



**MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO TERMO-MECÁNICO DE  
UN INVERSOR PARA LA  
FABRICACIÓN E INTEGRACIÓN  
EN UNA MOTORIZACIÓN MILD-  
HYBRID.**

Autor: D. Alberto Enrique De Gregorio Alonso  
Tutor: D. Manuel San Juan Blanco

Valladolid, Octubre, 2020



## Resumen

La hibridación o electrificación de los vehículos es un reto actual clave para conseguir los objetivos medioambientales marcados por la O.N.U y la U.E. En este trabajo, se realiza el diseño de un inversor integrado en una motorización mild-hybrid. El inversor cuenta con unos transistores de potencia en miniatura (GaN) con unas pérdidas importantes de calor. Partiendo del modelo mecánico, se realiza un modelo térmico justificando el comportamiento térmico de cada componente, además de, crear una simulación en Ansys. En esta simulación realizada con el módulo steady-state thermal, se analiza el comportamiento térmico del conjunto. Concretamente, comprobar si el calor generado por los transistores puede ser disipado. Por último, se realiza la fabricación del prototipo y se define el montaje del conjunto, para que sea montado en un banco de pruebas donde el Grupo Valeo desea hacer determinados ensayos.

Palabras clave: innovación, dispositivo mecánico, diseño térmico, prototipo, inversor, alterno-arranque, transistores de potencia en miniatura (GaN) , simulación térmica.

## Summary

Hybridization or electrification of vehicles is a key current challenge to achieve the environmental objectives set by the U.N and the E.U. In this project, the design of an inverter integrated in a mild-hybrid motorization is carried out. This inverter has miniature power transistors (GaN) with significant heat losses. Starting from the mechanical model, a thermal model is made justifying the thermal behavior of each component. In addition, a simulation is carried out with the steady-state thermal module of Ansys. In this simulation, the thermal behavior of the device is analyzed. In particular, verify whether the heat generated by the transistors can be dissipated. Finally, the prototype is manufactured and the assembly of the device is defined, in order to be assembled on a test bench where the Valeo Group would like to carry out certain tests.

Keywords: innovation, mechanical device, thermal design, prototype, inverter, alternating-starter, miniature power transistors (GaN), thermal simulation.



## AGRADECIMIENTOS

Me enorgullece poder presentar este trabajo de final de máster donde se ven representadas las capacidades obtenidas gracias a mi formación a través de un doble diploma Franco-español y mi experiencia profesional.

Me siento un privilegiado por la educación inculcada y el apoyo de mi familia para poder llegar hasta donde me encuentro hoy. Sin ello muy pocas cosas hubieran sido posibles. También me siento un afortunado por la educación primaria y secundaria que he tenido, una etapa desde mi punto de vista clave, donde me han inculcado unos valores fundamentales en todo lo relacionado con las personas, el trabajo y la vida misma. Gracias a todos mis profesores en la etapa escolar he obtenido unas competencias y actitudes que me han permitido comenzar y desenvolverme de forma satisfactoria en mi formación como ingeniero.

De lo que más agradecido me siento es de haber tenido la posibilidad de aprender inglés y francés gracias a las oportunidades que me han dado mis padres realizando estancias en el extranjero. En este trabajo fin de máster se ve reflejado también todo lo que me han enseñado los amigos que he conocido en el extranjero desde mis estancias lingüísticas en Irlanda y Estados Unidos hasta mis prácticas en la fábrica de Renault Douai y mi voluntariado en la India. Esto ha permitido ser capaz de comenzar en Francia este proyecto donde participan varias entidades y empresas establecidas en Europa y, por tanto, seguir un proyecto dentro de un marco internacional.

Siento que mi formación universitaria ha sido un éxito. Agradezco a cada uno de los profesores tanto en la escuela de ingenieros de la universidad de Valladolid como de la escuela des Arts et Métiers en Francia por haberme dado los conocimientos y competencias necesarias para comenzar mi vida profesional como ingeniero. Yo me comprometo a seguir aprendiendo y esforzándome para que se cumpla ese objetivo común por el que nuestros profesores nos forman, dar solución a todos los problemas globales donde están inmersos los distintos campos de la ciencia y la ingeniería para conseguir un mundo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente y con los seres humanos.

En concreto quiero agradecer el apoyo durante el proyecto de mis profesores en Francia, al Ph.D Eric Semail y al Ph.D Maurice Lepoivre por todos sus consejos, seguimiento y formación. También al estudiante de doctorado Tiago Dos Santos Morales que como persona integrante del proyecto ha sido como un profesor más. Por supuesto, en este trabajo ha sido fundamental el trabajo en equipo realizado en Francia con el Sr. Valentín DUPUY. Por la parte de España he tenido la suerte de estar orientado por varios profesores desde mi tutor, el Ph.D Manuel San



Juan Blanco, hasta el coordinador del Máster, el Ph.D José Candau Pérez, la coordinadora del Grado en Ingeniería Mecánica durante mi etapa en este grado, la Ph.D Marta Herráez, y el profesor perteneciente al departamento de ingeniería energética y fluido mecánica, el Ph.D Andrés Melgar, que ha realizado un seguimiento de la parte más técnica realizada en Valladolid. A diferencia del trabajo realizado en Francia, en Valladolid he podido seguir desarrollando mi capacidad de trabajo autónomo y la capacidad de exponer mis investigaciones y análisis. Quiero agradecer también a los organizadores del programa IMFAHE y en concreto a mi mentor en este programa, el Ph.D Javier Silla, por darme la posibilidad de presentar este proyecto en la conferencia internacional realizada en Aveiro.

En resumen, me siento un privilegiado por todo el apoyo de mi familia, profesores y conjunto de amigos porque sin ellos nada de esto hubiera sido posible. Como dice el autor Anxo Pérez en su libro la inteligencia del éxito, "no existe un solo éxito de todos los que has logrado hasta ahora y de los que lograrás en el futuro que no se haya beneficiado de la contribución de otros".

## Índice

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>5</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Antecedentes.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>13</b>
<b>2 SITUACIÓN Y ESTADO DEL ARTE. ....</b>	<b>17</b>
2.1 Intereses, retos y soluciones en la hibridación de los vehículos. ....	17
2.2 El sistema Mild-Hybrid del proyecto llevado a cabo por Valeo.....	19
<b>3 PRESENTACIÓN DEL DISPOSITIVO OBJETO DE DISEÑO Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>21</b>
3.1 Descripción del banco de ensayo y el conjunto de componentes del sistema. ....	21
3.2 Solución anterior. ....	22
3.3 Restricciones e instrucciones del cliente. ....	24
<b>4 ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL DISPOSITIVO.....</b>	<b>27</b>
4.1 Gan.....	27
4.2 Placa de cobre. ....	28
4.3 Acero.....	28
4.4 TIM.....	28
4.5 Ventiladores .....	28
4.6 Placa del circuito impreso (PCB).....	29
<b>5 ELABORACIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO. ....</b>	<b>31</b>
5.1 Primera propuesta.....	31
5.2 Solución elegida.....	31
<b>6 ANÁLISIS Y JUSTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL MODELO.....</b>	<b>39</b>
6.1 Gan .....	39

6.2	Placa de cobre. ....	45
6.3	Acero.....	46
6.4	TIM.....	46
6.5	Ventiladores .....	47
6.6	Placa del circuito impreso (PCB).....	48
<b>7</b>	<b>ELABORACIÓN DEL MODELO TÉRMICO. ....</b>	<b>49</b>
7.1	Geometría. ....	50
7.2	Materiales. ....	52
7.3	Parámetros y características necesarias para definir y resolver el modelo térmico . ....	52
7.4	Contactos.....	55
7.5	mallado .....	55
<b>8</b>	<b>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO TÉRMICO.....</b>	<b>57</b>
8.1	Caso de funcionamiento perfecto en condiciones extremas. ....	57
8.2	Caso de funcionamiento perfecto en las condiciones donde el transistor trabaja en un régimen donde la temperatura alcanzada en él es inferior a la temperatura máxima. ....	59
8.3	Influencia de los distintos parámetros.....	61
8.4	Caso donde el material TIM no cumpliera su función o el transistor GaN no tuviera un contacto perfecto con la placa de cobre. ....	63
8.5	Caso donde uno de los ventiladores dejara de funcionar. ....	66
8.6	Resumen de los resultados. ....	68
<b>9</b>	<b>SOLUCIÓN PARA LA FABRICACIÓN.....</b>	<b>71</b>
9.1	Piezas complejas .....	71
9.2	Otras partes .....	74



<b>10</b>	<b>SOLUCIÓN PARA EL MONTAJE FINAL.....</b>	<b>77</b>
<b>11</b>	<b>ANÁLISIS ECONÓMICO .....</b>	<b>85</b>
<b>12</b>	<b>CONCLUSIÓN .....</b>	<b>89</b>
	12.1 Descripción del proceso seguido para cumplir los objetivos marcados y síntesis de la solución tecnológica elegida.....	89
	12.2 Principales aportaciones del autor al TFM.....	90
	12.3 Sugerencias para trabajos futuros.....	91
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>95</b>
	<b>TABLAS DE CONTENIDO .....</b>	<b>10</b>
	<b>ANEXO I.....</b>	<b>97</b>
	<b>ANEXO II.....</b>	<b>98</b>
	a. Gan .....	98
	b. TIM.....	115
	c. Ventiladores .....	116
	<b>ANEXO III.....</b>	<b>118</b>
	a. Vistas adicionales .....	118
	b. Croquis.....	130
	<b>ANEXO IV .....</b>	<b>137</b>

## TABLAS DE CONTENIDO

### ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Modelo del alternador en una de las primeras fases de este proyecto.....	14
Ilustración 2 Motor térmico y eléctrico en un vehículo híbrido (obtenido de (e-automotive, 2018)) .....	17
Ilustración 3 Transistor GaN (obtenida de: (GaN Systems, 2015)).....	19
Ilustración 4 Esquema del banco de pruebas.....	21
Ilustración 5 Ubicación global de los elementos y vista de la estructura de pentágono .....	22
Ilustración 6 Boceto de la primera solución prevista.....	23
Ilustración 7 Colocación de los tornillos de fijación y presión en la estructura con forma de pentágono.....	24
Ilustración 8 Vistas desde la izquierda y la derecha del banco de pruebas .....	25
Ilustración 9 Vistas de la solución final elegida. ....	32
Ilustración 10 Vista de uno de los cinco pares de transistores con los disipadores que constituyen un inversor. ....	32
Ilustración 11 Cálculo de la flecha.....	34
Ilustración 12 Representación de la flecha según el espesor de la barra de presión.....	35
Ilustración 13 diseño de la barra de presión y vista del falso GaN. ....	35
Ilustración 14 Diseño del sistema (vista radial con la estructura metálica oculta).....	36
Ilustración 15 Implantación de las perforaciones en la tapa. ....	36
Ilustración 16 Estructura metálica .....	37
Ilustración 17 Sistema de bridas de fijación del codificador.....	38
Ilustración 18 Representación de las resistencias térmicas del GaN (Obtenido de: (semiconductor, 2017)).....	40
Ilustración 19 Tipos de resistencias térmicas (Obtenido de: (semiconductor, 2017)) .....	42
Ilustración 20 Representación del ciclo de operación (Obtenido de: (Schemm, 2018)).....	43
Ilustración 21 Representación una forma de onda idealizada del nodo de conmutación en un convertidor buck con pérdidas de tiempo muerto. La zona resaltada en rojo corresponde a este tiempo. (Obtenido de: (Schemm, 2018)) .....	44
Ilustración 22 Representación de la resistencia del transistor desde la fuente hasta la zona de drenaje en función de la temperatura en el interior del transistor. ....	45
Ilustración 23 Representación de las pérdidas totales en función de la temperatura en el interior del transistor. ....	45
Ilustración 24 Esquema para definir la conductancia de contacto (Obtenido de: (GRANDE, 2000)) .....	47
Ilustración 25 Flujo de calor del ventilador en función de la temperatura en el interior de este. ....	48
Ilustración 26 geometría para el modelo térmico (parte superior).....	49
Ilustración 27 Geometría para el modelo térmico (parte inferior, ocultando la placa base).....	50
Ilustración 28 Vista frontal de la geometría del modelo térmico.....	51
Ilustración 29 Vista del conjunto del modelo térmico a analizar. ....	51
Ilustración 30 materiales en la simulación.....	52
Ilustración 31 Conjunto de condiciones del modelo térmico.....	52
Ilustración 32 Generación de calor en función de la temperatura alcanzada en el transistor.....	53
Ilustración 33 Flujo de calor disipado en función de la temperatura alcanzada en el ventilador	54

Ilustración 34 Contacto entre el transistor GaN y la placa de cobre .....	55
Ilustración 35 mallado del conjunto .....	56
Ilustración 36 mallado de la placa PCB, transistores y disipadores.....	56
Ilustración 37 Régimen de funcionamiento de los transistores (Obtenido de: obtenidas de: (Inc, 2009)).....	58
Ilustración 38 Temperatura alcanzada en el transistor.....	59
Ilustración 39 temperatura alcanzada en el ventilador.....	59
Ilustración 40 Temperatura del transistor con mejores condiciones de convección natural.....	62
Ilustración 41 Temperatura del ventilador con mejores condiciones de convección natural.....	62
Ilustración 42 Temperatura alcanzada en el transistor para el caso de mal funcionamiento del material TIM.....	63
Ilustración 43 temperatura alcanzada en el ventilador para el caso de mal funcionamiento del material TIM.....	63
Ilustración 44 Distribución de flujo de calor para el caso en el que el material TIM no cumple su función.....	64
Ilustración 45 Distribución del flujo de calor en los transistores para el caso en el que el material TIM no cumple su función.....	64
Ilustración 46 Temperatura que se alcanza en los transistores cuyo ventilador asociado no funciona correctamente.....	66
Ilustración 47 Temperatura que se alcanza en los transistores cuyo ventilador asociado si funciona correctamente .....	67
Ilustración 48 Temperatura alcanzada en los ventiladores que funcionan correctamente.....	67
Ilustración 49 Temperatura alcanzada en los ventiladores que no funcionan correctamente....	67
Ilustración 50 Fabricación de la estructura metálica, primera etapa en torno.....	72
Ilustración 51 Fabricación de la estructura metálica, segunda etapa en fresadora.....	73
Ilustración 52 Fabricación de la estructura metálica, segunda etapa en fresadora, vista del ranurado superior para la PCB .....	73
Ilustración 53 Estructura metálicas terminada.....	74
Ilustración 54 disipador .....	75
Ilustración 55 Vistas de la PCB con los transistores instalados.....	77
Ilustración 56 Vista del conjunto completo.....	78
Ilustración 57 Vista de la estructura metálica sobre el motor.....	79
Ilustración 58 Vista de la tapa con todas las perforaciones. En naranja las placas de cobre.....	80
Ilustración 59 Vista de la unión tapa, disipador, PCB y barra de presión.....	81
Ilustración 60 Vista superior de la tapa con los ventiladores instalados.....	81
Ilustración 61 Uniones del codificador.....	82
Ilustración 62 Vista de los tornillos de presión del codificador.....	83
Ilustración 63 Vista de la tapa unida a la estructura metálica a falta de montar el codificador...83	
Ilustración 64 Vista de las bridas (rodeadas en verde) de unión del codificador a la tapa.....	84



## TABLAS

Tabla 1 Restricciones del cliente.....	24
Tabla 2 Propiedades térmicas del cobre ((Obtenido de: (S.Marco., 1958)).....	46
Tabla 3 Propiedades térmicas del acero. (Obtenido de: (S.Marco., 1958)).....	46
Tabla 4 Resumen de los resultados.....	69
Tabla 5 Lista de componentes.....	87

## ECUACIONES

Ecuación 1.....	41
Ecuación 2.....	42
Ecuación 3.....	47

## 1 INTRODUCCIÓN.

Este Trabajo Fin de Master surge de un proyecto multidisciplinario entre diversas empresas y universidades de Francia. Este proyecto se llama “convertisseur d’énergie intégré Intelligent”, que en español se traduciría como Convertidor Inteligente de Energía Integrada (ce2i, 2020). El proyecto comienza en el contexto de la transición energética del siglo XXI, donde solo el vector de la electricidad es capaz de introducir las diferentes fuentes de energía limpias y renovables.

El proyecto del Convertidor Inteligente de Energía Integrada (CE2I) fue seleccionado bajo el Contrato del Plan Estatal Regional (CPER) 2015-2020 en Francia e integra la dinámica europea de la transición energética. El enfoque original del proyecto CE2I se basa en la participación simultánea de varias habilidades regionales francesas en ingeniería eléctrica y térmica. El producto del proyecto global será un sistema de conversión de energía donde se incluyen convertidores estáticos basados en componentes robustos, compactos e integrados en una máquina polifásica de 40 kW en un volumen reducido que opera en un rango de altas temperaturas. Además, debe garantizar la ecoeficiencia y debe ser fiable estructural y funcionalmente.

