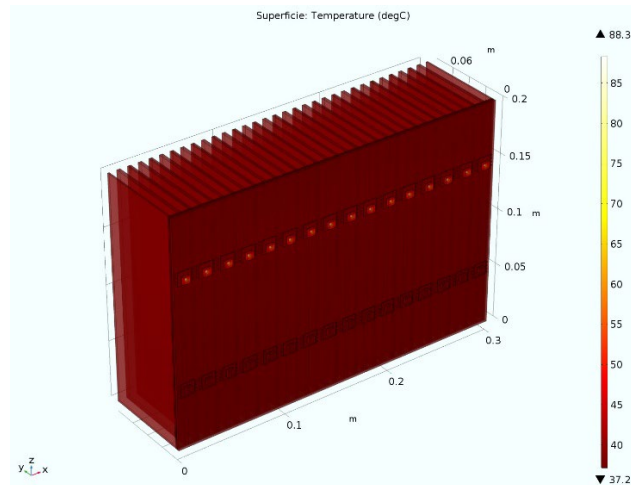


Figura 52. Resultados del perfil de temperatura del disipador de grafito con la potencia nominal de dieciséis (16) MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

4.9 Simulación del arreglo por efecto de la geometría del disipador

Seguidamente, de acuerdo con el plan de la tabla 3, sección 3.3, se brindan a continuación los resultados obtenidos utilizando el software de simulación multifísica COMSOL para el efecto que tienen la geometría básica del disipador. Particularmente, se evaluaron tres escenarios: disipador con aletas rectangulares, disipador con aletas tubulares y disipador con aletas cilíndricas hexagonales.

Geometría y condiciones de operación

Disipador por convección natural de 25 mm x 25 mm x 12 mm.

En este modelo particular, se consideran los valores:

$Q_{in} = 6.0W$ (2 pares de MOSFETs) y $T_{ext} = 301.15K$

4.9.1 Convección forzada con disipador de aletas rectangulares

Esta simulación utiliza un disipador de 25mm x 25mm x 12mm con aletas rectangulares con una corriente de aire de 1m/s, suficiente para disipar la potencia de dos MOSFETs IRLH5030PBF encendidos (6.0W) tal y como se indica a continuación.

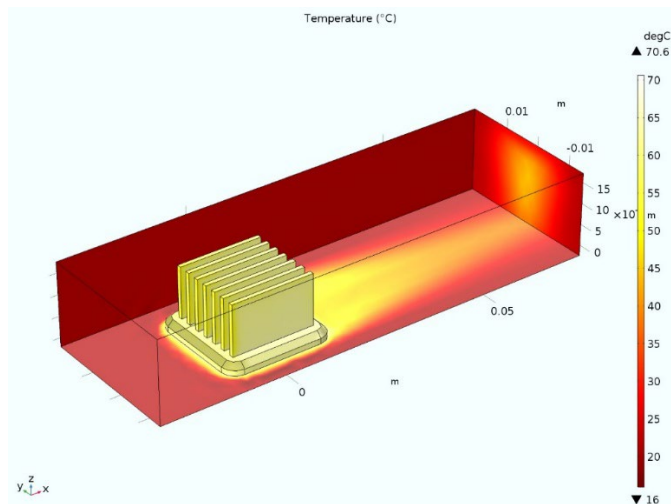


Figura 53. Resultados del perfil de temperatura del disipador con aletas rectangulares y la potencia nominal de dos MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

4.9.2 Convección forzada con disipador de aletas tubulares

Esta simulación utiliza un disipador de 25mm x 25mm x 12mm de aletas tubulares con una corriente de aire de 1m/s, suficiente para disipar la potencia de dos MOSFETs IRLH5030PBF encendidos (6.0W) tal y como se indica a continuación.

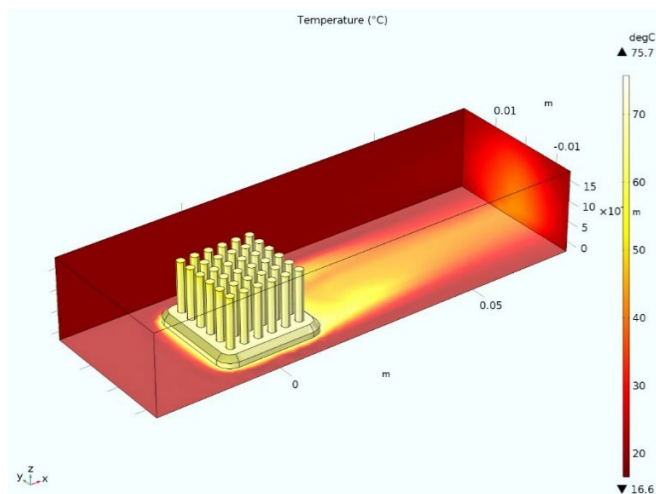


Figura 54. Resultados del perfil de temperatura del disipador con aletas tubulares cilíndrica y la potencia nominal de dos MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

4.9.3 Convección forzada con disipador de aletas hexagonales

Esta simulación utiliza un disipador de 25mm x 25mm x 12mm de aletas hexagonales con una corriente de aire de 1m/s, suficiente para disipar la potencia de dos MOSFETs IRLH5030PBF encendidos (6.0W) tal y como se indica a continuación.

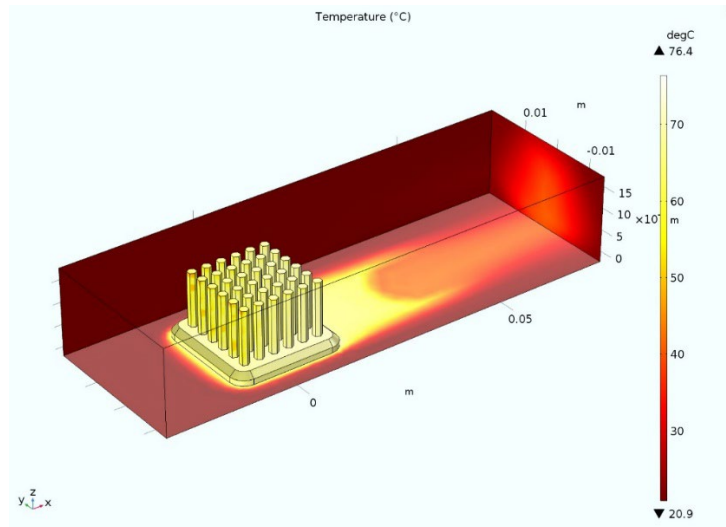


Figura 55. Resultados del perfil de temperatura del disipador con aletas tubulares hexagonales y la potencia nominal de dos MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

4.10 Simulación del arreglo por efecto del mecanismo de disipación

Seguidamente, de acuerdo con el plan de la tabla 3, sección 3.3, se dan a continuación los resultados obtenidos utilizando el software de simulación multifísica COMSOL para el efecto que tiene el mecanismo de disipación. Particularmente, se evaluaron dos escenarios: mecanismo por convección forzada y mecanismo por tubos de calor ó *heat piping*.

Geometría y condiciones de operación

Disipador por convección natural de 150 mm x 100mm x 40 mm.

En este modelo particular, se consideran los valores:

$$Q_{in} = 48,16W \text{ (1 par de MOSFETs) y } T_{ext} = 301.15K$$

4.10.1 Convección forzada (para dieciséis encendidos MOSFETs IRLH5030PBF)

En esta simulación se utiliza un disipador de aluminio de 150mm x 100mm x 40mm con una corriente de aire de 1m/s, suficiente para disipar la potencia de dieciséis MOSFETs IRLH5030PBF encendidos (49W), montados en una placa de cobre tal y como se indica a continuación.