### 1.1 Antecedentes.

El grupo Valeo perteneciente a este proyecto decidió poner en marcha un tema de tesis en colaboración con el campus de Lille de la Escuela des Arts et Metiers ParisTech (ENSAM), con el fin de llevar a cabo las pruebas y estudios preliminares de un inversor integrado en una motorización mild-hybrid. Este estudio se hace en el laboratorio L2EP (Laboratory of Electrical Engineering of Lille) situado en la ENSAM donde el profesor M Semail está afiliado. A él nos vamos a referir en este trabajo como cliente. El autor de este Trabajo Fin de Master comenzó el proyecto en esta escuela francesa, pero como consecuencia de la amplitud del estudio, se ha continuado el trabajo en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid. En este documento se abarca el proyecto completo, desde el diseño mecánico del conjunto realizado en Francia hasta el modelo térmico que se ha realizado en Valladolid. También se incluye la fabricación llevada a cabo con los medios de la escuela francesa y el montaje.

### 1.2 Objetivos.

La tarea del autor de este trabajo es realizar modificaciones y adaptaciones respecto a un primer diseño localizado en un banco de prueba en la escuela francesa. El equipo de trabajo en electrónica que actualmente trabajan en este proyecto no tiene el tiempo o la experiencia en ingeniería técnica y mecánica necesaria para desarrollar estos conjuntos. Así que recurrieron a la ENSAM para externalizar esta tarea y así diseñar el conjunto según las restricciones del cliente con el fin de llevar a cabo las pruebas planificadas.

El objetivo final de este trabajo es realizar un diseño mecánico del conjunto de componentes que el grupo Valeo quiere incluir posteriormente en el inversor de un alternador de arranque (starter-alternator) de una motorización mild-hybrid (Ilustración 1); construir un modelo térmico del conjunto para simularlo computacionalmente; y finalmente llevar a cabo la fabricación del inversor y montarlo en la máquina de ensayo.



*Ilustración 1 La topología de hibridación suave propuesta por el proyecto global (obtenido de : (Bassel, 2013))*

Dividiendo el objetivo final en subobjetivos y en tareas para conseguir dar al cliente un inversor listo para realizar los test en la máquina de ensayo y por tanto en un futuro incluirlo en el alternador de arranque del grupo Valeo, se van a seguir las siguientes fases:

- Realizar una concepción teniendo en cuenta todas las restricciones del cliente y trabajo del resto de equipos pertenecientes al proyecto global. De este modo, se irán planteado al cliente diversos diseños hasta llegar al diseño ideal. Además, tenemos que estar en comunicación con el equipo de diseño de la placa electrónica para obtener un diseño del inversor conforme con el diseño de la placa electrónica.
- Antes de realizar la concepción se van a caracterizar todos los componentes del conjunto y describir su comportamiento.
- Una vez validada la concepción mecánica del conjunto y haber obtenido la conformidad del cliente y el resto de los equipos integrados en este proyecto se va a pasar a la siguiente fase, realizar un modelo térmico. Antes de realizar este modelo se tendrá que analizar el comportamiento térmico de cada componente. Una vez analizado se puede comenzar a definir el modelo en Ansys.
- Para realizar esta definición el alumno tendrá que formarse de forma autónoma para conseguir manejar adecuadamente el workbench de Ansys, el módulo SpaceClim para definir la geometría y el módulo Mechanical para realizar la simulación. El alumno va a usar la plataforma edx donde Ansys ha impartido diversos cursos.
- Una vez recibida esta formación se va a importar la geometría creada en el diseño mecánico para construir el modelo térmico con diversas simplificaciones y adaptaciones.
- Una vez construido se tendrá que simular térmicamente el conjunto imponiendo diversas situaciones explicadas por el cliente. El cliente y el diseñador de la placa electrónica tiene una orientación sobre el régimen de funcionamiento del conjunto.



Uno de los objetivos más importantes es establecer el régimen de funcionamiento máximo del conjunto y confirmar si la orientación que se tiene sobre este régimen es adecuada. Además, el cliente quiere saber qué ocurriría si se dieran distintos casos de funcionamiento incorrecto.

- Una vez realizada la simulación se obtendrán los resultados de todos los casos impuestos por el cliente, además se analizarán estos resultados.
- La penúltima fase será fabricar el conjunto con los medios que se encuentran en la escuela francesa.
- Finalmente se va a indicar al cliente cómo se debe montar el conjunto.

De este modo se entregará al cliente el inversor listo para montar en el banco de ensayo con un análisis sobre la conformidad del modelo creado.



## 2 SITUACIÓN Y ESTADO DEL ARTE.

Para comprender la necesidad y utilidad del trabajo se va a presentar el interés de la hibridación de los vehículos, así como los retos y soluciones actuales. También se va a describir el sistema mild-hybrid llevado a cabo en el proyecto global, ya que es muy enriquecedor para el alumno.

### 2.1 Intereses, retos y soluciones en la hibridación de los vehículos.

Varias razones relacionadas con el medio ambiente y las limitaciones de las reservas de petróleo han impuesto la necesidad de una nueva generación de los medios de transporte, en las que se han propuesto múltiples soluciones híbridas y eléctricas con el fin de reducir el consumo de combustible y reducir la cantidad de gases liberados. Estas soluciones toman diferentes formas, que van desde las más simples, manteniendo las estructuras clásicas del automóvil, hasta las más complejas que cambian en gran medida estas estructuras con el fin de adaptarlas a los nuevos componentes necesarios. Como resultado, los desafíos a los que se enfrentan los fabricantes de automóviles varían en función de la solución elegida. Desde un punto de vista global, no es fácil decidir cuál es la mejor solución porque una solución simple puede ser mejor comercializada que una solución compleja. Además, aunque sea menos eficiente desde un punto de vista tecnológico que una solución compleja, su eficiencia en el medio ambiente puede ser mejor debido a la influencia de la densidad del conjunto o a los materiales empleados en su fabricación. Tampoco hay que olvidar el coste del proceso industrial, donde en una solución compleja puede ser mayor.

La fabricación de coches 100% eléctricos con cero emisiones de gases de efecto invernadero fue una de las soluciones propuestas para actuar contra las alarmantes cifras relacionadas con la dependencia del petróleo, ya que el impacto en el CO<sub>2</sub> depende del modo de producción de la electricidad. Sin embargo, esta solución no ha atraído mucha atención debido a los diferentes problemas que han ralentizado el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía. El peso de la batería, su baja duración y el largo tiempo de carga son los principales problemas en el coche 100% eléctrico. Por lo tanto, la solución de un coche híbrido que funciona con motores eléctricos y térmicos apareció naturalmente incluso cuando su complejidad es mayor (Ilustración 2).

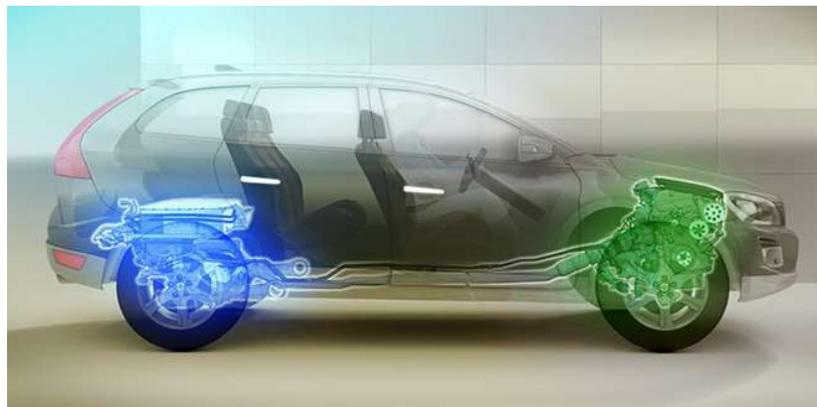


Ilustración 2 Motor térmico y eléctrico en un vehículo híbrido (obtenido de (e-automotive, 2018))

Hay por supuesto, ventajas y desventajas para cada tipo de motor: eléctrico y térmico (combustión). El motor térmico es capaz de producir una gran potencia con una fuente de suministro de energía líquida simple y rápida. Por otro lado, además de las emisiones de contaminantes nocivos para el medio ambiente, su rendimiento depende en gran medida del régimen de funcionamiento.

En el caso de un motor eléctrico las emisiones de contaminantes son cero y su rendimiento depende mucho menos de la carga. El problema aquí no está relacionado con el motor, sino con los sistemas de almacenamiento, que no son lo suficientemente eficientes como para poder proporcionar el rango mínimo de autonomía considerado esencial para el vehículo en términos de los hábitos tomados con los motores térmicos. El sistema híbrido fue desarrollado para combinar las ventajas de estos dos tipos de motorización evitando sus desventajas. El principio general es simple, el motor térmico y su tanque de combustible aseguran un alcance satisfactorio y por otro lado el motor eléctrico interviene parcial o totalmente, en regiones y modos de operación donde el rendimiento del motor térmico es bajo (baja velocidad, o velocidad variable). La energía eléctrica necesaria para la fase de tracción eléctrica se puede proporcionar de tres formas diferentes:

- por elementos de almacenamiento (batería, supercondensadores) o un generador eléctrico impulsado por el motor térmico a velocidades donde su eficiencia es alta;
- mediante la recuperación del frenado, donde la máquina eléctrica funciona en modo de generación mediante la aplicación de un par negativo para frenar el vehículo;
- tomada directamente de la red (vehículos híbridos enchufables).

El resultado es un rendimiento total del vehículo que aumenta. Esto reduce el consumo de combustible y, por lo tanto, reduce los gases nocivos liberados.

Este contenido ha sido obtenido de: (Bassel, 2013)

La nueva tecnología de seguridad de bajo voltaje dedicada a soluciones de hibridación suave (Mild-hybrid) es muy prometedora debido al peligro que las máquinas de alto voltaje presentan en vehículos Plug-In, Full-Hybrid y eléctricos. Por ello la tecnología Mild-hybrid abre el camino con grandes perspectivas ya que el dimensionamiento se basa en ciclos de funcionamiento que son variables, por lo que se puede llevar a cabo un gran enfoque de optimización con el fin de optimizar las dimensiones de la máquina, el volumen de las baterías o las soluciones de electrónica de potencia.

## 2.2 El sistema Mild-Hybrid del proyecto llevado a cabo por Valeo.

El objetivo del proyecto de Valeo es desarrollar una solución híbrida suave (Mild-hybrid) asequible para el mayor número posible de personas con un impacto significativo en las emisiones globales de CO<sub>2</sub> a nivel mundial.

Este proyecto aumentará el número de vehículos capaces de cumplir con la normativa europea en 95g CO<sub>2</sub>/km (límite impuesto para 2020). Esta solución, basada en una máquina eléctrica de alta potencia con accionamiento por correa, ofrecerá las funciones de parada/arranque, frenado de recuperación y asistencia de par. Esta adición de par (Boost) permitirá a los motores térmicos altamente "reducidos", mantener un rendimiento equivalente al de los motores actuales, lo que permite generalizarlos con un coste adicional aceptable.

Las tres funciones principales que debe realizar el sistema son:

- Start/stop para detener el motor térmico cuando el coche está parado (en un semáforo o un atasco) y reiniciarlo rápidamente cuando el conductor quiera continuar la ruta.
- Freno de recuperación de energía que utiliza la energía cinética en la fase de desaceleración para recargar las baterías (aquí la máquina eléctrica funciona como un generador).
- Asistencia en el par (boost). Consiste en que el motor eléctrico proporcione un par adicional para reforzar el par del vehículo, especialmente en baja velocidad cuando la eficiencia del motor térmico es baja.

La aparición en el mercado de componentes electrónicos GaN (Ilustración 3) hace unos años, ha permitido a los fabricantes de equipos electrónicos como Valeo pensar en soluciones de hibridación compactas, donde el inversor estaría conectado directamente a la máquina, evitando cables de alimentación y control, ya que la optimización del espacio y la masa en el vehículo todavía se buscan en el automóvil. Este es el primer punto a tener en cuenta en el diseño del inversor que se propone en el tema de tesis lanzado a la ENSAM.



Ilustración 3 Transistor GaN (obtenida de: (GaN Systems, 2015)

Estos componentes son transistores de potencia de última generación, que permiten la fabricación de nuevas tarjetas de alimentación electrónicas, y su pequeño tamaño permite que se coloquen lo más cerca posible de la máquina de dirección. Sin embargo, también se calientan más que los transistores convencionales, lo que es problemático si se utilizan en



entornos pequeños y compactos, donde la evacuación térmica es muy pobre. Este es el segundo punto más importante en este trabajo.

### 3 PRESENTACIÓN DEL DISPOSITIVO OBJETO DE DISEÑO Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .

En este apartado se va a describir la máquina de ensayo localizada en la escuela francesa. Se va a describir el conjunto de elementos de esta máquina de ensayo y del sistema completo objeto de diseño en este proyecto. Se va a describir la primera solución, restricciones e instrucciones del cliente para diseñar el inversor conectado al motor eléctrico.

#### 3.1 Descripción del banco de ensayo y el conjunto de componentes del sistema.

Para llevar a cabo los primeros estudios y pruebas, los equipos del proyecto global dedicados a la parte térmica y electrónica disponían de un banco de pruebas (ver: (Bassel, 2013) y (ce2i, 2020) ). Podían comprobar aquí sus cálculos teóricos y resultados para verificar que la temperatura interna sigue siendo aceptable para los componentes y que, por lo tanto, los componentes se enfrían correctamente.

El dispositivo se muestra en la Ilustración 4:

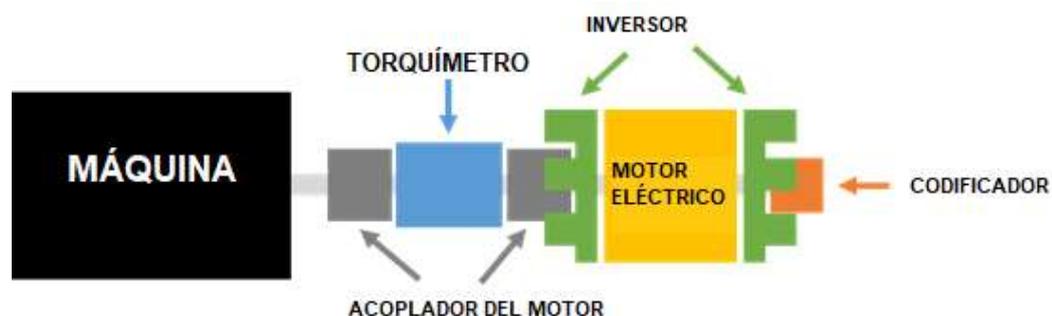


Ilustración 4 Esquema del banco de pruebas

La máquina de carga simulará el motor térmico o la acción de las ruedas durante las fases de recuperación de energía durante el frenado. En la ilustración también se pueden observar los diversos sensores, el sistema de alerno arranque, que va a funcionar como un motor eléctrico, así como los dos inversores a ambos lados del alternador. También encontramos un codificador.

Según (Simon, 2019) los inversores u onduladores, son dispositivos que convierten la corriente continua en corriente alterna. En los coches eléctricos que tienen un motor eléctrico de corriente alterna, la batería va conectada a un inversor. Este componente transforma la corriente continua de la batería en corriente alterna para alimentar el motor.

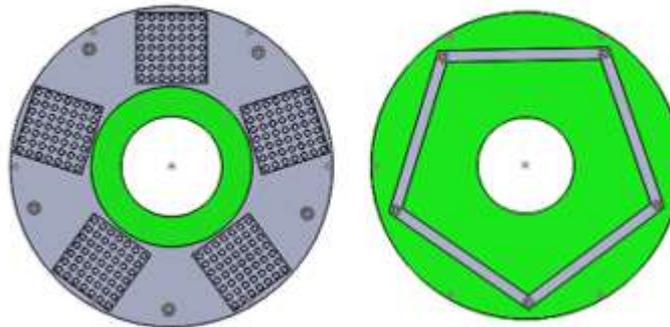
Según (GalcoTV, 2018) un codificador es un dispositivo de comunicación que controla el movimiento de un dispositivo en funcionamiento. Este codificador ayuda a determinar la velocidad o la posición del motor. Los codificadores convierten el movimiento a una señal eléctrica que puede ser leída por algún tipo de dispositivo de control en un sistema de control de movimiento, como un contador o PLC. El codificador envía una señal de retroalimentación que se puede usar para determinar la posición, la velocidad o la dirección.

Por lo tanto, la tarea será realizar la estructura mecánica para conectar los inversores al alterno-arrancador teniendo en cuenta las dimensiones de los distintos elementos existentes y su posicionamiento, como por ejemplo el codificador.

También se deberán tener en cuenta otras limitaciones de las que se hablará más adelante. Además, en este diseño se debe tener en cuenta la fabricación de las piezas con los medios de producción de la escuela francesa, así como a su montaje.

### 3.2 Solución anterior.

El primer contacto con el cliente permitió entender el contexto del proyecto, definir el papel en este proyecto, así como hacerse una idea de las reflexiones que se habían llevado a cabo hasta entonces. El cliente nos proporcionó los diagramas de la Ilustración 5, que resumen el sistema que estaban considerando originalmente.



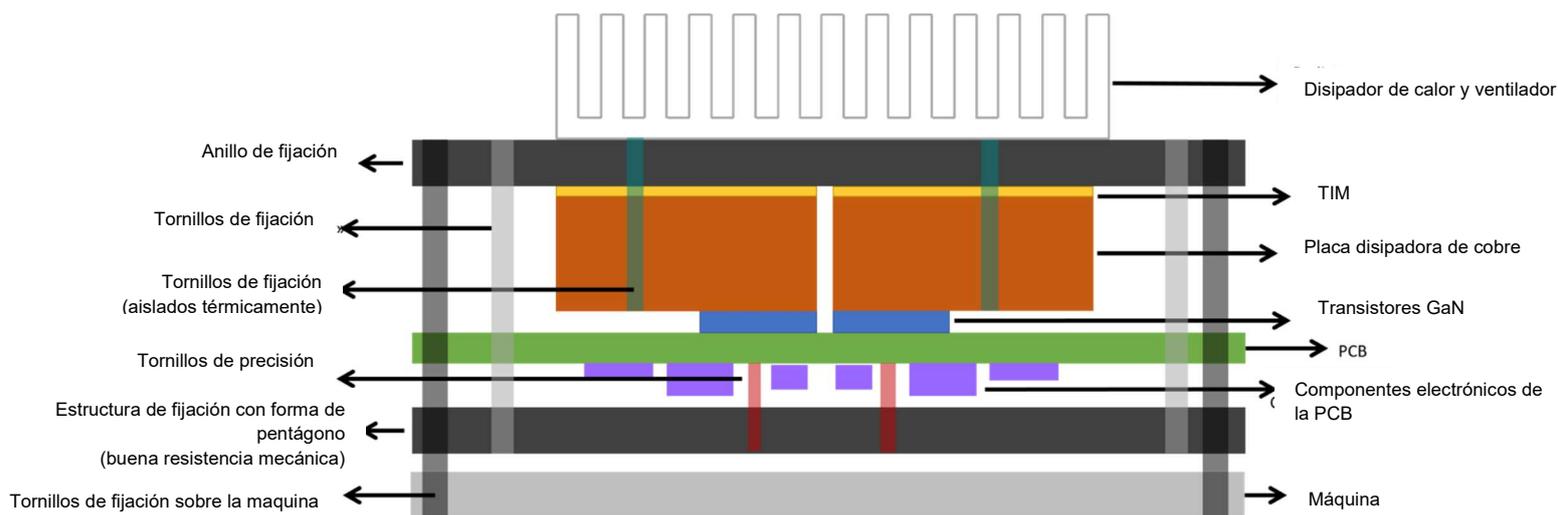
*Ilustración 5 Ubicación global de los elementos y vista de la estructura de pentágono (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

El sistema estaba compuesto inicialmente por:

- Una PCB (tarjeta electrónica de potencia) que es el soporte de los componentes y circuitos eléctricos para la realización del inversor, que impulsa la máquina eléctrica.
- Componentes GaN, que son transistores de potencia recientemente desarrollados. Tienen la ventaja de ser muy compactos y eficientes para altas potencias, pero también se calientan mucho y por lo tanto tienen que ser enfriados. Esta es una de las principales limitaciones que se deben tener en cuenta en el diseño. Estos componentes GaN se encuentran sobre la PCB.
- Disipadores (bloques de cobre para disipar el calor del GaN).
- Un sistema de refrigeración activo (ventiladores colocados en el exterior) y pasivo (entrada de aire). Este último se trata de unas perforaciones en la envoltura de metal que se contempla realizar también en este trabajo.

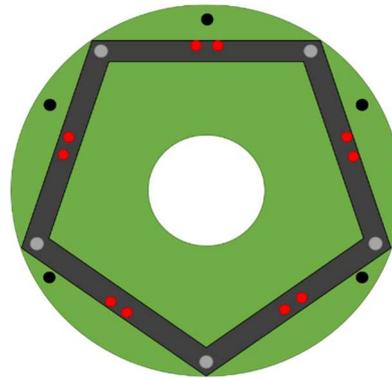
- Un material TIM, en forma de una lámina delgada, está destinado a garantizar un buen contacto térmico con las superficies que lo requieran, es decir, entre los disipadores y el anillo de fijación.
- La propia estructura mecánica, que consiste en un pentágono y un anillo de fijación. Esta estructura permite fijar los diversos elementos mencionados anteriormente juntos. La estructura está unida a la máquina eléctrica.

En la Ilustración 6 se muestra un diagrama de la primera idea que se tuvo del conjunto. Esta vista es un corte del conjunto (hay 5 elementos como este para cada inversor, y 2 inversores en total):



*Ilustración 6 Boceto de la primera solución prevista (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

En la Ilustración 7, aparecen los distintos tornillos desde una vista en alzado, y ayuda a entender la función de la estructura con forma de pentágono. Además de su papel de soporte de la estructura mecánica, que participa en la rigidez del conjunto. Los tornillos de presión, mostrados en rojo, también se proporcionan para presionar el conjunto PCB-GaN contra los disipadores de cobre, de modo que el contacto térmico sea el mejor posible.



*Ilustración 7 Colocación de los tornillos de fijación y presión en la estructura con forma de pentágono (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

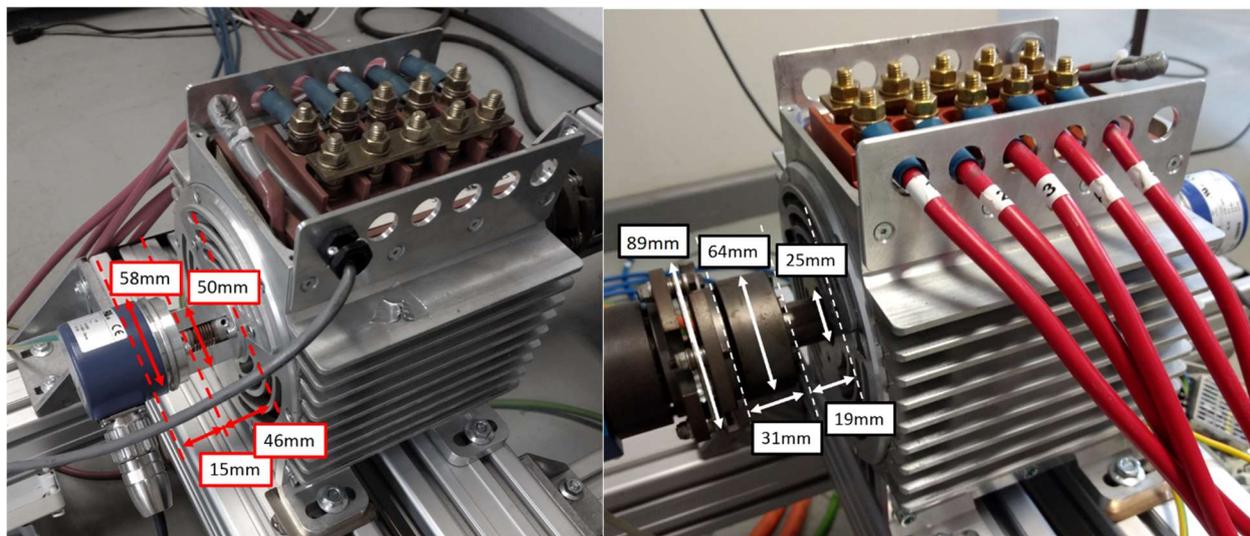
### 3.3 Restricciones e instrucciones del cliente.

Se han resumido las restricciones del cliente en la Tabla 1:

Restricciones	Dimensiones	Flexibilidad
Incorporar el inversor en la máquina	-	No
Asegurar la evacuación térmica por conducción desde Gan hacia el exterior	-	No
Diseñar los inversores desmontables	-	No
Adaptación al banco existente	-	No
Planificar la fijación de los sistemas de refrigeración a la carcasa metálica	-	No
Permitir que la PCB se conecte a los circuitos de alimentación de la máquina	-	No
Ser capaz de implantar los distintos componentes que ya se ha planificado instalar en el conjunto del alternor-arrancador. (Codificador, torquímetro, acopladores, ...)	Diámetro interior PCB < 52mm	No

*Tabla 1 Restricciones del cliente.*

Según lo especificado por el cliente, debemos integrar los 2 inversores a cada lado de la máquina sin modificar el banco existente. En esta parte se va a presentar esta especificación.



*Ilustración 8 Vistas desde la izquierda y la derecha del banco de pruebas (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

En la Ilustración 8 (izquierda), vemos que la altura de nuestro inversor está limitada a 46 mm de longitud. Además, el diámetro del codificador es demasiado grande en comparación con las solicitudes del cliente, que desean un diámetro interior de 52mm para la PCB. Por lo tanto, será necesario encontrar una solución para desmontar y volver a montar el codificador. Para encontrar la solución se debe de tener en cuenta el tamaño de los acopladores de un lado. Del otro lado tener en cuenta que la parte fija del codificador está unida al motor por un anillo espaciador de 50 mm de diámetro.

Por otro lado, el acoplador entre el sensor de par (no visible en la figura derecha) y la máquina es demasiado grande. Tal como está, la restricción de diámetro interno de la PCB no era sostenible, pero el cliente terminó comprando un acoplador similar al que se ve en la foto, pero más pequeño. El diámetro máximo de este acoplador es de 50 mm, por lo que en última instancia no habrá dificultades por este asunto.



## 4 ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL DISPOSITIVO.

En esta parte se van a describir los elementos que se van a utilizar en la concepción del producto para que la descripción del diseño realizado por el autor sea más fácil de interpretar y el alumno pueda diseñar el dispositivo con un conocimiento total sobre los componentes que se integran en el diseño.

### 4.1 Gan.

En la placa electrónica se necesitan 5 pares de transistores. Se han elegido transistores HEMT (transistor de alta movilidad de electrones) de material GaN (nitruro de galio) por sus tres ventajas principales:

- Elevada tensión de ruptura gracias a su capacidad de alcanzar elevados campos eléctricos internos.
- Mayores potencias de salida gracias a sus altas corrientes.
- Elevada conductividad térmica, pudiendo operar a grandes temperaturas.

El GaN elegido por el equipo constructor de la placa es el GS61008T. GaN systems implementa un diseño de célula patentada llamada Island Technology® para elevar la corriente de ruptura. El GaN PX® permite una baja inductancia y resistencia térmica en un elemento con reducidas dimensiones. Además, el GS61008T es un transistor que permite disipar fácilmente el calor. Se ofrece una resistencia térmica entre la unión y la capsula muy baja para aplicaciones de alta potencia. Estas características se combinan para proporcionar una conmutación de potencia de muy alta eficiencia.

Entre todas sus características, que se pueden encontrar en el anexo II obtenidas de: (Inc, 2009), algunas de ellas son:

- Simples requisitos de accionamiento de puerta (0 V a 6 V).
- Tolerancia de transición de la puerta entre -20 y +10 V.
- Frecuencia de conmutación muy alta (> 10 MHz).
- Tiempos de caída y subida rápidos y controlables.
- Capacidad de corriente inversa.
- Cero pérdidas de recuperación inversa.
- Pequeñas dimensiones (7,0 x 4,0 mm<sup>2</sup>).
- Almohadillas de doble puerta para una distribución óptima.
- Cumple con la norma RoHS 3 (6+4).

#### 4.2 Placa de cobre.

Otro material que se ha pensado utilizar es una placa de cobre para poder disipar el calor generado por el transistor. Se elige el material de cobre por ser el que presenta una conductividad térmica más alta después de la plata. Las dimensiones de cada una de las placas son muy reducidas, además para la correcta instalación vamos a tener que perforarlos.

#### 4.3 Acero.

El siguiente material que se piensa utilizar es el acero para poder repartir el calor disipado en las placas de cobre en una superficie más grande. De esta forma al esparcir el calor será más fácil disiparlo. Analizando las distintas aleaciones de acero se ha observado que la influencia térmica no es muy grande. Se ha elegido una aleación al Cr-Ni ya que es muy utilizada para elementos telefónicos como chips de teléfonos móviles. Además, esta aleación cuenta con una alta conductividad térmica.

#### 4.4 TIM.

En la instalación debemos de asegurar un contacto perfecto con los distintos materiales del conjunto para disipar el calor de la mejor forma posible. El material de interfaz térmica (TIM) proporciona un intercambio térmico eficiente entre un difusor y un disipador térmicos. En estos materiales se busca una conductividad térmica y una fuerza de deformación muy baja. De esta forma se reduce el riesgo de daños en componentes frágiles y asegura una rápida transferencia del calor lejos de los componentes electrónicos.

Para el contacto entre el transistor GaN y la placa de cobre disipadora se ha elegido el material de interfaz TFO-X200-SI. Para el contacto entre la placa de cobre disipadora y la tapa de acero del conjunto se ha elegido este mismo material. Toda la información técnica se puede encontrar en el anexo II obtenido de: (Co.KG). Este modelo es una lámina de silicona de alto rendimiento de aislamiento eléctrico y conductividad térmica. En él se usa una formulación específica empleando partículas cerámicas altamente conductoras de calor. Gracias a ellas se alcanza una alta conductividad térmica. La estructura de la superficie conformada garantiza un buen contacto con las superficies de adyacentes. Por lo tanto, la resistencia térmica se minimiza. Este material usa un refuerzo de fibra de vidrio que proporciona una buena resistencia al corte, así como la facilidad de manejo. Esto permite un premontaje fácil y fiable, ya que la instalación adecuada del TIM es crucial para el buen funcionamiento de los dispositivos electrónicos.

#### 4.5 Ventiladores

Para disipar el calor vamos a emplear también un disipador de calor por convección de forma activa. Se ha elegido un ventilador de la marca Malico. Este tipo de ventilador por sus dimensiones y datos de resistencia térmica parece ajustarse a nuestras necesidades. Además, permite una instalación fácil ya que cuenta con un adhesivo que acepta altas vibraciones de la máquina. Todas las características del modelo HF35-15 se encuentra en el anexo II.



#### 4.6 Placa del circuito impreso (PCB).

La placa de circuito impreso, también conocida por sus siglas en inglés PCB (printed circuit board) va a estar constituida por pistas o buses de material conductor laminadas sobre una base no conductora. El circuito impreso se va a utilizar para conectar eléctricamente a través de las pistas conductoras, y sostener mecánicamente, por medio de la base, un conjunto de componentes electrónicos. Las pistas son generalmente de cobre, mientras que la base se fabrica generalmente de resinas de fibra de vidrio reforzada, cerámica, plástico, teflón o polímeros como la baquelita. En este trabajo nos vamos a referir a ella como PCB.



## 5 ELABORACIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO.

En este apartado se va a describir el diseño mecánico elaborado incluyendo la metodología y justificación para llegar hasta él.

### 5.1 Primera propuesta.

Se pensó que sería interesante limitar el número de piezas utilizadas en el sistema para ganar espacio y simplificar nuestro producto final. También se quiso crear un diseño modular, porque se pensó que sería más interesante en el contexto de una hipotética industrialización futura. Obviamente, estamos trabajando en el diseño de un prototipo, y la fase de industrialización puede no ocurrir, razón por la cual la modularidad no era una prioridad para el proyecto. Sin embargo, si se pudiese integrar este aspecto sin dificultad, no quisiéramos privarnos de él.

La primera solución que se pensó consiste en una estructura metálica que rodea el conjunto y una tapa en la que se adhieren todos los componentes del inversor, con el fin de tener una solución modular.

Por otro lado, en un primer instante se pensó en una organización interna de los elementos diferente a la solución final. Esto se debió a que no pensábamos que se necesitaran apoyos físicos bajo el GaN para garantizar un buen contacto con los disipadores. Se creía que sólo los tornillos de las fijaciones previstas serían suficientes. Esta solución tenía la ventaja de requerir menos piezas, pero no proporcionaba suficientes garantías al cliente. Ellos preferían el soporte físico para asegurarse que el contacto sea bueno, ya que la conducción térmica es óptima en este caso.

### 5.2 Solución elegida.

Finalmente, después de varios intercambios y modificaciones con el cliente, se llegó a la solución final. Esta consta de varias partes de las que se habla aquí.

En primer lugar, hemos conservado el principio de una estructura abierta que rodea el conjunto y una tapa de cierre. Estos elementos constituyen la estructura mecánica del producto. La estructura que rodea el conjunto se monta en el lateral de la máquina eléctrica, reutilizando los taladros existentes.

La tapa, por otro lado, sirve como soporte en el que se unirán todos los elementos internos, es decir, la PCB, los transistores GaN y los disipadores de cobre. Se detalla todo el conjunto en la Ilustración 9. Así, se ha conseguido conservar el modularidad del diseño, ya que para montar y desmontar los componentes electrónicos será suficiente con los 5 tornillos de la tapa. Por lo tanto, en la práctica, la estructura metálica nunca tendrá que ser desmontada.