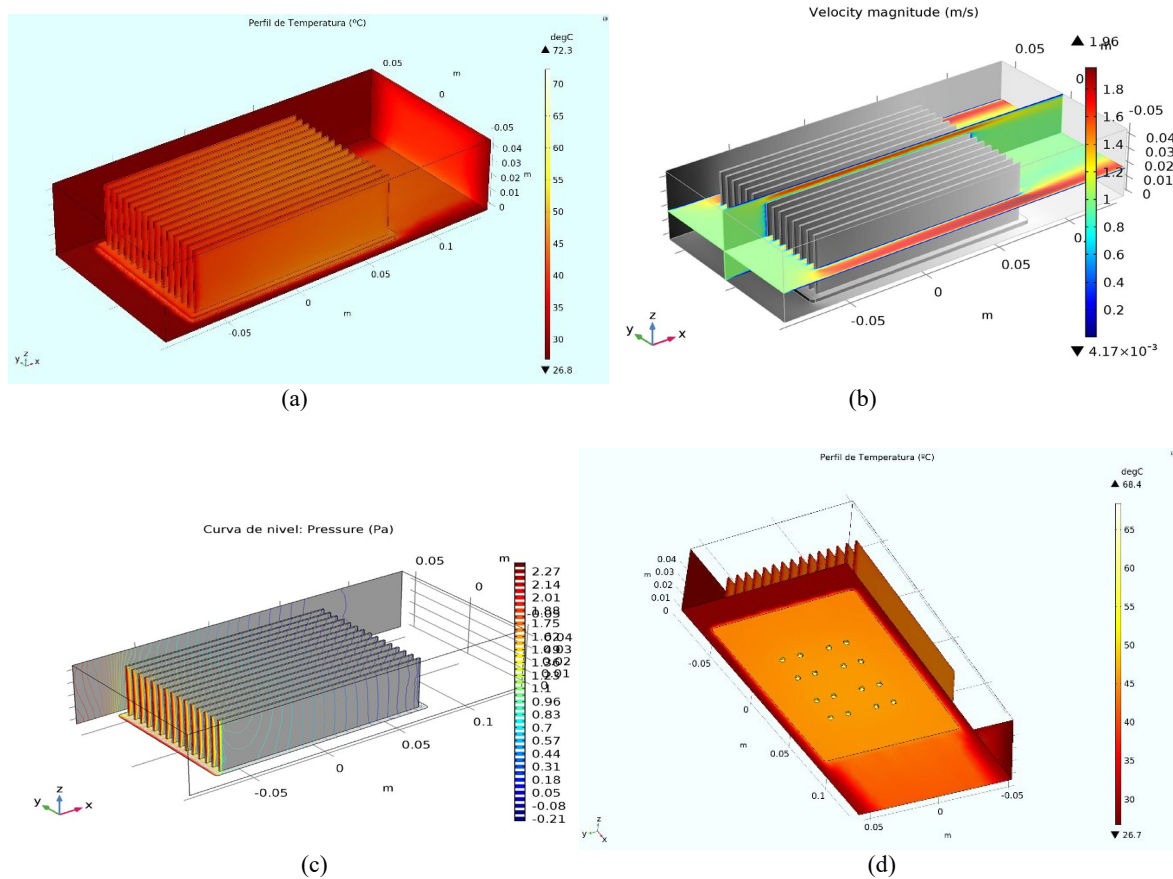


Figura 56. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación de transferencia de calor por convección forzada de un disipador de aluminio de 150mm x 100mm x 40mm. (a) Resultados del perfil de temperatura del disipador con la potencia nominal de dieciséis MOSFETs IRLH5030PBF encendidos. (b) Resultado del perfil de velocidad de la corriente de aire a la que se expone el disipador. (c) Resultado del perfil de presión estática de la corriente de aire a la que se expone el disipador. (d) Distribución geométrica de los dieciséis MOSFETs en la parte posterior del disipador.

Como se puede apreciar en las Fig. 56, esta configuración logra alcanzar como temperatura máxima en los componentes electrónicos un valor de 72.3 °C.

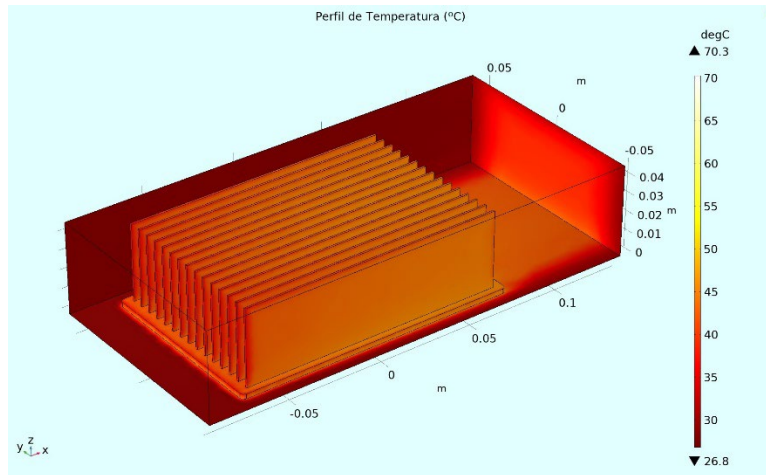


Figura 57. Resultado del perfil de temperatura de un disipador de cobre de 150mm x 100mm x 40mm expuesto a una corriente de aire de 1m/s con la potencia nominal de dieciséis MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

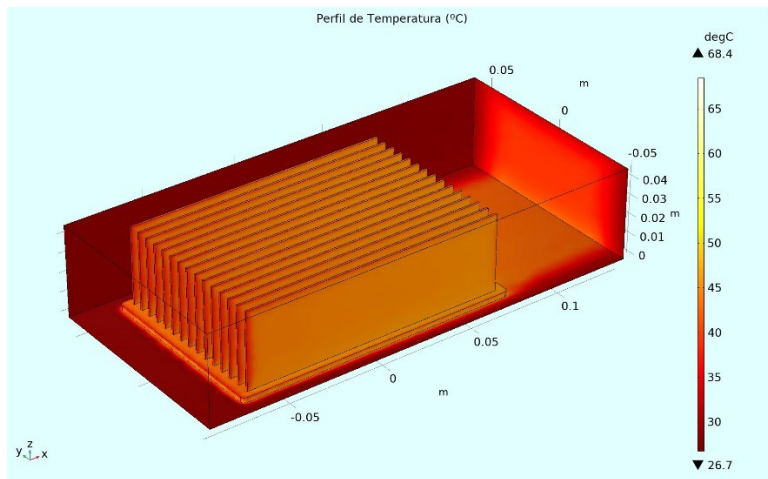


Figura 58. Resultado del perfil de temperatura de un disipador de cobre de 150mm x 100mm x 40mm expuesto a una corriente de aire de 1m/s con la potencia nominal de dieciséis MOSFETs IRLH5030PBF encendidos.

Adicionalmente, como parte de esta simulación, se modificó el tipo de material del disipador por cobre y por grafito respectivamente. De acuerdo con la Fig. 57 y la Fig. 58, los resultados arrojan que el diferencial de temperatura no es significativo respecto de los resultados del disipador de aluminio con las mismas dimensiones y misma fuente de calor: 49 W (dieciséis MOSFETs IRLH5030PBF encendidos) que se muestran en la Fig. 56.

4.10.2 Principio de tubos de calor para dieciséis (16) MOSFETs IRLH5030PBF

Supuestos

Como primer supuesto se desprecia los efectos de gravedad. Así mismo se supone que la transferencia de calor es debida principalmente a la evaporación / condensación y convección de vapor, de modo que el transporte de calor en la malla se simplifica como conducción con un coeficiente de transferencia de calor efectivo. Las propiedades de los materiales se mantienen constantes con excepción de la densidad de vapor.