La Ilustración 10 muestra cómo se ha concebido el sistema. El cuerpo gris de la derecha modela la máquina eléctrica de forma simplificada. Las conexiones y cableados con la máquina eléctrica en la parte superior del inversor están representados en azul claro. En azul oscuro encontramos el codificador y los ventiladores en naranja. En verde encontramos la PCB.

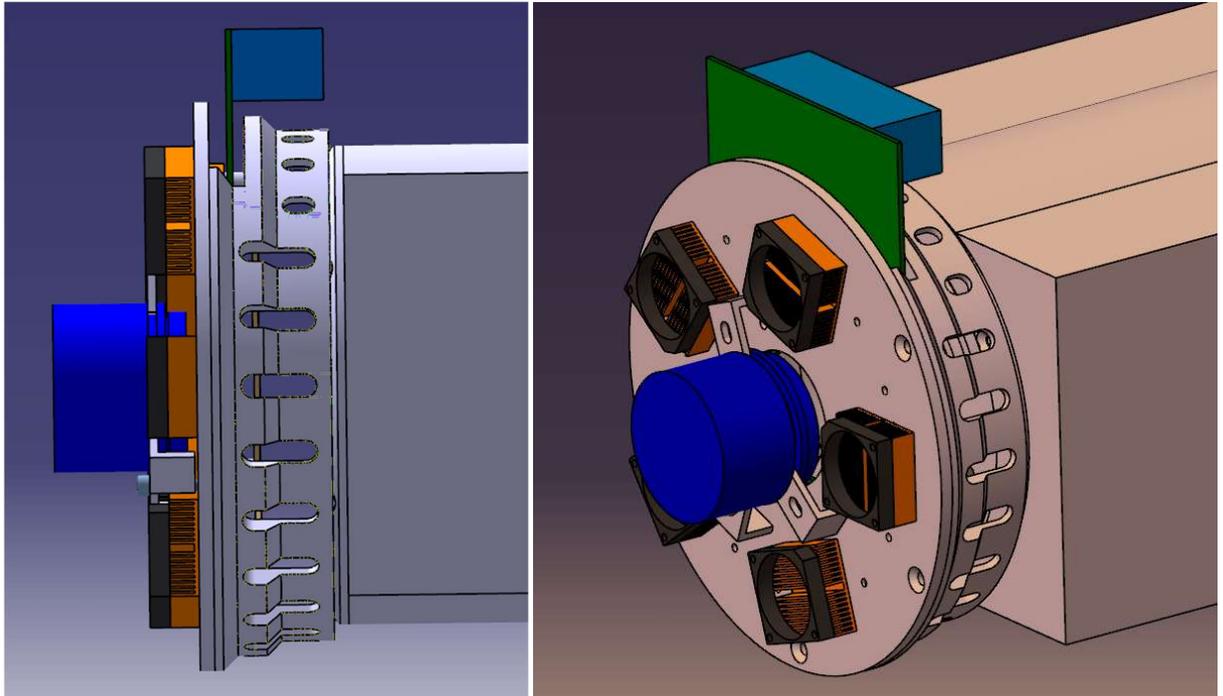


Ilustración 9 Vistas de la solución final elegida (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).

Ahora se van a detallar las uniones de los elementos GaN y disipador, además del montaje final.

En la Ilustración 10 podemos ver una representación que se ha realizado cortando la tapa :

- La tapa en gris en la parte superior.
- La PCB en verde.
- Los disipadores en naranja.
- El GaN en negro (entre la PCB y los disipadores).

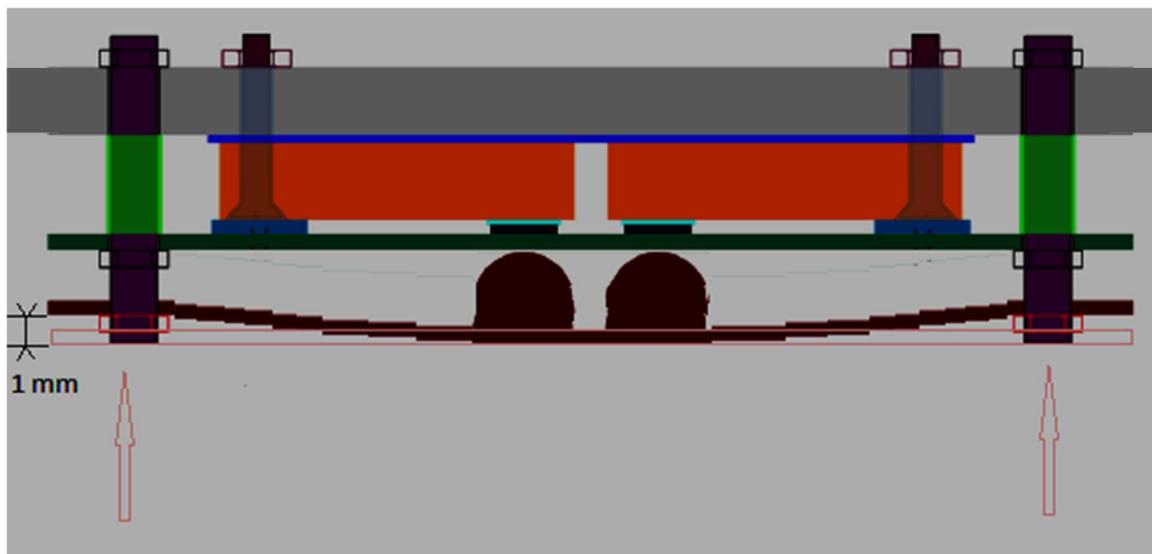


Ilustración 10 Vista de uno de los cinco pares de transistores con los disipadores que constituyen un inversor (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).

### **Enlace disipador-tapa:**

Se optó por el uso de tornillos con el fin de vincular el disipador a la tapa. De hecho, fue la solución más barata y fácil de implementar, ya que había varias restricciones importantes:

- Resistir las altas temperaturas del medio.
- Garantizar un contacto térmico óptimo en las interfaces GaN/disipador y disipador/tapa
- Asegurar una buena conducción y disipación del calor producido por GaN a través de los disipadores.
- Tener aislamiento galvánico entre el disipador y la tapa.

La restricción más complicada era tener tornillos que aseguraran una conducción térmica adecuada mientras estaban aislados eléctricamente. Tuvimos que comprometernos en este aspecto, ya que la mayoría de los buenos conductores térmicos (principalmente metales como el cobre utilizado en los disipadores) también son muy buenos conductores eléctricos.

Después de mucha investigación, encontramos varios materiales no conductores que podrían soportar altas temperaturas. Estos son ciertos tipos de plástico como PA, PPS, PFA o POM. Elegimos el PPS porque es capaz de soportar hasta 200°C y se utiliza en muchos dispositivos electrónicos. También podríamos haber utilizado tornillos de cerámica, pero la diferencia de precio era muy importante. Estos se detallan en el anexo I.

Para garantizar un buen contacto con los disipadores, utilizamos tornillos de cabeza avellanada, para que la cabeza del tornillo no sobresalga del disipador. La solución final elegida consiste en 2 tornillos M4 por disipador con una cabeza avellanada. Un total de 20 tornillos por inversor, por lo tanto, 40 tornillos para los dos inversores. El contacto entre el disipador y la tapa se realizará a través del TIM. Esta pasta térmica permite asegurar un excelente contacto entre las dos piezas.

### **GaN:**

Uno de los puntos clave de este proyecto, como ya se ha discutido, es asegurar el correcto enfriamiento del GaN. Estos últimos son componentes frágiles y sensibles. Su posición e interferencia con la PCB y los disipadores debe ser perfecta desde el punto de vista de la conducción térmica. La solución elegida por el equipo electrónico para conectar GaN a la PCB es la soldadura de estaño, un proceso tradicionalmente utilizado para este tipo de componente y del que el autor de este trabajo no es responsable. Por otro lado, los GaN no están conectados mecánicamente a los disipadores, ni se sueldan en ellos. Es por eso que el cliente nos ha pedido que realicemos un soporte mecánico ligero diseñado para aplicar un pequeño esfuerzo de prensado en la PCB debajo del GaN, con el fin de presionar estos contra los disipadores (Se observa en la parte inferior en color burdeos, Ilustración 10).

De este modo, se pensó en un sistema de barra de presión, utilizando la deformación de un haz de flexión para crear estos esfuerzos de prensado.

Para dimensionar correctamente estas barras, primero se eligió el material. Se va a usar fibra de vidrio.

Los datos del GaN indican una presión máxima permitida de 100 psi (Anexo II). No obstante, se decidió calcular el esfuerzo de prensado que se aplicará a cada GaN a partir de una presión de 30 psi, para no arriesgarnos a dañar el componente.

Conociendo la superficie del GaN, pudimos deducir el valor del esfuerzo de prensado a aplicar:

$$F = 22 \text{ N}$$

La teoría de estructuras permitió determinar la expresión de la flecha en función del grosor de la barra. (Ilustración 11)

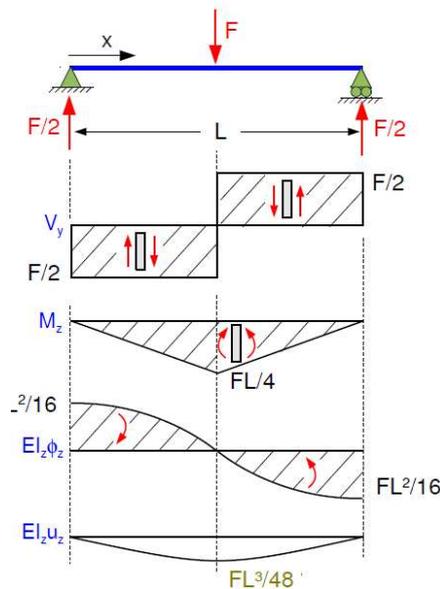


Ilustración 11 Cálculo de la flecha.

La flecha se da por la siguiente fórmula:

$$u_z = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot I_z \cdot E}$$

Con

$$I_z = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Al ingresar la fórmula en Excel, se pudo calcular esta flecha de acuerdo con diferentes espesores, lo que dio como resultado el siguiente gráfico (Ilustración 12):

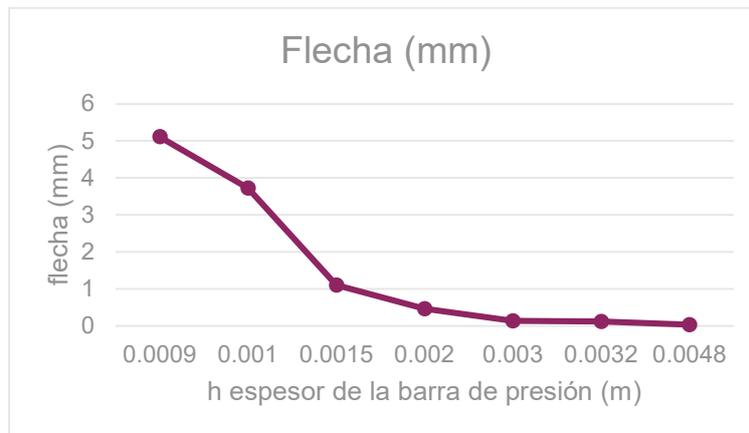


Ilustración 12 Representación de la flecha según el espesor de la barra de presión.

Por otra parte, para garantizar un contacto idóneo sin dañar ningún elemento del conjunto se decidió (bajo el consejo del cliente) añadir un falso GaN. La Ilustración 13 muestra su ubicación. Se fabricarán con el mismo material que la PCB (fibra de vidrio).

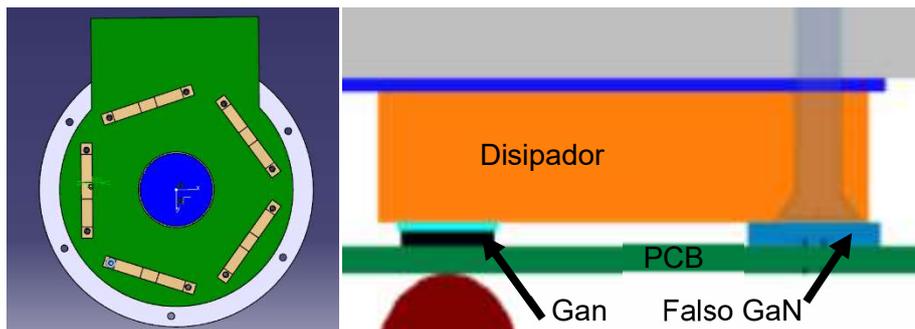


Ilustración 13 diseño de la barra de presión y vista del falso GaN (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).

### Enlace de tapa - PCB:

Para enlazar la PCB a la tapa, se decidió usar tornillos. Estos tornillos también se pueden utilizar para asegurar las barras de presión. La principal restricción aquí era limitar la perforación a través de la PCB, o al menos ponerlos en la periferia, donde hay menos componentes. Decidimos utilizar 10 tornillos CHC M4 por PCB, como se muestra en la Ilustración 14. Además, se colocan a ambos lados de la PCB para proteger los GaN de una presión demasiado alta que podrían aplastarlos, y también para mantener un cierto espacio entre la PCB y las barras de presión.

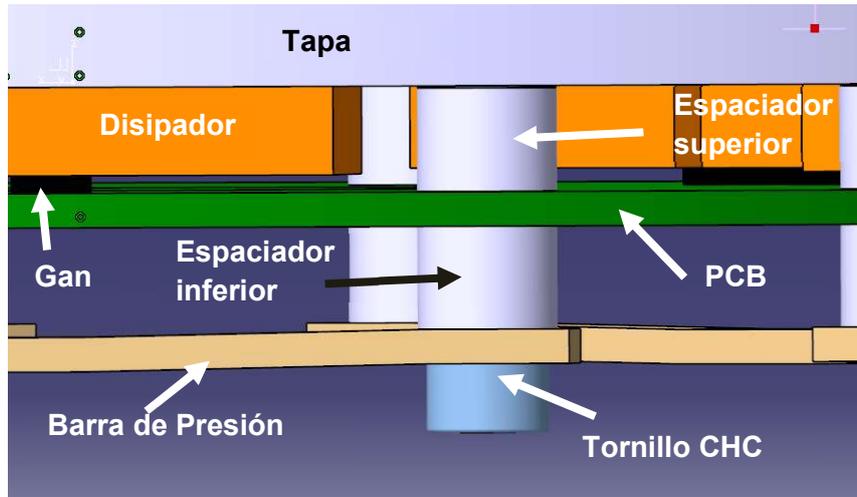


Ilustración 14 Diseño del sistema (vista radial con la estructura metálica oculta) (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).

**Tapa:**

La tapa es la parte mecánica en la que se unen la mayoría de los componentes del sistema. Consta de una lámina de aluminio de 5mm de espesor y 196mm de diámetro. Hemos visto más arriba que los tornillos mantienen los disipadores y la PCB por la parte de debajo de la tapa. El sistema de enfriamiento activo, que consta de 5 ventiladores, también se une a él, pero del lado opuesto.

La Ilustración 15 muestra la implantación de las diversas perforaciones en la tapa, así como los ventiladores.

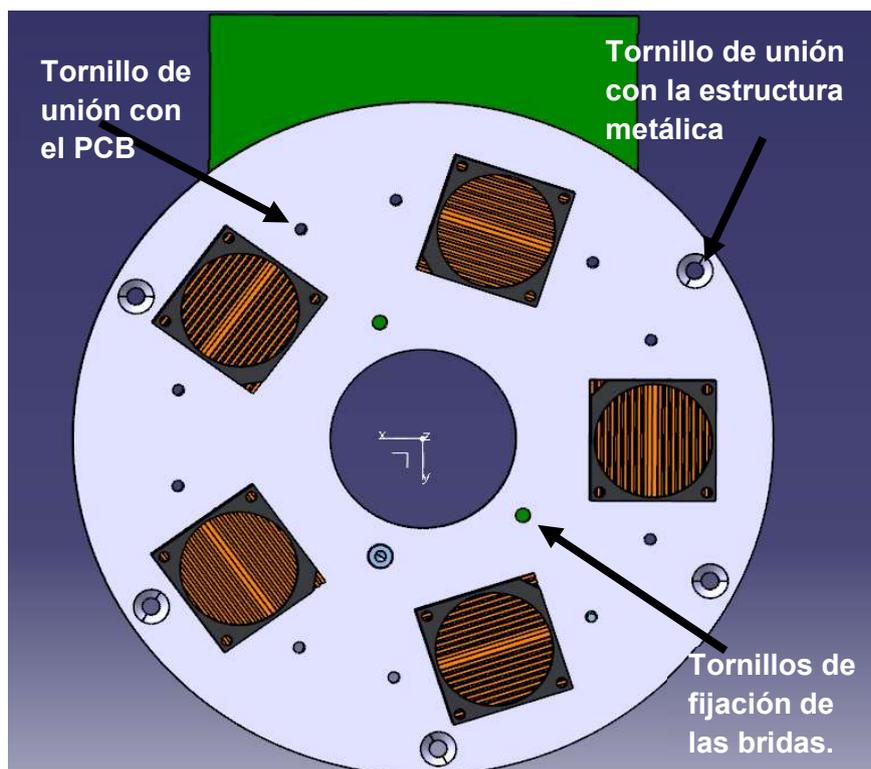
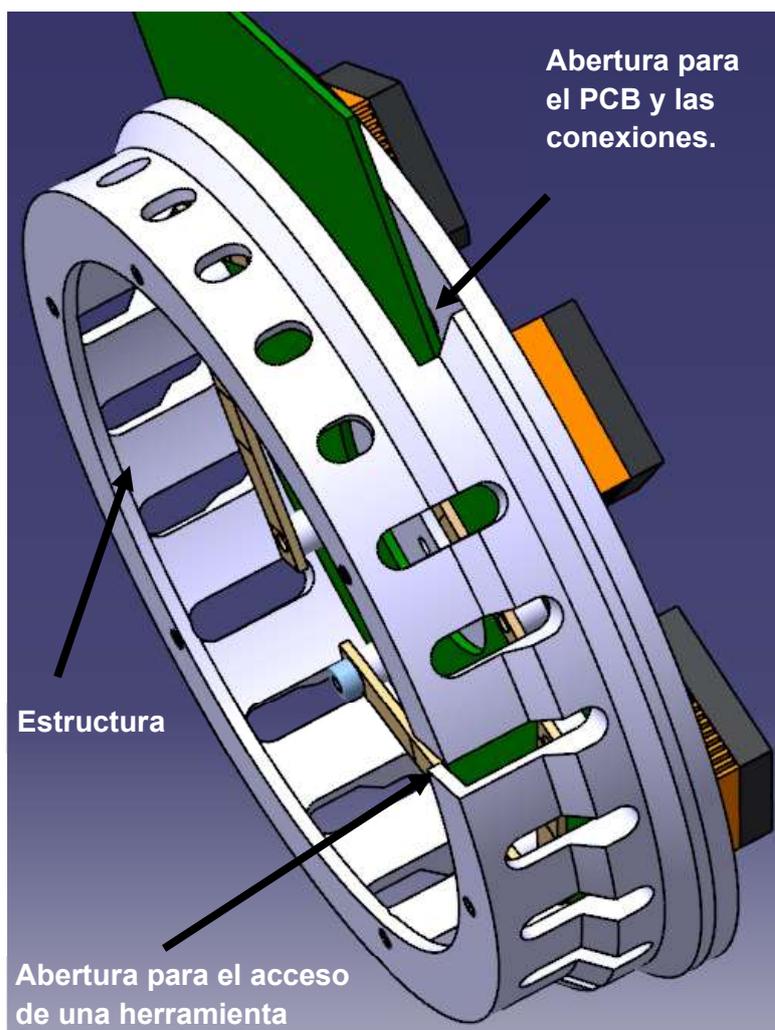


Ilustración 15 Implantación de las perforaciones en la tapa (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).

### Estructura metálica:

La estructura metálica protegerá el inversor. Se fijará a la máquina, reutilizando los agujeros roscados ya presentes. La tapa cerrará la estructura metálica del otro lado. La estructura metálica se diseñó con diversas aberturas, con el fin de evacuar más fácilmente el calor producido por el funcionamiento de la máquina y los componentes de la PCB. También se equipó con una abertura en la parte de arriba para permitir las conexiones entre la máquina y la PCB. La PCB sobresale de forma que en esa zona de la PCB se van a colocar dichas conexiones

Otra abertura se diseñó en uno de los lados de la estructura. Se ha añadido una ventana para que se pueda acceder con una herramienta en el montaje. Esto se debe a que el acoplamiento del codificador en un lado y el sensor de par en el otro deben ser desmontados para instalar nuestro sistema y luego volver a montarlo después. Hay un tornillo de presión para quitar el acoplamiento del rotor, de ahí la presencia de esta ventana.

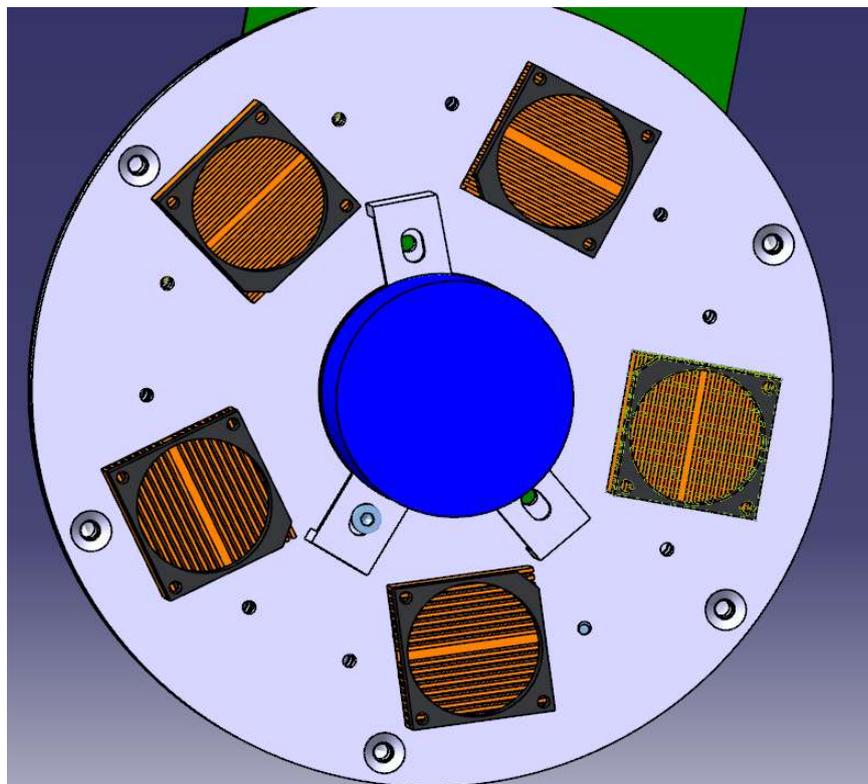


*Ilustración 16 Estructura metálica (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

### **Bridas:**

Actualmente, el codificador está conectado al rotor de la máquina a través de un acoplamiento. Desafortunadamente, el diámetro del codificador es demasiado grande en comparación con el diámetro interior máximo de la PCB. De hecho, el cliente impuso un diámetro interior máximo de 52 mm, mientras que el codificador tiene un diámetro de 58 mm. Esa imposición se debe a la necesidad de espacio para colocar los componentes electrónicos en la PCB. Así que tendremos que quitar el codificador para instalar nuestro conjunto y luego volver a montarlo. Sin embargo, no es posible acceder a los tornillos que unen el codificador y el acoplamiento, ya que no habrá suficiente espacio para quitar los tornillos debido a los componentes del inversor. Así que decidimos crear un sistema de unión distinto, creando un nuevo sistema para vincular el codificador al inversor. Los tornillos que unían el codificador no serán usados y la solución propuesta con bridas va a hacer la función de unión del codificador con el acoplamiento.

Este enlace se basa en un sistema de bridas extraíbles, que se anclan en una ranura existente del codificador, y se atornillan en la tapa (ver Ilustración 16 e Ilustración 17). Por lo tanto, para el montaje, será suficiente con quitar las bridas y el tornillo de presión del acoplamiento a través de la ventana de la estructura metálica para que el sistema sea montable o extraíble.



*Ilustración 17 Sistema de bridas de fijación del codificador (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

En el apartado de solución para el montaje del conjunto se detalla cada componente y cada unión. Es interesante ir a este apartado para comprender el diseño completo. Además, en el anexo III hay disponibles vistas adicionales del diseño.

## 6 ANÁLISIS Y JUSTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL MODELO.

Una vez validada la concepción mecánica con el cliente lo que se busca es validar el modelo térmico. Para ello se va a usar el módulo de thermal de Ansys. Antes de arrancar con el programa se realiza una definición de la generación y disipación de calor, además de establecer las condiciones y simplificaciones a realizar.

### 6.1 Gan

El transistor GaN es la fuente de calor más preocupante de la placa PCB, es muy importante comprobar que el calor generado por este se disipa bien hacia el exterior. Si este elemento alcanza temperaturas superiores a un determinado valor se estropearía y el circuito eléctrico de la placa de PCB dejaría de funcionar correctamente. Tal fallo puede ser un factor de riesgo en el conjunto del alternador. Por ello, en primer lugar, se van a calcular las pérdidas de calor del GaN. A continuación, a partir de estas pérdidas se va a analizar, con un programa de simulación, si este calor es disipado hacia el exterior por el conjunto de elementos que se han definido anteriormente. Las pérdidas del transistor incluyen las pérdidas de conducción, las pérdidas de conmutación directas y pérdidas de conducción inversas.

Antes de calcular las distintas pérdidas se va a explicar el comportamiento térmico del transistor GaN.

#### Comportamiento térmico del propio GaN

La energía que se requiere para operar los circuitos integrados (IC) es proporcional al voltaje y corriente que circula a través de los pines de la fuente de alimentación. El consumo de energía crea calor y da lugar a temperaturas de la unión diferentes a la temperatura ambiente. Hay varios factores que afectan a la temperatura de la unión:

- El calor de los circuitos integrados vecinos.
- Flujo de aire.
- Material del embalaje del IC.
- Técnica de empaquetamiento del IC.
- Número de pistas en el conjunto del IC.
- Los materiales de la placa de circuito impreso (PCB).
- La temperatura ambiente.

La temperatura del aire ( $T_a$ ) dicta la temperatura mínima a la que funciona el dispositivo. No importa cuánto calor se suministre o el flujo de aire, el dispositivo no se enfriará más que el aire exterior. Una vez que el circuito impreso comienza a disipar la energía, la temperatura de unión ( $T_j$ ) aumenta por encima de la temperatura ambiente. Puedes reducir la temperatura de la unión añadiendo flujo de aire o disipadores de calor, pero mientras la energía se disipa, la temperatura de la unión se eleva a una temperatura superior a la  $T_a$ .

La resistencia térmica (Ilustración 18) es la capacidad de un dispositivo dado para disipar el calor generado internamente. Básicamente, la resistencia térmica se utiliza para calcular cuánto aumenta la  $T_J$  en función de la potencia disipada por el dispositivo.

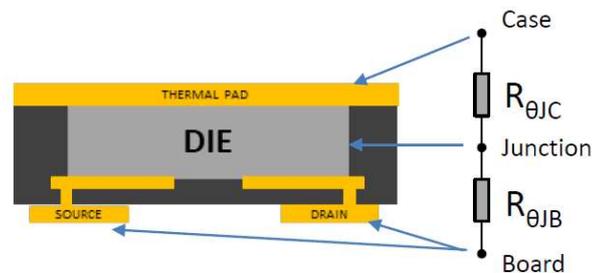


Ilustración 18 Representación de las resistencias térmicas del GaN (Obtenido de: (semiconductor, 2017))

Para nuestro modelo consideramos:

- $T_a$  = temperatura del ambiente con el aire en calma = 25°C. Aunque, para el modelo completo en el programa de simulación sí que se consideraran un conjunto de disipadores activos de calor (5 ventiladores).
- $T_c$  = temperatura de la capsula (referido como case en la Ilustración 18) del dispositivo semiconductor.
- $T_J$  = temperatura del circuito del dispositivo en sí mismo bajo determinadas condiciones de funcionamiento. (referido como junction en la Ilustración 18)
- $T_{J\text{MAX}}$  = temperatura máxima que el dispositivo tolera para garantizar un funcionamiento fiable. Como diseñador del sistema se va a asegurar que  $T_J < T_{J\text{MAX}}$  para garantizar la fiabilidad. Al igual que el rango de la temperatura almacenada ( $T_s$ ). Como se ve en el anexo II la temperatura de la unión operativa está entre -55 y 150°C.
- $P_d$  (disipación de energía) = energía consumida mientras el dispositivo está en funcionamiento y este consumo de energía crea calor. Se quiere obtener en vatios (W). Se calculará analíticamente como se explica en el apartado siguiente.
- Flujo de aire = movimiento del aire sobre y alrededor del dispositivo que se utiliza para eliminar el calor del sistema.
- $\Theta$  Resistencia térmica = Conjunto de constantes derivadas empíricamente que describen las características del flujo de calor de un sistema determinado, expresado en °C/W. La resistencia térmica es una medida de la capacidad de un conjunto para transferir el calor generado por el dispositivo dentro de un conjunto al ambiente (Ilustración 19). Algunos factores que afectan a la resistencia térmica son:
  - el tamaño de la matriz del chip IC
  - el compuesto del molde

- el diseño del marco de plomo / sustrato.

En el modelo se tiene en cuenta:

- $\theta_{JA}$  (resistencia térmica de unión a ambiente) Representa la capacidad del transistor para conducir el calor del chip IC dentro del conjunto al ambiente.  $\theta_{JA}$  se define como la diferencia entre la temperatura de la unión y la temperatura ambiente cuando el dispositivo está disipando 1 W de potencia.

$$\theta_{JA} = (T_J - T_a)/P_d$$

Se expresa en °C/W. Para un determinado conjunto y marco de plomo, algunos factores que afectan a  $\theta_{JA}$  son:

- el tamaño de la zona no dopada (zona die en la Ilustración 19).
  - la longitud de los trazos de la placa de circuito impreso adheridos al conjunto del IC en la placa del sistema
  - la cantidad de flujo de aire a través del conjunto
- $\theta_{JC}$  (resistencia térmica de la unión a la cápsula). Esta es la única dada por el fabricante (0.55 °C/W). Se define como la diferencia de temperatura entre la unión y un punto de referencia en el conjunto cuando el dispositivo está disipando 1 W de potencia.

$$\theta_{JC} = (T_J - T_c)/P_d$$

*Ecuación 1*

Es principalmente una función de las propiedades térmicas de los materiales que constituyen el conjunto.

- $\theta_{CA}$  (resistencia térmica de la capsula al ambiente) es la resistencia térmica de la capsula al ambiente. Se define como la diferencia de temperatura entre un punto de referencia en el conjunto y la temperatura ambiente cuando el dispositivo está disipando 1 W de potencia.

$$\theta_{CA} = (T_C - T_A)/P_d$$

Depende principalmente de la superficie disponible para la convección y la radiación y de las condiciones ambientales, entre otros factores. Esto se va a controlar mediante el uso de disipadores de calor, proporcionando una mayor superficie y una mejor ruta de conducción. Además, se va a usar la refrigeración por aire.

La resistencia térmica de unión al ambiente es la suma de las resistencias térmicas de unión a la capsula y de la capsula al ambiente. En otras palabras, la relación entre los parámetros térmicos se puede expresar como:

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CA}$$

- $\theta_{JB}$  (unión a placa) son los parámetros térmicos que se utilizan generalmente para caracterizar el conjunto del transistor. Es la resistencia térmica de la unión a la

placa de PCB (referido como board en la Ilustración 19). Se define como la diferencia de temperatura entre la unión y la placa cuando el dispositivo está disipando 1 W de potencia.

$$\theta_{JB} = (T_J - T_B)/P_d$$

Siendo  $T_B$  la temperatura de la placa de PCB tomada en un lugar predefinido cerca de la zona no dopada.

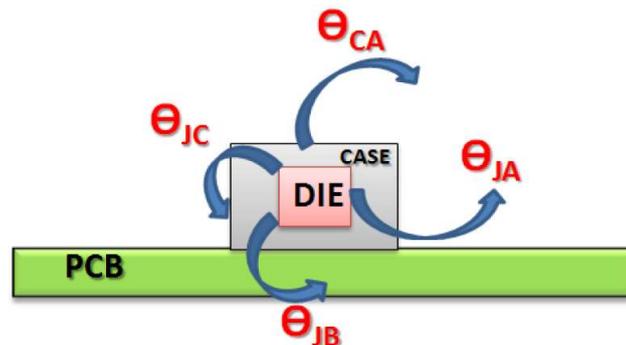


Ilustración 19 Tipos de resistencias térmicas (Obtenido de: (semiconductor, 2017))

Este contenido ha sido extraído de: (Cypress semiconductor, 2017)

Una vez descritas las distintas temperaturas y resistencias térmicas de cada capa del transistor se van a describir las pérdidas generadas en este. Esta descripción permite justificar la ecuación que define la generación de calor del conjunto, así como los parámetros que influyen en esta generación de calor.