Geometría y condiciones de operación

Se utiliza un tubo plano de disipación de calor (“Flat Heat Pipe” por su denominación en inglés) de cobre, relleno de agua con malla de polvo de cobre sinterizado. Se modela $\frac{1}{4}$ de la cámara por razones de simetría.

En este modelo particular, se consideran los valores:

$$Q_{in} = 49W \text{ (16 MOSFETs encendidos)}, h = 1100 \frac{W}{m^2K} \text{ y } T_{amb} = 301K$$

Parámetro	Cobre (s)	Agua (l)	Vapor de agua (v)
Conductividad térmica (W/m·K)	400	0,61	0,0188
Densidad (kg/m ³)	8960	1000	Ideal gas $\rho = p/RT$
Calor específico (J/kg·K)	385	4182	1874
Viscosidad (Pa·s)	-	-	10 ⁻⁵

Tabla 6. Propiedades del material el mecanismo por tubos de calor.

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
length	200[mm]	0.2 m	
width	150[mm]	0.15 m	
height	34.93[mm]	0.03493 m	
d_wall	3.175[mm]	0.003175 m	
d_wick	1.651[mm]	0.001651 m	
inner_length	(width - 2*(d_wall + d_wick))	0.14035 m	
width_heater	50.8[mm]	0.0508 m	
h_fg	2473[kJ/kg]	2.473E6 J/kg	Calor latente
T_ref	301.15 [K]	273.15 K	
p_ref	1[atm]	1.0133E5 Pa	
Mn	18.01528[g/mol]	0.018015 kg/mol	Masa molar
Q_in	160[W]	160 W	
h_conv	1200[W/m ² ·K]	1200 W/(m ² ·K)	
T_amb	301 [K]	301 K	

Tabla 7. Parámetros del modelo para el mecanismo por tubos de calor.

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
T0	301[K]	301 K	
kf	0.61	0.61	
ks	400	400	
k_eff	$k_f \cdot (k_f + k_s - 0.5 \cdot (k_f - k_s)) / (k_f + k_s + 0.5 \cdot (k_f - k_s))$	1.8226	

Tabla 7. Parámetros del modelo para el mecanismo por tubos de calor (cont.)

Resultados

Conductividad térmica equivalente se puede expresar como: $k_{eq} = \frac{Q_{in} \cdot l}{\Delta T \cdot A}$

La cual depende linealmente del largo del tubo de calor ("heat pipe")

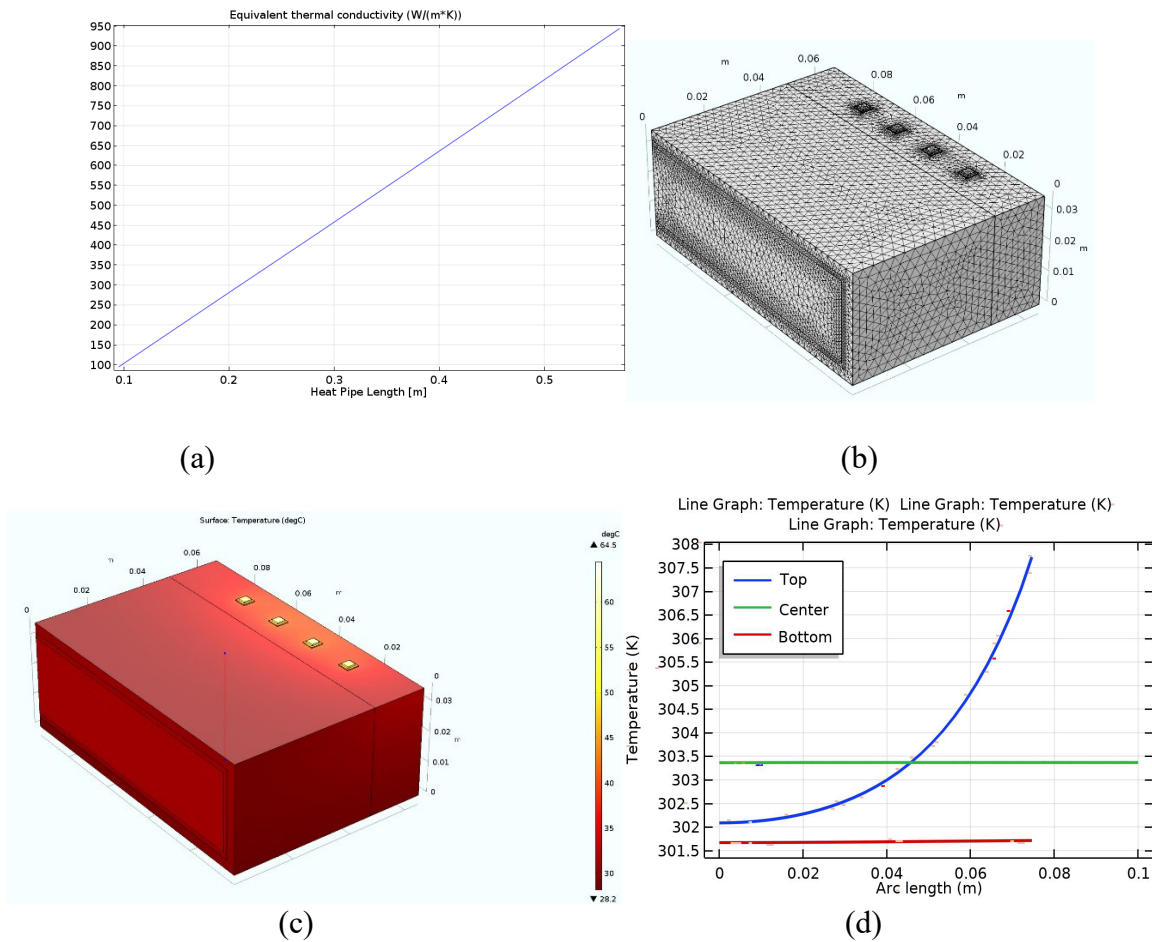


Figura 59. Diagrama de dimensionamiento y resultados de simulación de transferencia de calor por tubos de calor ("heat pipe") de un disipador de cobre de 200mm x 150mm x 30mm. a) Curva de la conductividad térmica equivalente versus la longitud del tubo de calor ("heat pipe"). b) Diagrama del enmallado en COMSOL de un cuarto del disipador por tubo de calor ("heat pipe"). c) Resultados del perfil de temperatura del disipador con la potencia nominal de dieciséis MOSFETs IRLH5030PBF encendidos. d) Curva de la temperatura del condensador del tubo de calor versus la longitud del tubo de calor ("heat pipe").

Como se puede apreciar en la Fig. 59, este mecanismo de disipación es capaz de reducir la temperatura de los transistores MOSFETs de potencia a un valor máximo de 64,5 °C.

4.11. Matrices de resultados

Seguidamente, de acuerdo con la sección 3.3, se presentan a continuación, los resultados de cada uno de los escenarios definidos para el cumplimiento de los objetivos del presente trabajo de investigación. Para ello se han elaborados los resultados del software de simulación multifísica COMSOL, tabulando las siguientes tablas con la intención de establecer matrices comparativas.