### Pérdidas por conducción

La resistencia de conducción del GaN es muy pequeña, lo que hace que sus pérdidas de conducción sean comparables a las de un IGBT en condiciones de alta corriente. Debido a las características del dispositivo, la pérdida de conducción del GaN es proporcional al cuadrado de la corriente de drenaje (Continuous Drain Current) y la resistencia de drenaje a la fuente cuando el transistor está activo (Drain-to-source On resistance), según (BaochaoWang, 2019):

$$P_{on} = I_{DS}^2 \cdot R_{DS(on)} \cdot D$$

Ecuación 2

Donde D es el ciclo de operación o de trabajo (Representado en la Ilustración 20). Este se define como la relación entre la duración del pulso, o el ancho del pulso (PW) y el período (T) de una de onda rectangular.

$$D = \frac{PW}{T} \cdot 100\%$$

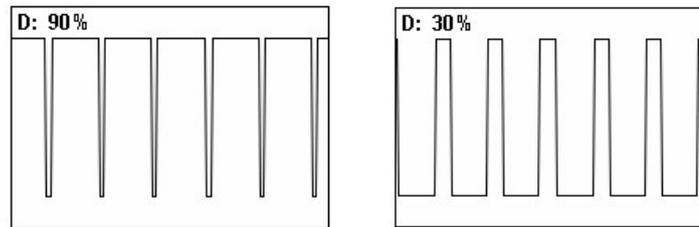


Ilustración 20 Representación del ciclo de operación (Obtenido de: (Schemm, 2018))

### Pérdidas de conmutación.

La pérdida de conmutación de un dispositivo de potencia es una parte importante de la pérdida del dispositivo, y es un índice importante del dispositivo de potencia. La fórmula de la pérdida de conmutación durante el encendido (o apagado) según (BaochaoWang, 2019) es:

$$E_{on(off)} = \int_0^t V_{DS} \cdot I_{DS} dt$$

donde t indica el tiempo transitorio de conmutación.

Poniendo un caso extremo basándonos en los datos del fabricante que encontramos en el anexo II, el valor de estos parámetros en corriente continua al drenaje:

$$\begin{aligned} V_{DS} &= 100 V \\ I_{DS} &= 90 A \\ f_{conmutación} &= 10 \text{ MHz} \left( t = \frac{1}{10000000} s \right) \\ E_{on(off)} &= 0.9 \cdot 10^{-3} (W) \end{aligned}$$

Estas pérdidas son despreciables frente a las pérdidas por conducción.

### Perdidas por conducción inversa

Según (BaochaoWang, 2019) las pérdidas por recuperación inversa son iguales a:

$$P_{inv} = (n \cdot (V_{TH} + R_{DSon} \cdot I_{DS}) \cdot I_{DS} \cdot T_D + R_{DSon} \cdot I_{DS}^2 \cdot T_{ON}) \cdot f$$

Donde:

- $V_{TH \min}$  es 1.1 V y  $V_{TH \max}$  2.6 V según los datos del fabricante en el Anexo II.
- $T_D$  (dead-band time) Tiempo muerto, representado en la Ilustración 21.
- $T_{ON}$  (turn-on time) es el tiempo que el transistor está abierto. Este es de  $f=5 \text{ MHz}$ ,  $2 \cdot 10^{-7} \text{ s}$  según los datos del fabricante en el Anexo II.
- $n$  es el numero de periodos muertos en el ciclo PWM

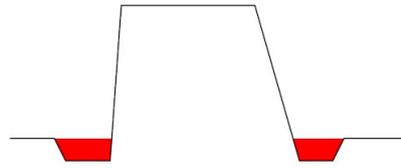


Ilustración 21 Representación una forma de onda idealizada del nodo de conmutación en un convertidor buck con pérdidas de tiempo muerto. La zona resaltada en rojo corresponde a este tiempo. (Obtenido de: (Schemm, 2018))

Dada la complejidad del problema eléctrico se han realizado varias conversaciones con el cliente. El equipo eléctrico nos ha confirmado que, gracias al tipo de transistor elegido, es posible realizar una configuración donde las pérdidas de recuperación inversa sean nulas. Es decir, en el modelo solo se van a considerar las pérdidas directas.

### Pérdidas totales.

Por tanto, las pérdidas totales de flujo de calor del transistor GaN son:

$$P_{Total} = I_{DS}^2 \cdot R_{DS(on)} \cdot D$$

En las figuras 3 y 4 del anexo II, encontramos los valores de  $R_{DS}$  y  $I_{DS}$  según la temperatura en la unión ( $T_j$ ).

La temperatura de la unión está directamente relacionada con la disipación de energía, la resistencia térmica y la temperatura ambiente, y la función de un disipador térmico es proporcionar la menor resistencia térmica posible entre la unión y su entorno, suponiendo que el entorno sea siempre más fresco.

Se puede suponer que la temperatura de la unión a la capsula es siempre constante bajo un funcionamiento transitorio. La  $T_j$  va a depender de la forma en la que se disipe el calor. Por tanto, para una corriente  $I_{DS}$  determinada, en un funcionamiento a 5V, tendremos valores distintos de  $R_{DS}$  según la  $T_j$ . Como el fabricante solo nos da las gráficas de  $I_{DS}$  en función de  $R_{DS}$  para  $T_j$  a 25°C o 150°C vamos a tener que iterar con ambas gráficas según la temperatura  $T_j$  que obtengamos en nuestra simulación. La Ilustración 22 donde se representa  $R_{DS(ON)}$  en función de  $T_j$  es una aproximación del comportamiento real. Esto también ha sido explicado al equipo que se encarga de configurar el transistor. Con ellos se ha llegado a la conclusión que la influencia de la idealidad es baja.

El equipo de construcción de la placa PCB nos ha dicho que el régimen de funcionamiento es entre 0 y 60 A. Aunque el funcionamiento más probable es de 40 A, nosotros nos vamos a poner en un caso bastante desfavorable de  $I_{DS} = 60$  A. Iremos suponiendo distintas  $R_{DS(on)}$  hasta que la temperatura  $T_j$  que obtengamos en la simulación corresponda con las pérdidas de calor calculadas en función de  $R_{DS(on)}$  como se observa en la Ilustración 22.

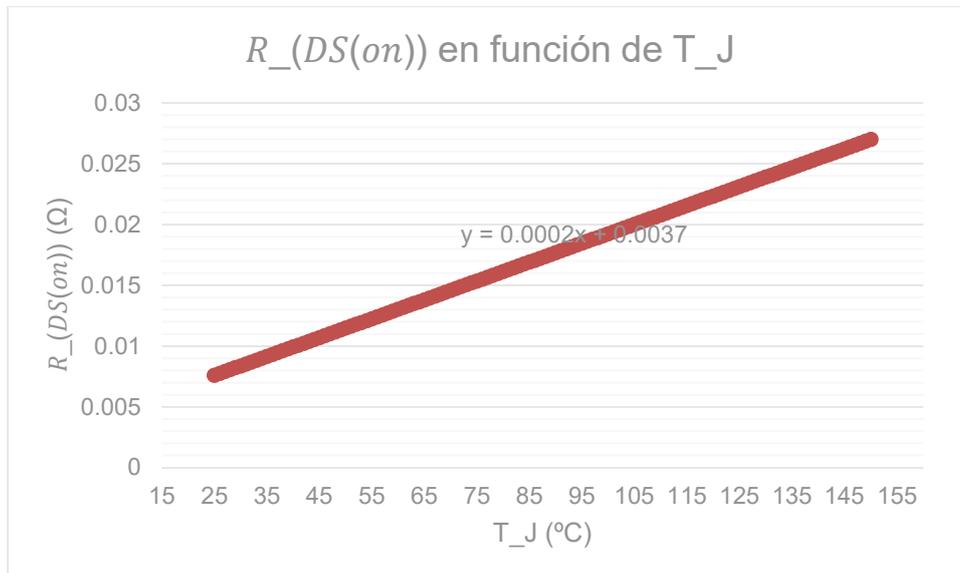


Ilustración 22 Representación de la resistencia del transistor desde la fuente hasta la zona de drenaje en función de la temperatura en el interior del transistor.

Por tanto, en la simulación consideramos un bloque de las dimensiones de este transistor. Para simular la generación de calor del transistor vamos a ir introduciendo las pérdidas totales que dependen de  $I_{DS}$  (Valor constante) y  $R_{DS\_ON}$  (Ilustración 23). Iremos haciendo iteraciones hasta que el  $T_J$  de la gráfica sea igual a la temperatura en el interior del bloque en la simulación.

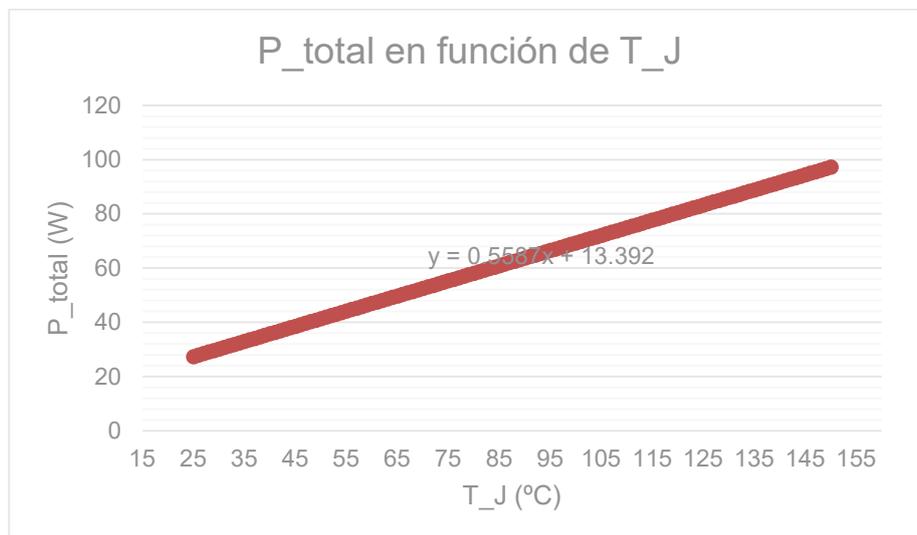


Ilustración 23 Representación de las pérdidas totales en función de la temperatura en el interior del transistor.

## 6.2 Placa de cobre.

Como se ha visto en el apartado a) el régimen de funcionamiento del transistor GaN está entre -55 y 150 °C. De la misma forma que en el apartado anterior, se tiene que escoger una conductividad térmica según la temperatura de la placa de cobre que obtengamos en la simulación. Podemos intuir que el régimen de funcionamiento estará entre 300 y 600 °K. La

influencia de la temperatura es casi despreciable por lo que encontramos en la Tabla 2. Se escoge una conductividad térmica de 401 W / m °K para la simulación.

ELEMENTO	Conductividad térmica "k" (W/m²K), a la temperatura en "K" de:							Propiedades a 20°C				
	200	273	400	600	800	1000	1200	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ J/kg°C	$k$ W/m.°K	$\alpha \cdot 10^6$ m <sup>2</sup> /seg	T. fusión °K
Cobre	413.0	401.0	392.0	383.0	371.0	357.0	342.0	8933	383	399.0	116.6	1356

Tabla 2 Propiedades térmicas del cobre ((Obtenido de: (S.Marco., 1958))

### 6.3 Acero.

Del mismo modo que para el cobre se escoge una conductividad térmica que va a depender del régimen de funcionamiento. Podemos intuir que el régimen de funcionamiento estará también entre 0 y 200 °C. La influencia de la temperatura es casi despreciable por lo que encontramos en la Tabla 3. Por tanto, tomamos como conductividad para nuestra simulación 60.5 W/m.°C.

Propiedades a 20°C		Densidad $\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	Calor especif J/kg°K	Conduct. $k$ W/m²K	Difusividad $\alpha \times 10^5$ m <sup>2</sup> /seg	Conductividad térmica en (W/m°C) a la temperatura en °C:							
Aleaciones	Composición					-100	0°C	100	200	300	400	600	800
Acero al cromo	1% Cr	7865	460	61	1,665	62	55	52	47	42	36	33	33
	5% Cr	7833	460	40	1,110	40	38	36	36	33	29	29	29
	20% Cr	7689	460	40	1,11	22	22	22	22	24	24	26	29

Tabla 3 Propiedades térmicas del acero. (Obtenido de: (S.Marco., 1958))

El contenido del apartado 6.2. y 6.3 ha sido extraído de (Obtenido de: (S.Marco., 1958))

### 6.4 TIM.

En este apartado se va a analizar la influencia térmica del TIM. Como se ha indicado en el apartado de caracterización de materiales se han elegido un TIM donde se utiliza una lámina de silicio con una conductividad térmica de 5.0 W/mK. Esta lámina tiene un espesor de 0.2 mm como se indica en el anexo II. Por tanto, su resistencia térmica es igual a:

$$R_{th\_tim\_c-a} = 1000.0 \text{ °C/W}$$

Si la comparamos con la resistencia térmica de la placa de acero de 5 mm:

$$R_{th\_acero} = 12.1212 \text{ °C/W}$$

O con la placa de cobre de 5.2 mm:

$$R_{th\_COBRE} = 0.485 \text{ °C/W}$$

Comprobamos que el efecto conductivo en la simulación es despreciable.

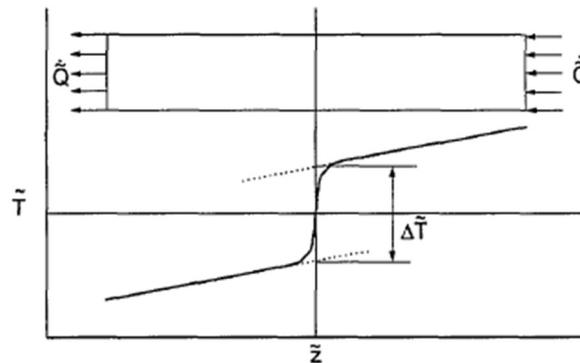
Este efecto es despreciable si el material TIM está adecuadamente montado, por lo tanto, en las uniones hay un contacto perfecto. Si el contacto no es perfecto hay que analizar la influencia de la geometría de contacto en la resistencia térmica de contacto.

Según (GRANDE, 2000) para cuantificar macroscópicamente esta resistencia se define el coeficiente  $h_c$ , denominado conductancia térmica de contacto. Para ello, se estudia el contacto estacionario entre dos barras suficientemente largas como para que el flujo de calor en sus extremos sea unidimensional, definiéndose  $h_c$  como el cociente entre el flujo de calor en los extremos ( $Q/A$ ) y el salto de temperatura que se observaría en el plano de la unión al prolongar la distribución lineal de temperatura de la zona no perturbada (lejos del contacto) hasta dicho plano de contacto ( $\Delta T$ ).

En la Ilustración 24 se ilustra cómo se mide este salto. Por tanto, matemáticamente la conductancia de contacto se expresa como:

$$h_c = \frac{Q}{A \cdot \Delta T}$$

*Ecuación 3*



*Ilustración 24 Esquema para definir la conductancia de contacto (Obtenido de: (GRANDE, 2000))*

## 6.5 Ventiladores

El fabricante nos da directamente el valor de la resistencia térmica del conjunto ventilador-disipador de calor. Por tanto, fácilmente podemos conocer la potencia en función de la temperatura en el interior del disipador de calor. El fabricante da este dato de resistencia térmica para poder considerar en el modelo un bloque con un espesor muy fino con una disipación de calor igual al inverso de la resistencia térmica por la temperatura en el interior de este bloque.

En nuestra simulación vamos a considerar un flujo de calor disipado (heat flux) en función de la temperatura en el interior de este bloque. En la figura siguiente se encuentra una representación de este flujo de calor en función de la temperatura en el interior del disipador de calor.

Por tanto, del mismo modo tendremos que ir dando valores de este flujo de calor en función de la temperatura del ventilador (temperatura en el interior del bloque).

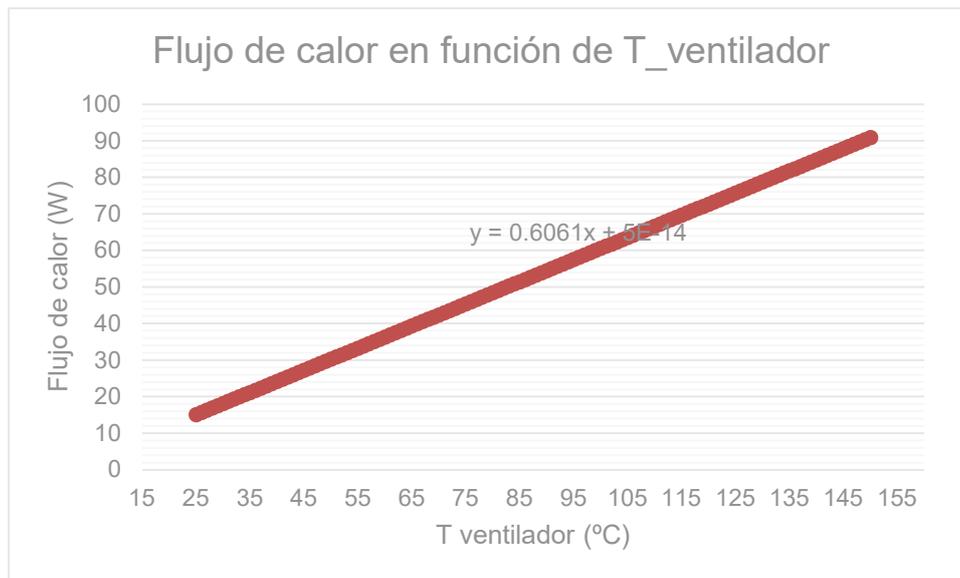


Ilustración 25 Flujo de calor del ventilador en función de la temperatura en el interior de este.

Por tanto, tenemos otra variable más con la que iterar para obtener la temperatura que puede alcanzar el transistor en su régimen de funcionamiento. Iremos dando valores de flujo de calor en función de la temperatura en el interior del ventilador (Ilustración 25) hasta que la temperatura interior del bloque en la simulación sea igual a la de la gráfica.

### 6.6 Placa del circuito impreso (PCB).

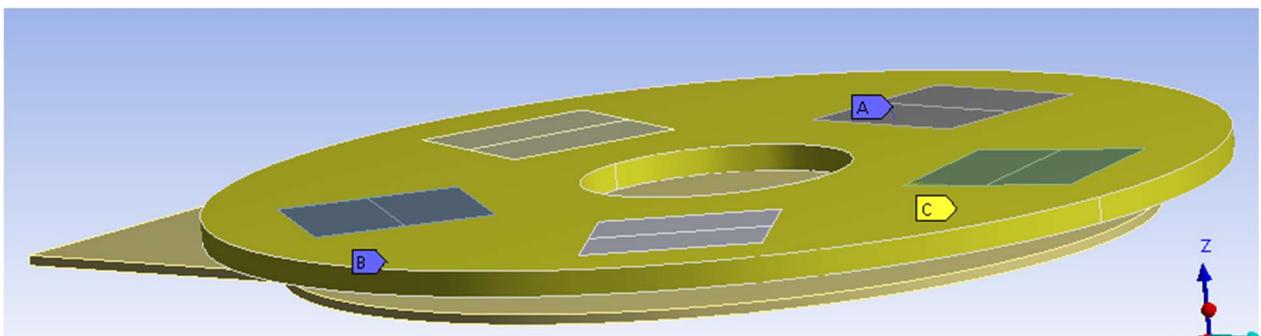
Como no se conoce con precisión las características de la placa real que se utiliza en este trabajo, ya que es el equipo constructor de la PCB quien se encarga de este tema, nos vamos a basar en algo genérico. La mayoría de los circuitos impresos están compuestos por entre una a dieciséis capas conductoras, separadas y soportadas por capas de material aislante (sustrato) laminadas (pegadas) entre sí. Normalmente, la cantidad de capas de una PCB depende de la cantidad de señales existentes.

Las resinas que se utilizan en estas placas, como la fibra de vidrio reforzada, la cerámica, el plástico, el teflón o los polímeros como la baquelita, son todas no conductoras térmicamente por tanto se ha llegado a la conclusión con el cliente que podemos despreciar la pequeña influencia térmica de la placa. Además, todavía no se conoce dónde van a estar instalados el resto de los componentes electrónicos ni las temperaturas que se pueden alcanzar, pero sí que se sabe que la influencia más grande térmicamente será la de los transistores GaN que se describen en el apartado a. Si se conoce que el espesor de la placa de PCB será de 0.5 mm.

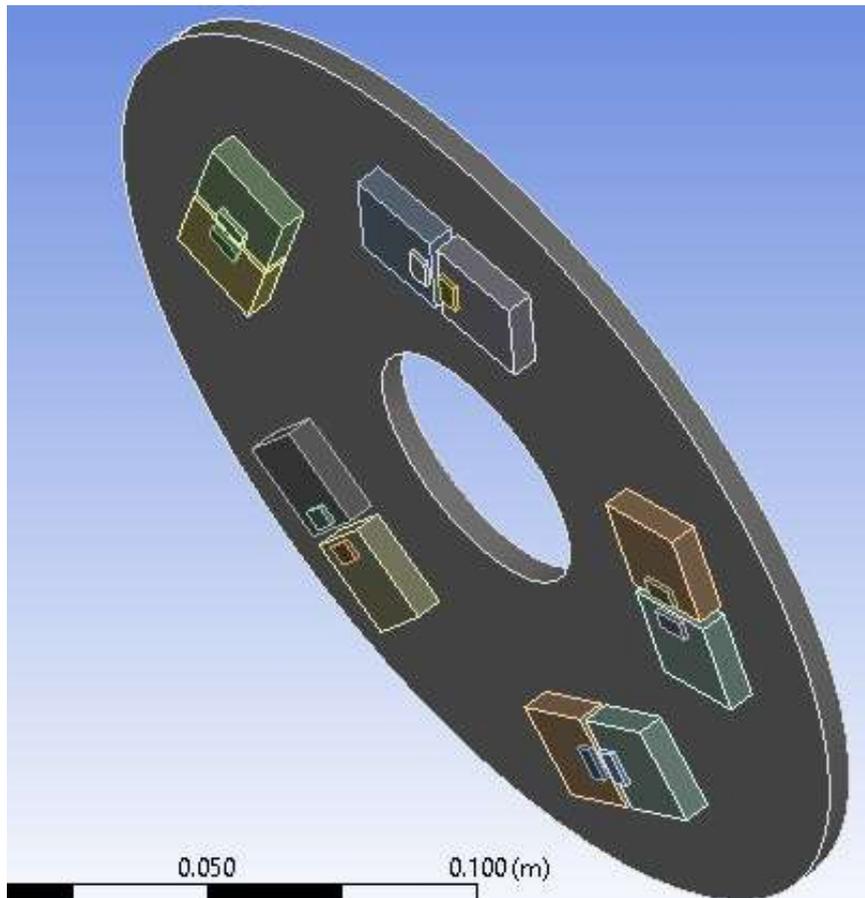
## 7 ELABORACIÓN DEL MODELO TÉRMICO.

En este apartado se va a realizar una descripción de la definición del modelo que se va a analizar a través del módulo steady-state Thermal de Ansys. Este modelo se va a realizar en estado estacionario ya que el cliente nos ha especificado un régimen de funcionamiento y condiciones medias en el tiempo. Vamos a empezar describiendo la geometría que se va a utilizar en el modelo, a continuación, vamos a describir los materiales utilizados en el modelo, el contacto entre ellos, el mallado, y por último, las condiciones térmicas introducidas en el modelo.

Como ya se sabe por lo descrito en los apartados anteriores tenemos cinco pares de disipadores de calor colocados sobre la PCB radialmente y espaciados la misma distancia (ver Ilustración 9 para el modelo mecánico y la Ilustración 26 e Ilustración 27 para el modelo térmico). Estos pares disipan el calor a través de dos placas de cobre, hasta la tapa donde se sitúa un ventilador por cada par de transistores. Se va a realizar la descripción de la disipación de calor de unos de los pares, siendo similar para el resto de los pares.



*Ilustración 26 geometría para el modelo térmico (parte superior) (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*



*Ilustración 27 Geometría para el modelo térmico (parte inferior, ocultando la placa base) (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

### 7.1 Geometría.

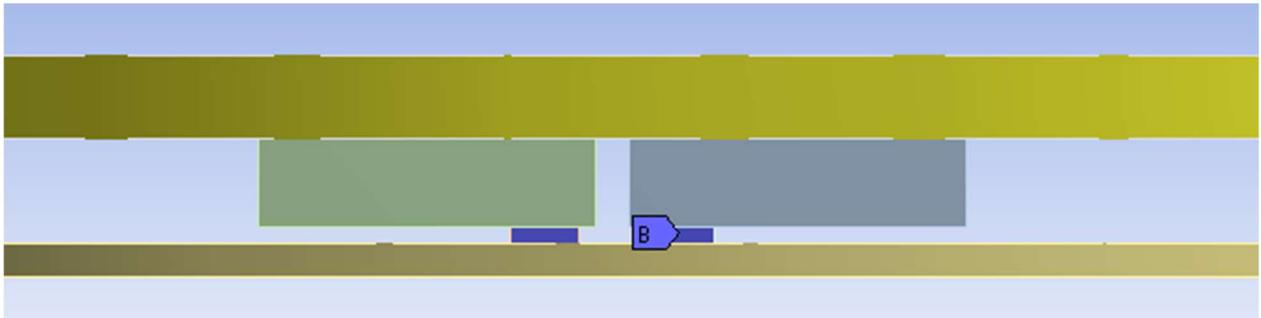
Gracias al módulo de SpaceClim de Ansys ha sido posible importar la geometría del modelo mecánico realizado en Catia. De este modo ya tenemos en Ansys las dimensiones, la orientación y posición respecto al eje de coordenadas de todos los componentes. Para tener una geometría ejecutable por Ansys ha sido necesario utilizar las distintas herramientas de Ansys para considerar cada elemento del conjunto como un cuerpo (body) independiente. También gracias a las herramientas de este módulo ha sido posible considerar las superficies como superficies planas.

La licencia educacional disponible por la universidad de Valladolid tiene un límite de cuerpos y superficies, por ello ha sido necesario eliminar los objetos del modelo mecánico que no aportan nada a la simulación térmica y simplificar los objetos de forma que den respuesta a los datos disponibles de resistencias térmicas, dimensiones y distintos parámetros que facilita cada fabricante.

En la Ilustración 28 encontramos:

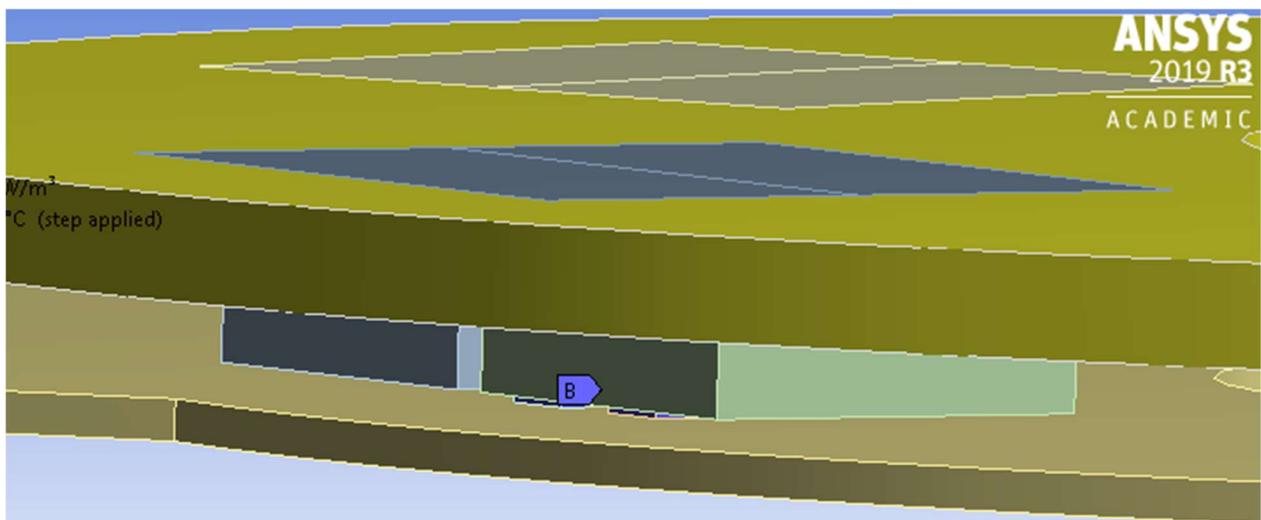
- en marrón el bloque que simula la PCB.

- en azul más oscuro los dos bloques que simulan los transistores GaN donde se genera el calor.
- por encima, dos bloques que simulan las placas conductoras de cobre.
- en verde, lo que simula la tapa metálica conductora.



*Ilustración 28 Vista frontal de la geometría del modelo térmico (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

Por encima de la tapa metálica encontramos un bloque en azul que simula el ventilador (Ilustración 29).



*Ilustración 29 Vista del conjunto del modelo térmico a analizar (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

No ha sido necesario importar la geometría del ventilador ya que, preguntando al fabricante, he conseguido saber que la resistencia térmica (que se facilita en la hoja de especificaciones, anexo II) es la resistencia térmica del conjunto ventilador y estructura de aletas.

En el modelo mecánico encontramos múltiples tornillos. Sin embargo, en el modelo térmico se decidió despreciar bajo el acuerdo con el cliente, dada la enorme complejidad para la resolución del modelo. Se considera que esta simplificación es válida ya que queremos realizar una estimación del calor disipado.

## 7.2 Materiales.

El programa permite asignar los distintos materiales a cada elemento. En la simulación se va a usar una fibra de vidrio no conductora del calor para la PCB, una aleación de cobre para las placas disipadoras y un acero estructural para la tapa metálica (Ilustración 30).

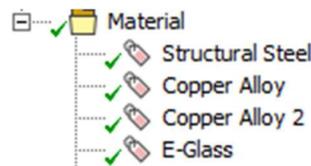


Ilustración 30 materiales en la simulación.

Por defecto, estos llevan asignadas todas sus propiedades tanto térmicas como mecánicas pudiendo ser estas modificadas. Estas se encuentran en la parte de engineering data del programa.

## 7.3 Parámetros y características necesarias para definir y resolver el modelo térmico .

En la Ilustración 31 encontramos el conjunto de parámetros que se han introducido en el programa. Encontramos tanto parámetros de entrada como los valores obtenidos:

- La generación interna de calor de los dos transistores.
- La temperatura  $T_j$  de cada transistor. Esta no es una condición, sino una solución de la simulación.
- El flujo disipado por los ventiladores.
- La temperatura  $T_{\text{ventilador}}$  de cada ventilador del conjunto. De igual modo esta no es una condición, sino una solución de la simulación.
- La convección alrededor de nuestro sistema. Uno de los objetivos será ver su influencia al aumentar y disminuir el coeficiente de transferencia de calor.

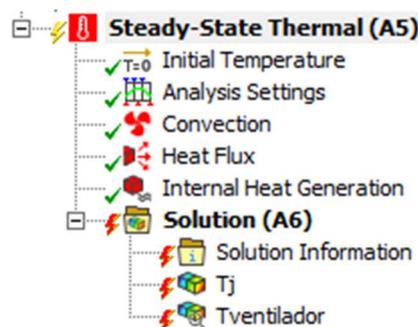


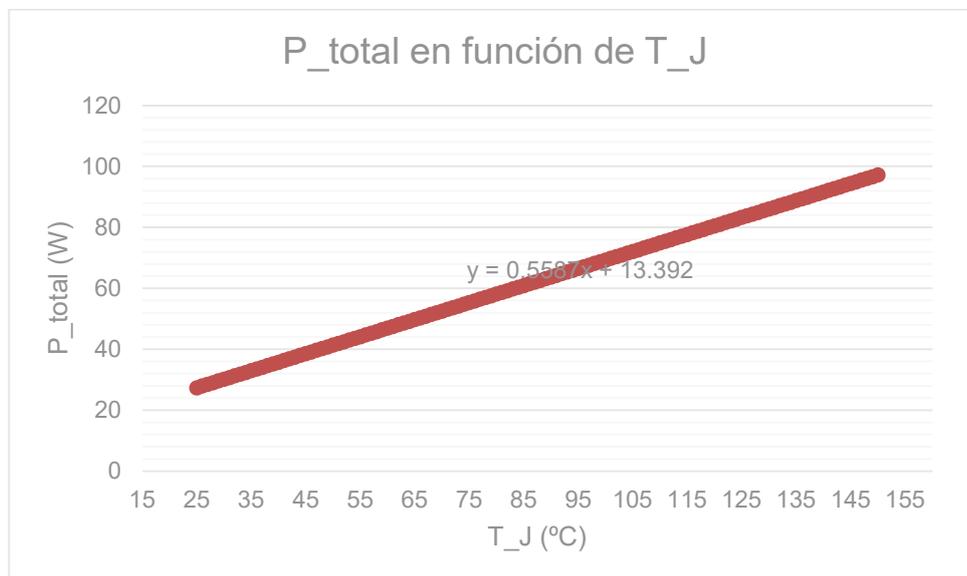
Ilustración 31 Conjunto de condiciones del modelo térmico.

### Generación interna de calor y temperatura de los transistores.

La primera condición es la generación interna de calor en los dos GaN. Esta generación interna de calor se introduce en  $W/m^3$ . Por lo descrito en la justificación del modelo a través de la Ecuación 2 sabemos que las pérdidas son iguales a:

$$P_{Total} = I_{DS}^2 \cdot R_{DS(on)} \cdot D \cdot 1/V \quad (W/m^3)$$

En la justificación del modelo se ha definido el ciclo de operación del 100%, la corriente de drenaje ( $I_{DS}$ ) de 60 A y el volumen del GaN de  $28 \text{ mm}^3$ . También se especificaron los valores de la resistencia de drenaje ( $R_{DS}$ ) y la temperatura  $T_J$ . Por tanto, fácilmente se pueden calcular los valores con los que vamos a iterar en el modelo.