4.11.1 Matriz comparativa entre tres tipos de interfaz para la transferencia de calor.

Convección natural con arreglo de un par de MOSFETs IRLH5030PBF			
Parámetro	Disipador de 200 mm x 100 mm x 40 mm/PCB con vías de 1,60 mm Ø y 2mm de largo	Disipador de 200 mm x 100 mm x 40 mm/PCB con vías de 2,66 mm Ø y 2mm de largo	Disipador de 3200 mm x 100 mm x 40 mm/montado en placa de cobre
Temperatura máxima en el MOSFET	77.7 °C)	76.3 °C)	75.6 °C)

Tabla 8. Matriz de capacidad de disipación del disipador en función del diámetro de las vías sólidas del PCB.

De acuerdo con la tabla 8, el efecto que tiene el diámetro de las vías en la capacidad de disipación depende del diámetro y largo de la vía y de la superficie de contacto del dispositivo con la PCB. De ahí que esta característica disponible en las PCBs puede ser de especial importancia, si la resistencia térmica de diseño es superior a la resistencia máxima permisiva definida en el dimensionamiento teórico de este arreglo (sección 4.4).

4.11.2. Matriz comparativa con motivo de la distancia de separación entre los MOSFETs.

Distancia máxima entre MOSFETs montados en el disipador		
Parámetro	Disipador de 200 mm x 100 mm x 40 mm con un par de MOSFETs montados en una placa de cobre a una distancia de 94mm entre si	Disipador de 200 mm x 100 mm x 40 mm con un par de MOSFETs montados en una placa de cobre a una distancia de 18mm entre si
Temperatura máxima en el MOSFET	78.1 °C)	78.6 °C)
Parámetro	Disipador de 200 mm x 300 mm x 80 mm con 16 pares de MOSFETs montados en una placa de cobre a una distancia de 94mm entre si	Disipador de 200 mm x 300 mm x 80 mm con 16 pares de MOSFETs montados en una placa de cobre a una distancia de 18mm entre si
Temperatura máxima en el MOSFET	86.5 °C)	86.8 °C)

Tabla 9. Matriz de capacidad de disipación del disipador en función de la distancia entre MOSFETs.

De acuerdo con la tabla 9, el efecto de la distancia de separación entre los MOSFETs es poco representativo. Menos de un grado de diferencia tanto en el arreglo de dos pares de MOSFETs encendidos como en el arreglo de 16 pares de MOSFETs encendidos.

4.11.3. Matriz comparativa entre los tres tipos de disipador desde el punto de vista de materiales de fabricación.

Convección natural con arreglo de 2 MOSFETs IRLH5030PBF			
Parámetro	Disipador de 200 mm x 100 mm x 40 mm de aluminio	Disipador de 200 mm x 100 mm x 40 mm de cobre	Disipador de 200 mm x 100 mm x 40 mm de grafito
Temperatura máxima en el MOSFET	77.7 °C)	77.3 °C)	76.9 °C)
Convección natural con arreglo de 16 pares de MOSFETs IRLH5030PBF			
Parámetro	Disipador de 300 mm x 200 mm x 100 mm de aluminio	Disipador de 300 mm x 200 mm x 100 mm de cobre	Disipador de 300 mm x 200 mm x 100 mm de grafito
Temperatura máxima en el MOSFET	89.8 °C)	89.0 °C)	88.3 °C)
Convección forzada con arreglo de 16 MOSFETs IRLH5030PBF encendidos			
Parámetro	Disipador de 150mm x 100mm x 40mm de aluminio	Disipador de 150mm x 100mm x 40mm de cobre	Disipador de 150mm x 100mm x 40mm de grafito
Temperatura máxima en el MOSFET	72.3 °C)	70.3 °C)	68.4 °C)

Tabla 10. Matriz de capacidad de disipación del disipador en función del material.

De acuerdo con la tabla 10, el efecto que tiene el tipo de material del disipador en la capacidad de disipación del arreglo es poco significativo considerando el hecho de que se evaluó tanto la potencia máxima de un MOSFET IRLH5030PBF (3.01W) como la potencia total de dieciséis (16) MOSFETs IRLH5030PBF (48.16 W). Esto se debe básicamente a la baja resistencia térmica que presenta el disipador desde el punto de vista de transferencia de calor por conducción, pues el coeficiente de conducción térmica del aluminio, del cobre y del grafito están por el orden de las centenas.

4.11.4. Matriz comparativa entre los dos tipos de disipador desde el punto de vista de geometría.

Convección forzada con arreglo de 2 MOSFETs IRLH5030PBF			
Parámetro	Disipador de 25mm x 25mm x 12mm con aletas solidas rectangulares	Disipador de 25mm x 25mm x 12mm con aletas solidas cilíndricas	Disipador de 25mm x 25mm x 12mm con aletas solidas hexagonales
Temperatura máxima en el MOSFET	70.6 °C)	75.7 °C)	76.4 °C)

Tabla 11. Matriz de capacidad de disipación del disipador en función de la geometría.

De acuerdo con la tabla 11, el efecto que tiene la geometría en el disipador es muy representativo y está relacionado con el área máxima de contacto con el fluido (aire a temperatura ambiente) en la transferencia de calor. En este caso particular, a pesar de que el área superficial total de los disipadores con aletas cilíndricas o con aletas hexagonales se aproxime al área superficial total del disipador de aletas rectangulares, este último siempre presenta un área de contacto directo con el fluido, mayor de ahí la diferencia en los perfiles de temperatura para una misma potencia (6.02 W).

4.11.5. Matriz comparativa entre los tres tipos de disipador desde el punto de vista de mecanismos de transferencia de calor.

Mecanismo de disipación para un arreglo de 32 MOSFETs IRLH5030PBF			
Parámetro	Disipador de cobre 300 mm x 200 mm x 80 mm por convección natural	Disipador de cobre 200 mm x 100 mm x 40 mm por convección forzada	Disipador de cobre 200 mm x 150 mm x 30 mm por tubos de calor
Temperatura máxima en el MOSFET	89.0 °C)	70.3 °C)	64.5 °C)

Tabla 12. Matriz de capacidad de disipación del disipador en función del mecanismo de disipación.

De acuerdo con la tabla 12, los disipadores por convección forzada y el disipador que utiliza tubos de calor logran cumplir con el requerimiento de disipación de calor para el sistema de recombinación propuesto, pues logran bajar la temperatura máxima en los dispositivos semiconductores por debajo de los 75°C (se estima una potencia aproximada de 48.16 W).

Capítulo 5

Conclusiones

Con base en la hoja de especificaciones del transistor MOSFET ITH3-2393 y el diagrama del circuito de reconfiguración dinámica de los módulos fotovoltaicos, se logró definir el circuito térmico equivalente en modo estático y en modo dinámico para entender los requerimientos óptimos de disipación térmica de los dispositivos en la PCB.

Un disipador de aletas rectangular típico, con dimensiones ajustadas al espacio físico disponible, no es capaz de disipar el calor generado por el arreglo de transistores de potencia mediante el mecanismo por convección natural, de tal manera que estos puedan trabajar dentro de los rangos recomendados por el fabricante.

La capacidad de disipación de un sistema con vías mejora de forma significativa con el incremento en el área efectiva de transferencia térmica.

Un disipador de aletas rectangular típico, con dimensiones ajustadas al espacio físico disponible, es capaz de disipar el calor generado por el arreglo de transistores de potencia, mediante el mecanismo por convección forzada que usa una velocidad aproximada del aire de 1 m/s . Así que los transistores pueden trabajar dentro de los rangos recomendados por el fabricante.

Un disipador de aletas rectangulares de aluminio por convección natural presenta una capacidad de disipación muy similar a la de un disipador de cobre y uno de grafito con las mismas dimensiones.

Un disipador de aluminio de aletas rectangulares presenta casi las mismas prestaciones desde el punto de vista de capacidad de disipación térmica que uno de cobre o uno de grafito, pero mucho más barato en términos de costo.

Un disipador de aletas rectangulares presenta un mejor desempeño desde el punto de vista de disipación térmica que los otros dos disipadores con aletas cilíndricas y hexagonales.

El mecanismo de disipación por convección forzada requiere de un sistema de ventilación que consume energía eléctrica y ese insumo es indispensable para garantizar su capacidad de disipación térmica.

El mecanismo de disipación térmica por tubos de calor presenta un mejor desempeño de disipación que el mecanismo de disipación por convección forzada y no requiere de un sistema activo para garantizar su capacidad de disipación térmica.

Apéndice A

Esquemáticos para prueba experimental

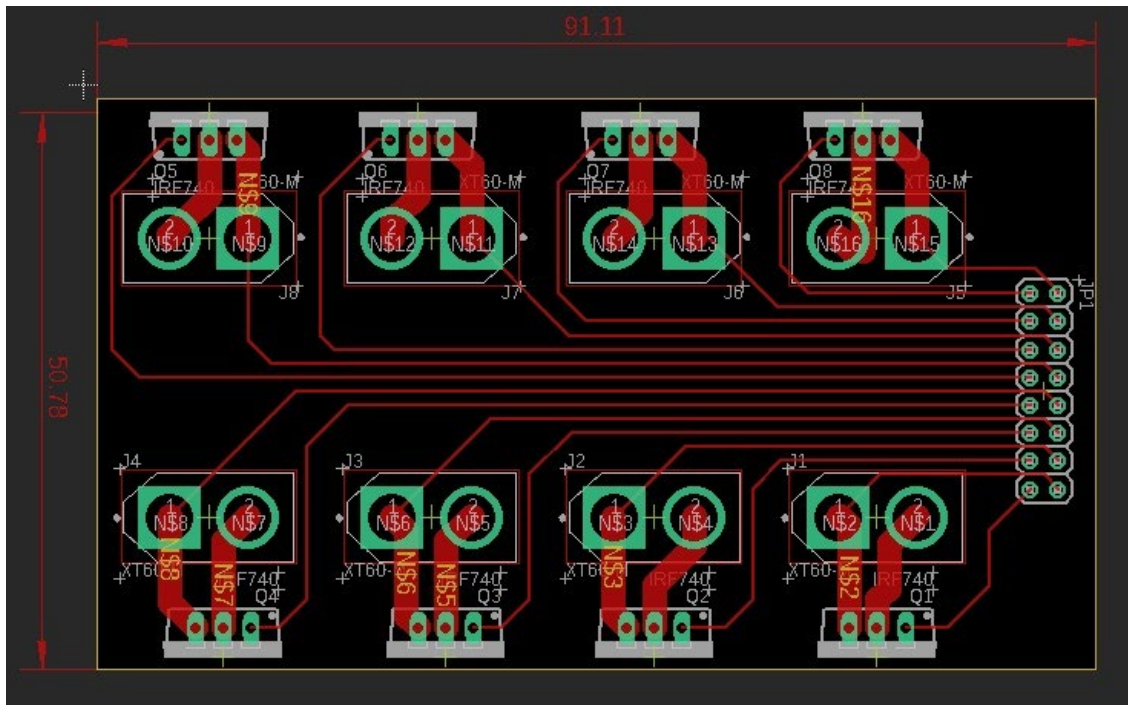


Figura 60. Prototipo de PCB y rutas de interconexión de un arreglo de ocho MOSFETs para prueba experimental.

Apéndice B

Introducción a la transferencia de calor

B.I Generalidades

La Transferencia de calor de acuerdo con [4] es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos diferentes. Siempre que exista una diferencia de temperatura, la energía se transfiere de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. De acuerdo con los conceptos de la Termodinámica, la energía que se transfiere como resultado de una diferencia de temperatura es el calor.

- Las leyes de la termodinámica tratan de la transferencia de energía, pero solo se aplican a sistemas que están en equilibrio (pueden utilizarse para predecir la cantidad de energía requerida para modificar un sistema de un estado de equilibrio a otro), pero no sirven para predecir la rapidez (tiempo) con que pueden producirse estos cambios.
- La transferencia de calor, complementa los principios termodinámicos, proporcionando métodos de análisis que permitan predecir esta velocidad de transferencia térmica.
- Para proceder a realizar un análisis completo de la transferencia del calor es necesario considerar tres mecanismos diferentes: conducción, convección y radiación.
- El diseño y proyecto de los sistemas de un intercambio de calor y conversión energética requieren de cierta familiaridad con cada uno de estos mecanismos, así como de sus interacciones.

B.II Mecanismos de transferencia de calor

La experiencia demuestra según [10] que el calor producido por un foco calorífico se propaga por todo el espacio que lo rodea. Esta transmisión de calor puede producirse de tres formas:

a. Conducción

Es el principal medio de propagación del calor en un cuerpo sólido. Se realiza por la transferencia de energía cinética de moléculas, es decir, se transmite por el interior del cuerpo estableciéndose una circulación de calor. La máxima cantidad de calor que puede atravesar un cuerpo es aquella para la cual se consigue una temperatura estable en todos los puntos del cuerpo. En este tipo de transmisión se debe tener en cuenta la conductividad térmica de las sustancias (cantidad de calor transmitido por unidad de tiempo, superficie, gradiente de temperatura, etc.).

b. Convección

El calor de un sólido se transmite mediante la circulación de un fluido que lo rodea y éste lo transporta a otro lugar; a este proceso se le llama convección natural. Si la circulación del fluido está provocada por un medio externo se denomina convección forzada.

c. Radiación

El calor se transfiere mediante emisiones electromagnéticas que son irradiadas por cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor que 0 K. El estado de la superficie influye en gran medida en la cantidad

de calor radiado. Las superficies mates son más favorables que las pulidas y los cuerpos negros son los de mayor poder de radiación; por este motivo se efectúa un ennegrecimiento de la superficie radiante. La transferencia de calor por radiación no se tiene en cuenta puesto que a las temperaturas a las que se trabaja, ésta es prácticamente despreciable [10].

B.III Principios físicos de transferencia de calor por conducción

De acuerdo con [4] la conducción, es el único mecanismo de transmisión de calor posible en los medios sólidos opacos, cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura. El calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, debido al movimiento cinético o el impacto directo de las moléculas como en el caso de los fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones como sucede en los metales.

La ley básica de la conducción del calor (Joseph Fourier), establece: “La tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección” [4].

Fourier encontró según [11] que “el flujo de calor en el interior de un sólido o de un fluido en reposo es proporcional al gradiente local de temperatura y a la conductividad térmica del material”.

Fórmula del gradiente.

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (53)$$

donde \vec{q} es el vector densidad de flujo de calor expresado en W/m² y ∇T es el gradiente de temperaturas. La constante de proporcionalidad k es una propiedad del sistema que se denomina conductividad térmica (se expresa en unidades de W/mK) y depende de diversos factores [12].

En un medio en que existe un campo de temperatura $T(x, y, z, t)$, en [12] la ley de Fourier expresa los flujos de calor instantáneos en las tres direcciones por:

$$q_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (54)$$

$$q_y = -k_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (55)$$

$$q_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (56)$$

De acuerdo con [13], para completar el estudio de la transferencia de calor por Conducción, hay que recordar, que la ecuación general de Fourier surge a partir de las ecuaciones de conservación de la energía y a partir de la aceptación de la hipótesis fundamental de la conducción del Calor o ley de Fourier. Si además se aceptan las hipótesis siguientes para el cuerpo en cuestión:

- Material Homogéneo
- Material Isótropo
- Las propiedades del material no cambian fuertemente con la temperatura en el rango de temperaturas del problema.
- No se realiza trabajo de contracción o dilatación debido a procesos térmicos.
- No hay fuentes internas de calor.

Se llega a la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (57)$$

donde T es Temperatura, t es tiempo y α es la difusividad térmica del material.

La expresión matemática que relaciona la conductividad térmica (expresada como k), el calor específico (expresado como C_p y denominado igualmente como capacidad de calor), y su densidad (ρ) es:

$$\alpha = k / (\rho \cdot C_p) \quad (58)$$

En procesos estacionarios, el término a la izquierda del signo igual de (5) se considera nulo y esta condición reduce el problema a la resolución de la ecuación de Laplace para la temperatura [13].

Si se tiene una fuente térmica, sea S la tasa de generación de energía por unidad de volumen y de tiempo en el volumen de control. El balance anterior expresado en forma diferencial de acuerdo con [11] se escribe como:

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S \quad (59)$$

Los términos, de izquierda a derecha, representan:

- El término transiente o de acumulación de energía en el volumen de control.
- Los términos conductivos.
- Y el término fuente.

B.IV Principios físicos de transferencia de calor por convección

Cuando un fluido a T_F se pone en contacto con un sólido cuya superficie de contacto está a una temperatura distinta T_{pF} el proceso de intercambio de energía térmica se denomina convección [2].

Existen dos tipos de convección:

- Libre o natural
- Forzada

En la convección natural, Fig. 61, la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a unas fuerzas ascensionales; el fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior; ejemplos típicos son la transmisión de calor al exterior desde la pared o el tejado de una casa en un día soleado sin viento, la convección en un tanque que contiene un líquido en reposo en el que se encuentra sumergida una bobina de calefacción, el calor transferido desde la superficie de un colector solar en un día en calma, etc.

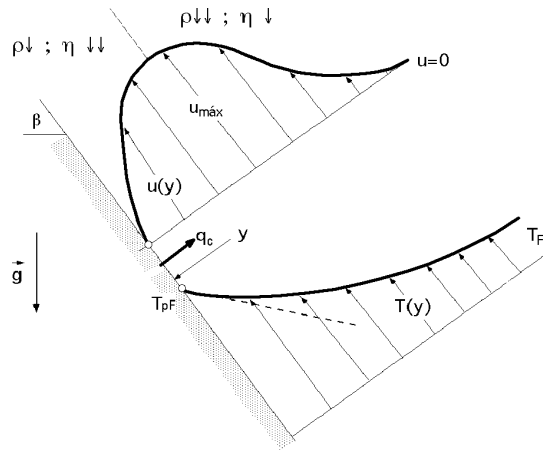


Figura 61. Distribución de la temperatura y la velocidad en convección natural sobre una placa plana inclinada [2].

La convección forzada tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido con una velocidad u_F sobre una superficie que se encuentra a una temperatura T_{pF} , mayor o menor que la del fluido T_F , Fig. 62.

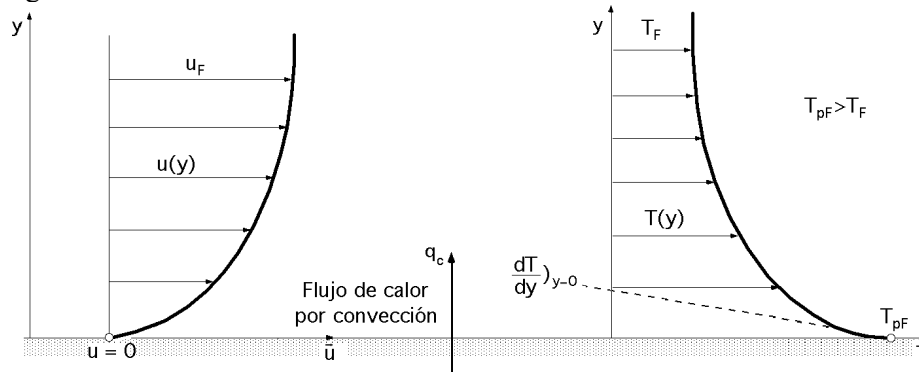


Figura 62. Distribución de la temperatura y la velocidad sobre una placa plana en convección forzada [2].

Como la velocidad del fluido en la convección forzada u_F es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.

Independientemente de que la convección sea natural o forzada, la cantidad de calor transmitida Q_C , se puede escribir (Ley de Newton):

$$Q_C = h_{CF} \cdot A (T_{pF} - T_F) \quad (60)$$

En la que:

- h_{CF} es el coeficiente de transmisión de calor por convección en la interfaz líquido- sólido, en W/m^2K
- A es el área superficial en contacto con el fluido, en m^2
- T_{pF} es la temperatura de la superficie
- T_F es la temperatura del fluido

La ecuación anterior sirve como definición del coeficiente de convección h_{CF} ; su valor numérico se tiene que determinar analítica o experimentalmente [2].

La distribución de temperaturas en la convección natural y en la forzada tiene una forma similar; en ambos casos, el mecanismo de la transmisión del calor en la interfaz fluido-sólido corresponde a la conducción.

El coeficiente de transmisión de calor por convección forzada depende, en general, de la densidad, de la viscosidad y de la velocidad del fluido, así como de sus propiedades térmicas (conductividad térmica y calor específico), es decir: $h_{CF} = f(\rho, \eta, u_F, k, C_p)$.

Bibliografía

- [1] G. Langer, M. Leitgeb, J. Nicolics, M. Unger, H. Hoschopf, and F. P. Wenzl, “Advanced Thermal Management Solutions on PCBs for High Power Applications,” *J. Microelectron. Electron. Packag.*, vol. 11, no. 3, pp. 104–114, 2014, doi: 10.4071/imaps.422.
- [2] P. Fernández Díez, *Ingeniería térmica y de fluidos*. 1992.
- [3] T. L. BERGMAN, A. S. LAVINE, F. P. INCROPERA, and D. P. DEWITT, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, SEVENTH ED., vol. 4, no. 3. Jefferson City, Missouri, USA: Don Fowley, 2011.
- [4] D. P. INCROPERA, FRANK P. ; DeWITT, “Fundamentos a la transferencia de calor,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [5] D. E. Calor, “Disipación de calor,” pp. 1–32, 2011.
- [6] Toshiba, “Power MOSFET Thermal Design and Attachment of a Thermal Fin,” *Tech. Rep.*, pp. 1–12, 2016.
- [7] T. M. Principles *et al.*, “Optimizing PCB Thermal Performance for Cree ® XLamp ® LEDs Figure 1 . Cree XLamp XP LED Package,” pp. 1–21, 2015.
- [8] G. Systems, “PCB Thermal Design Guide for GaN Enhancement Mode Power Transistors,” pp. 1–15, 2015, doi: 10.1038/483531a.
- [9] C. Acebes, “El Aluminio,” 2005, pp. 1–16, 2015, [Online]. Available: http://www.aim.es/publicaciones/bol2/16_Aluminio.pdf.
- [10] A. Trujillo, F.D.; Pozo, A; Triviño, “Disipación de calor,” pp. 1–32, 2011.
- [11] R. Frederick G., “Transferencia de Calor,” 2006.
- [12] A. Criado Aldeanueva, F., Aguiar, J. y Gómez Merino, “Tema 7: Fundamentos de transferencia de calor,” 2011.
- [13] M. Homog and M. Is, “Conducción en régimen transitorio,” pp. 1–26.
- [14] R. Hernández, C. Fernández, P. Baptista, “Metodología de la Investigación”, 5ta Edición, México D.F., México: McGraw Hill, 2010, cap. 5, pp. 78-89.
- [15] J. Cegarra, “Metodología de la investigación científica y tecnológica”, Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, 2004, cap. 5, pp. 91.
- [16] M. J. Roberts. Señales y Sistemas. Análisis mediante métodos de transformada y MatLab. McGraw Hill, 2005.
- [17] E. Wyrwas, L. Condra, and a Hava, “Accurate quantitative physics-of-failure approach to integrated circuit reliability,” IPC APEX EXPO Tech. Conf. 2011, vol. 3, pp. 1776–1815, 2011.
- [18] A. Morozumi, H. Hokazono, Y. Nishimura, Y. Ikeda, Y. Nabetani, and Y. Takahashi, “Direct liquid cooling module with high reliability solder joining technology for automotive applications,” Proc. Int. Symp. Power Semicond. Devices ICs, pp. 109–112, 2013.
- [19] G. Hantos, M. Rencz, and A. Poppe, “Aging Tendencies of Power MOSFETs –,” pp. 21–23, 2016.
- [20] A. Castellazzi, A. Fayyaz, G. Romano, L. Yang, M. Riccio, and A. Irace, “SiC power MOSFETs performance, robustness and technology maturity,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 58, pp. 164–176, 2016.

- [21] K. Uchida et al., “Lifetime estimation of SiC MOSFETs under high temperature reverse bias test,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 64, pp. 425–428, 2016.
- [22] H. Luo, N. Baker, F. Iannuzzo, and F. Blaabjerg, “Die degradation effect on aging rate in accelerated cycling tests of SiC power MOSFET modules,” *Microelectron. Reliab.*, pp. 5–9, 2017.
- [23] T. Azoui, P. Tounsi, P. Dupuy, L. Guillot, and J. M. Dorkel, “3D Electro-thermal modelling of bonding and metallization ageing effects for reliability improvement of power MOSFETs,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 51, no. 9–11, pp. 1943–1947, 2011.
- [24] L. Ren, Q. Shen, and C. Gong, “Real-Time Aging Monitoring for Power MOSFETs,” pp. 0–5, 2016.
- [25] M. Sathik and T. King, “Comparison of power p cycling and thermal cycling effects on the thermal impedance degradation in IGBT modules,” pp. 1170–1175, 2015.
- [26] D. Gautam, D. Wager, M. Edington, and F. Musavi, “Performance comparison of thermal interface materials for power electronics applications,” 2014 IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC 2014, pp. 3507–3511, 2014.
- [27] B. Wang, “Review of Power Semiconductor Device Reliability for Power Converters,” *CPSS Trans. Power Electron. Appl.*, vol. 2, no. 2, pp. 101–117, 2017.
- [28] S. Pietranico, S. Pommier, and S. Lefebvre, “Study of ageing of the metallization layer of power semiconductor devices,” *Digikey.Se*, vol. 51, no. 4, pp. 629–635, 2004.
- [29] Y. Lai, “Semiconductor and IC Package Thermal Metrics,” *Imid* 2009, no. July, pp. 1069–1072, 2009.
- [30] B. V. Barkhordarian, I. Rectifier, and E. Segundo, “Power MOSFET Basics,” *Components*, vol. 22, no. c, pp. 1–12, 2005.
- [31] J. W. Sofia, “Fundamentals of Accelerated Aging of Semiconductor Devices with Power Cycling.”
- [32] H. Chen, B. Ji, V. Pickert, and W. Cao, “Real-Time Temperature Estimation for Power MOSFETs Considering Thermal Aging Effects,” *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, vol. 14, no. 1, pp. 220–228, 2014.
- [33] A. Ibrahim, J. P. Ousten, R. Lallemand, and Z. Khatir, “Power cycling issues and challenges of SiC-MOSFET power modules in high temperature conditions,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 58, pp. 204–210, 2016.
- [34] A. Griffio, J. Wang, K. Colombage, and T. Kamel, “Real-time Measurement of Temperature Sensitive Electrical Parameters in SiC Power MOSFETs,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. PP, no. 99, p. 1, 2017.
- [35] SMM-The Leading Metals Information Provider in China, SMM Spot Price. (s.f). Recuperado 10 de marzo de 2022, de <https://www.metal.com/>
- [36] “Presented by : David Divins Using Simulation to Estimate MOSFET Junction Temperature in a Circuit Application,” *October*, no. October, pp. 1–27, 2007.
- [37] M. Melito, A. Gaito, and G. Sorrentino, “Thermal effects and junction temperature evaluation of Power MOSFETs,” no. November, 2015.
- [38] Freescale Semiconductor, “Thermal Analysis of Semiconductor Systems,” *White Pap.*, 2008.
- [39] K. I. Pandya and W. Mcdaniel, “A Simplified Method of Generating Thermal Models for Power MOSFETs,” 2004.

- [40] A. Li, B. Mohan, S. Sapp, I. Bencuya, and L. Hong, "Is Now Part of To learn more about ON Semiconductor, please visit our website at Maximum Power Enhancement Techniques for SOT-223 Power MOSFETs."
- [41] M. Lotfi and D. Zohir, "The Electro-Thermal Sub Circuit Model for Power Mosfets," vol. 1, no. 2, pp. 26–32, 2012.
- [42] Toshiba, "Power MOSFET Thermal Design and Attachment of a Thermal Fin," Tech. Rep., pp. 1–12, 2016.
- [43] K. Pandya and S. Jaunay, "Thermal analysis of power MOSFETs using rebecca-3D thermal modeling software (from epsilon ingenierie) versus physical measurements and possible extractions," Proc. 6th Int. Conf. Therm. Mech. Multi-Physics Simul. Exp. Micro-Electronics Micro-Systems - EuroSimE 2005, vol. 2005, pp. 394–397, 2005.
- [44] V. Siliconix, "Vishay Siliconix R-C Thermal Model Parameters R-C THERMAL MODEL FOR TANK CONFIGURATION R-C VALUES FOR TANK CONFIGURATION Si2328DS _RC Vishay Siliconix R-C THERMAL MODEL FOR FILTER CONFIGURATION," pp. 1–3.
- [45] A. Maerz, T. Bertelshofer, and M. Bakran, "A Structural Based Thermal Model Description for Vertical SiC Power MOSFETs under Fault Conditions," vol. 2016, 2016.
- [46] M.- Fet, "Electro-Thermal Modelling and Simulation of a Power-MOSFET," vol. 42, 2001.
- [47] S. Zengin and M. Boztepe, "Lifetime Estimation of DCM Flyback Micro-inverter," Int. 7th Ege Energy Symp., no. June, 2014.
- [48] V. Siliconix, "Vishay Siliconix - Thermal Simulation of Power MOSFETs on the P-Spice Platform," Power, no. 73554, pp. 1–9, 2005.
- [49] P. Magnone, C. Fiegna, G. Greco, G. Bazzano, S. Rinaudo, and E. Sangiorgi, "Numerical simulation and modeling of thermal transient in silicon power devices," Solid. State. Electron., vol. 88, pp. 69–72, 2013.
- [50] T. Kim and T. Funaki, "Thermal measurement and analysis of packaged SiC MOSFETs," Thermochim. Acta, vol. 633, pp. 31–36, 2016.
- [51] M. Davis-marsh, "Thermal Design By Insight, Not Hindsight Thermal Design By Insight , Not Hindsight AN-2020," no. April, pp. 1–13, 2011.
- [52] S. Proceedings, "Application Note Designing With Thermal Impedance," Response, vol. V, no. December, pp. 1–13, 2003.
- [53] Würth Elektronik, "Heat management of circuit boards," no. 1, pp. 1–6, 2011.
- [54] T. Welker and J. Muller, "Design, simulation and fabrication of liquid cooled LTCC devices utilizing integrated channels," Proc. 15th Intersoc. Conf. Therm. Thermomechanical Phenom. Electron. Syst. ITherm 2016, pp. 830–835, 2016.
- [55] L. Zhang and Y. Zhang, "Simulation on heat transfer of microchannels and thermal vias for high power electronic packages," Electron. Packag. Technol. (ICEPT), 2014 15th Int. Conf., pp. 508–510, 2014.
- [56] M. Galicia, P. Zajac, C. Maj, and A. Napieralski, "Characterization of thermal vias for 3D ICs using FEM analysis," THERMINIC 2015 -
- [57] Z. Liu, S. Swarup, S. X. D. Tan, H. B. Chen, and H. Wang, "Compact lateral thermal resistance model of TSVs for fast finite-difference based thermal analysis of 3-D stacked ICs," IEEE Trans. Comput. Des. Integr. Circuits Syst., vol. 33, no. 10, pp. 1490–1502, 2014.
- [58] G. Systems, "PCB Thermal Design Guide for GaN Enhancement Mode Power Transistors,"

- pp. 1–15, 2015.
- [59] W. Elektronik and C. Board, “Webinar : Thermal Management 2013 Agenda Basic Thermal Management Possibilities of heat dissipation Applications,” 2013.
 - [60] T. M. Principles et al., “Optimizing PCB Thermal Performance for Cree ® XLamp ® LEDs Figure 1 . Cree XLamp XP LED Package,” pp. 1–21, 2015.
 - [61] P. Rako, “PCB layout tips for thermal vias,” 2013.
 - [62] S. Gurrum and M. Romig, “Using Thermal Calculation Tools for Analog Components,” Texas Instruments, no. SLUA566, pp. 1–13, 2010.
 - [63] “Abstract This paper documents my quick look at Apex App Note AN51U , which provides an example of how to estimate the thermal resistance of a HSOP packaged part . I am just using this app note as a learning vehicle and do not have a specific application in mind . Table of Contents Thermal Conduction Constants,” pp. 1–7.
 - [64] A. Note, “AND9596 / D A Quick PCB Thermal Calculation for Power Electronic Devices with Exposed Pad Packages,” pp. 1–14, 2017.
 - [65] X. Leds, “Optimizing PCB Thermal Performance Figure 1 . Cree XLamp XP LED Package,” pp. 1–22, 2012.
 - [66] A. En, “Heatpipes and Systems for High Thermal Performance Heatpipes for High Thermal Performance,” pp. 1–16.
 - [67] E. Section, A. Section, and C. Section, “Heat Pipes : Heat Super Conductors,” pp. 6–9, 1963.
 - [68] H. Pipes and V. Chambers, “Thermal Performance of Heat Sinks with Heat Pipes or Vapor Chambers for Servers,” no. JULY, pp. 5–11, 2013.
 - [69] Qpedia, “How wicks and orientation affect heat pipe performance,” 2009.
 - [70] S. R. Process, “Application Note PCB Mounting Guidelines for Surface Mount Packages Atmel Reliability Pb Free (IR Furnace) Profile.”
 - [71] F. Semiconductor, “Small Outline Integrated Circuit (SOIC) Package Small Outline Integrated Circuit,” 2014.
 - [72] H. Flow, T. Resistance, and D. T. Resistance, “Thermal management for surface mount components,” pp. 12–17, 2012.
 - [73] M. Davis-marsh, “Thermal Design By Insight, Not Hindsight Thermal Design By Insight , Not Hindsight AN-2020,” 2011.
 - [74] Y. Koito, Y. Kubo, and T. Tomimura, “Numerical Analysis of Printed Circuit Board with Thermal Vias: Heat Transfer Characteristics under Nonisothermal Boundary Conditions,” J. Electron. Cool. Therm. Control, vol. 3, no. December, pp. 136–143, 2013.
 - [75] Intersil, “Carrying the Heat Away from Power Module PCB Designs,” no. Figure 2, pp. 1–8, 2015.
 - [76] D. Brooks and D. Graves, “Current Carrying Capacity of Vias,” no. January, 2003.
 - [77] M. L. P. A. Note and C. Page, “Comprehensive User ’ s Guide,” no. April, pp. 0–19, 2002.
 - [78] N. Kafadarova and A. Andonova, “PCB Thermal Design Improvement Through Thermal Vias 2 CFD Simulations of Conduction Paths,” Word Sci. Eng. Acad. Soc., pp. 241–244, 2009.
 - [79] D. Guidelines, “PCB Design Guidelines for High Power Dissipation Packages,” pp. 1–2, 2010.
 - [80] L. Qian, G. Shi, and Y. Ye, “Electrical-thermal characterization of carbon nanotube based through glass vias for 3-D integration *,” no. 1, pp. 663–666, 2016.

- [81] R. Künzi, “Thermal Design of Power Electronic Circuits,” vol. 3, no. May 2014, pp. 7–14, 2015.
- [82] D. Gautam, D. Wager, and F. Musavi, “A Review of Thermal Management in Power Converters with Thermal Vias,” pp. 627–632, 2013.
- [83] D. S. Gautam, F. Musavi, D. Wager, and M. Edington, “A comparison of thermal vias patterns used for thermal management in power converter,” 2013 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2013, pp. 2214–2218, 2013.
- [84] E. Juntunen et al., “Copper-core MCPCB with thermal vias for high-power COB LED modules,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 3, pp. 1410–1417, 2014.
- [85] C. H. Hsu, S. J. Ruan, Y. J. Chen, and T. C. Kan, “Reliability consideration with rectangle-and double-signal through silicon vias insertion in 3D thermal-aware floorplanning,” Proc. - Int. Symp. Qual. Electron. Des. ISQED, pp. 316–322, 2013.
- [86] M. Y. Kim, T. Jeong, J. S. Ha, and T. S. Oh, “The effects of Si submounts containing Cu thermal vias on the heat-dissipation characteristics of a high-power light-emitting diode package,” J. Electron. Mater., vol. 43, no. 2, pp. 630–635, 2014.
- [87] Y. Zhang and P. E. Bagnoli, “A modeling methodology for thermal analysis of the PCB structure,” Microelectronics J., vol. 45, no. 8, pp. 1033–1052, 2014.
- [88] G. Langer, M. Leitgeb, J. Nicolics, M. Unger, H. Hoschopf, and F. P. Wenzl, “Advanced Thermal Management Solutions on PCBs for High Power Applications,” J. Microelectron. Electron. Packag., vol. 11, no. 3, pp. 104–114, 2014.
- [89] D. Todorov and L. Kapisazov, “LED thermal management,” Electronics, no. October, pp. 139–144, 2008.
- [90] Y. Chai, K. Zhang, M. Zhang, P. C. H. Chan, and M. M. F. Yuen, “Carbon nanotube/copper composites for via filling and thermal management,” Proc. - Electron. Components Technol. Conf., no. July, pp. 1224–1229, 2007.
- [91] G. Gerlach and K. J. Wolter, “Bio and Nano packaging techniques for electron devices: Advances in electronic device packaging,” Bio Nano Packag. Tech. Electron Devices Adv. Electron. Device Packag., no. June, pp. 1–628, 2013.
- [92] “Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 12, 181–192, 2010,” vol. 12, no. January, pp. 181–192, 2010.
- [93] L. D. Murillo-Soto and C. Meza, "Voltage measurement in a reconfigurable solar array with series-parallel topology," *2017 IEEE 37th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVII)*, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/CONCAPAN.2017.8278484.
- [94] P. Clovis and A. Petry, “Semicondutores , Perdas e Cálculo Térmico,” 2014.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.