*Ilustración 32 Generación de calor en función de la temperatura alcanzada en el transistor*

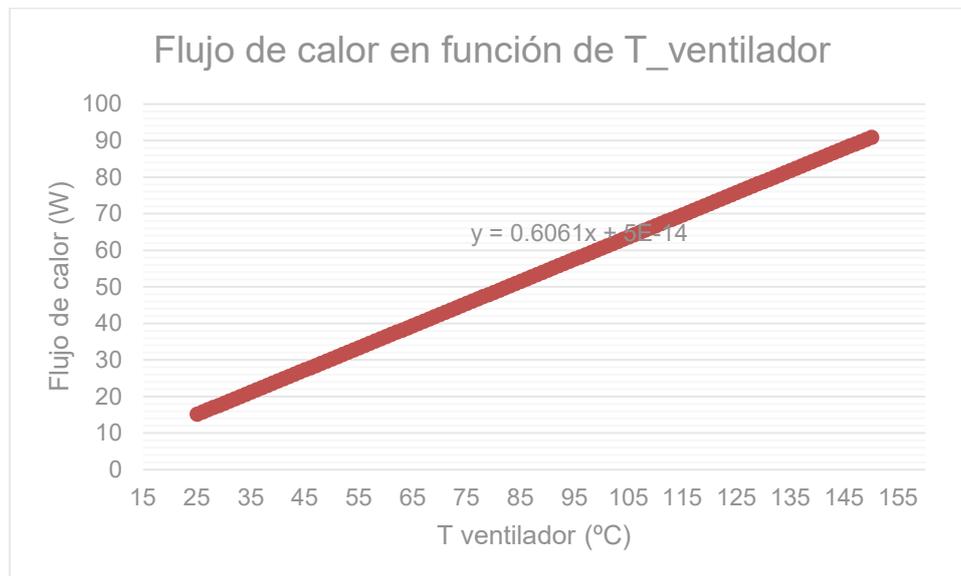
Se van a ir introduciendo distintos valores de  $P_{total}$  ( $W/m^3$ ) en la simulación hasta que la solución de la simulación de la correspondiente temperatura del transistor coincida con la temperatura de la Ilustración 32.

### Flujo disipado por los ventiladores y la temperatura en el interior de estos.

El flujo disipado de calor se introduce en  $W/m^2$ . Por lo descrito en la justificación del modelo sabemos que este flujo será igual a:

$$F_{ventiladores} = 1/R_{th} \cdot T_{ventilador} \cdot 1/A \quad (W/m^3)$$

Según el fabricante la resistencia térmica del ventilador ( $R_{th}$ ) es igual a de 1.65 ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ) como se observa en el anexo II. El área de disipación de calor por la geometría del elemento consideramos 1225 mm<sup>2</sup> (también recogido en el anexo II). Fácilmente obtenemos el flujo disipado en función de la temperatura:



*Ilustración 33 Flujo de calor disipado en función de la temperatura alcanzada en el ventilador*

De igual modo iremos introduciendo en la simulación los distintos valores del flujo de calor disipado hasta que la temperatura del ventilador en la simulación coincida con la correspondiente temperatura de la Ilustración 33.

Por tanto, para llegar a la determinación de la posibilidad de disipar las pérdidas de calor de los transistores se irán introduciendo distintos valores de flujo de calor interno generado y flujo disipado por el ventilador hasta que ambos flujos coincidan con las correspondientes temperaturas calculadas en la Ilustración 32 y la Ilustración 33.

### **Convección natural.**

Consideramos una convección natural con un coeficiente de 11 W/m<sup>2</sup>· $^{\circ}\text{C}$  en la tapa de acero del conjunto y de 2 W/m<sup>2</sup>· $^{\circ}\text{C}$  para los transistores y disipadores de cobre. Se llega a esta conclusión ya que los valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección libre con un gas suelen estar entre 2-25 (W/m<sup>2</sup>·K) según (Transparencias, Universidad Politécnica de Valencia, convección, pág. 5). De este modo, tratamos de ponernos en un caso desfavorable. La convección en la parte cercana a la placa donde el aire va a circular con mayor dificultad, la convección es la mínima que se suele dar en la convección natural con gases. En la tapa la convección natural es algo superior ya que el aire podrá circular con mayor facilidad, pero sigue siendo inferior al valor medio de la convección libre que se suele dar en los gases.

## 7.4 Contactos

El programa permite asignar los distintos contactos entre los componentes. En la Ilustración 34 se observa el contacto entre el transistor GaN y la placa de cobre.

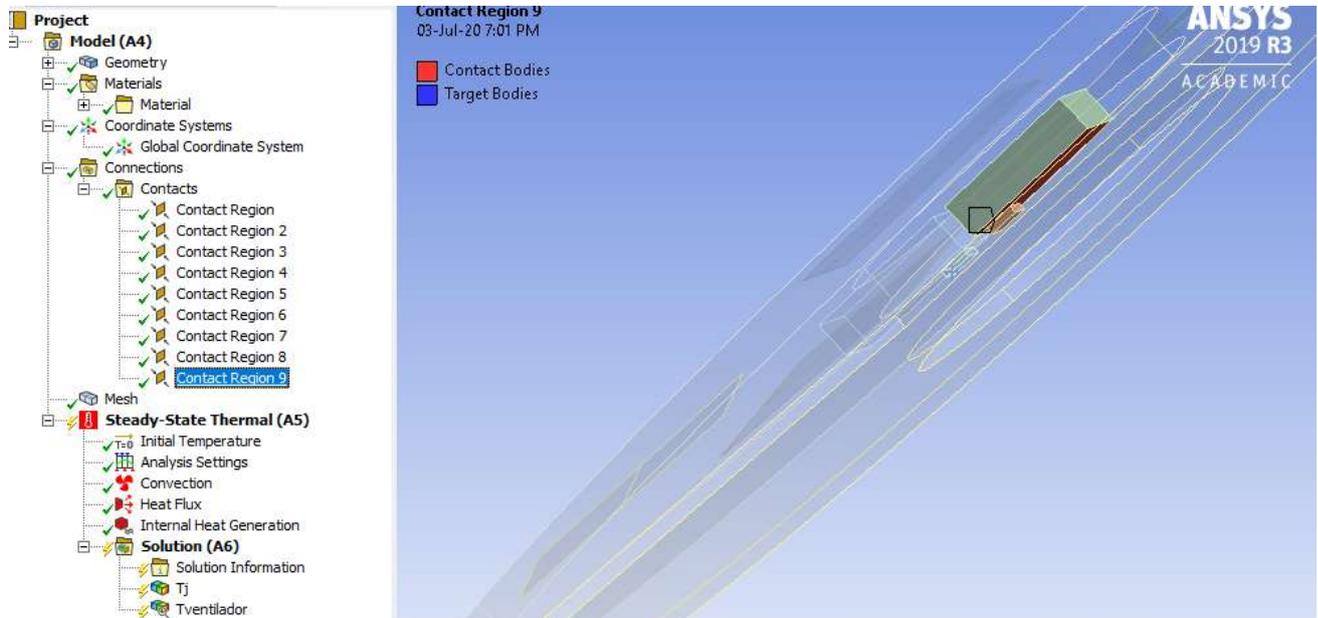


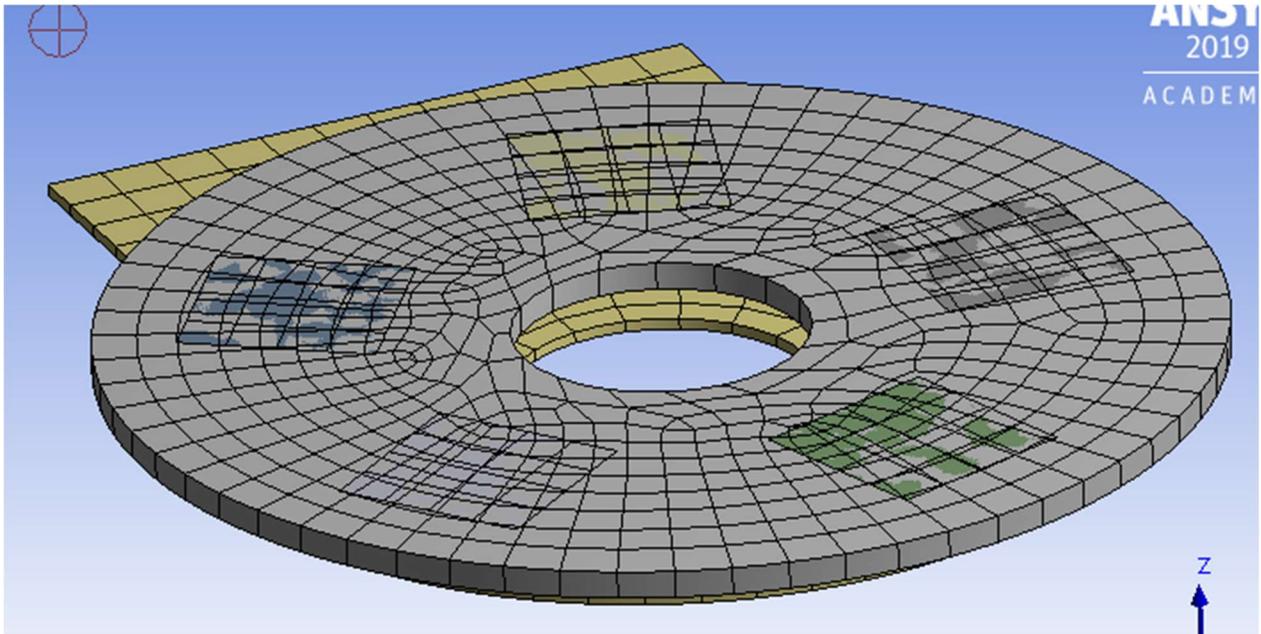
Ilustración 34 Contacto entre el transistor GaN y la placa de cobre (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).

Los 10 contactos generados permiten que el programa interprete que el calor generado en los transistores se va a disipar a través de la placa de cobre conductora, y esta a su vez en contacto con la placa metálica de la estructura que va a conducir el calor hasta que se disipe en los ventiladores. En total para todo el conjunto son necesarios 36 contactos.

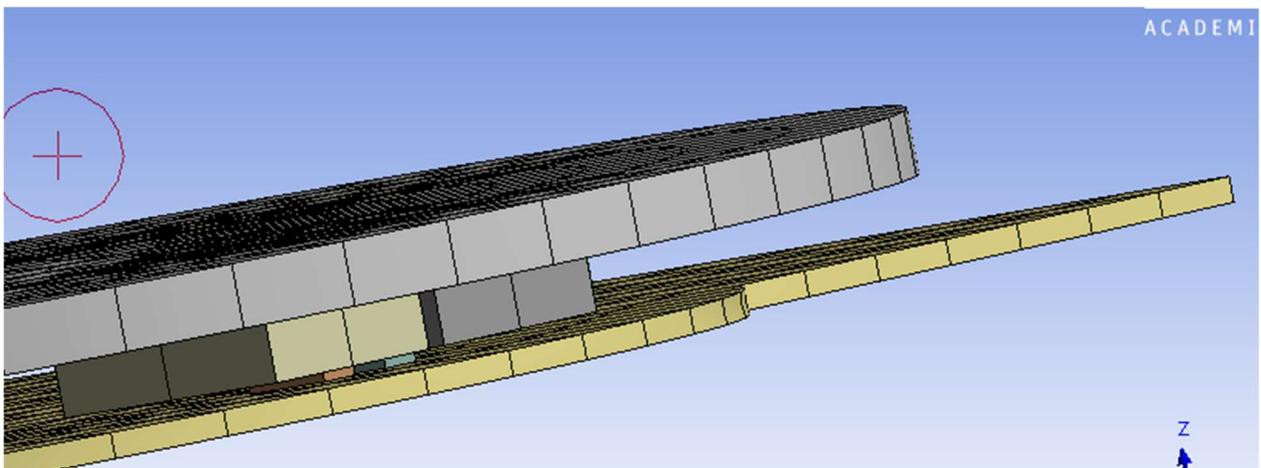
Los contactos nos van a permitir observar qué ocurre si dos componentes dejan de estar completamente en contacto. Ansys permite dar un valor de conductancia térmica a este contacto. En el apartado de justificación del modelo térmico se analiza la influencia de la geometría del contacto en la resistencia térmica de contacto.

## 7.5 mallado

Se intentó optar por el tipo de mallado generado automáticamente por el programa donde teníamos un tamaño de elemento de  $3.8406 \cdot 10^{-3}$  m. Al realizar las simulaciones se detectó un error donde se tuvo que aumentar el tamaño de cada elemento a 0.01 m. Este se observa en la Ilustración 35 y la Ilustración 36.



*Ilustración 35 mallado del conjunto (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*



*Ilustración 36 mallado de la placa PCB, transistores y disipadores (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

La causa del error producido es simplemente que la versión educacional utilizada no soporta un número mayor de elementos.

## 8 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO TÉRMICO.

En este apartado se van a describir los resultados obtenidos, así como la influencia al variar los distintos parámetros. También se van a realizar distintas hipótesis para observar lo que pasaría si los materiales no tuviesen un contacto ideal o si algún ventilador dejara de funcionar.

Cabe recordar que el objetivo de este análisis es comprobar que el calor generado por los transistores se puede disipar. Es por ello que primero nos vamos a poner en un caso para un régimen de funcionamiento normal y posteriormente realizaremos distintos casos fuera de la normalidad.

### 8.1 Caso de funcionamiento perfecto en condiciones extremas.

Como ya sabemos gracias a lo descrito en los apartados anteriores, el principal problema por el que se pudiera dar la posibilidad de no disipar el calor generado por los transistores es que esta generación de calor sea demasiado alta.

En un primer instante, tal y como se describió en la parte de definición del modelo nos ponemos en un caso de régimen de funcionamiento con una corriente de drenaje ( $I_{DS}$ ) de 60 A (un caso demasiado extremo).

Analizando en la simulación la correspondiente generación interna de calor se comprueba como el sistema no es capaz de disipar el calor generado. Mediante la interacción que se debe realizar, descrita en los apartados anteriores, no se logra converger en temperaturas inferiores al límite de funcionamiento del transistor.

Por tanto, ya se obtiene el primer dato relevante para el cliente. Los transistores no pueden trabajar durante un periodo de tiempo relativamente largo con una corriente de drenaje de 60 A. Esto fue algo esperado ya que es un régimen de funcionamiento demasiado extremo. Si observamos las figuras 3 y 4 del anexo II (Ilustración 37) vemos como a partir de 40 A la resistencia de drenaje aumenta drásticamente. Si la resistencia de drenaje aumenta, aumenta la temperatura del transistor y el calor generado. Sin hacer esta simulación el equipo constructor de la PCB ya sabe que debe diseñarla de forma que los transistores trabajen a una corriente de drenaje inferior a 40 A tal y como se observa en la Ilustración 37 sacadas del anexo I.

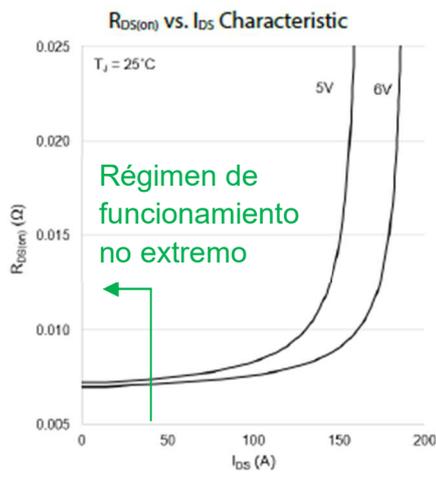


Figure 3:  $R_{DS(on)}$  vs.  $I_{DS}$  at  $T_J = 25^\circ\text{C}$

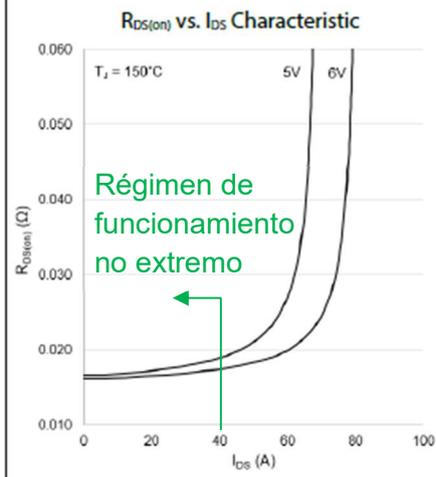


Figure 4:  $R_{DS(on)}$  vs.  $I_{DS}$  at  $T_J = 150^\circ\text{C}$

Ilustración 37 Régimen de funcionamiento de los transistores (Obtenido de: obtenidas de: (Inc, 2009))

## 8.2 Caso de funcionamiento perfecto en las condiciones donde el transistor trabaja en un régimen donde la temperatura alcanzada en él es inferior a la temperatura máxima.

En cambio, para un régimen de funcionamiento con una corriente de drenaje de 40 A se demuestra que el calor generado por los transistores si puede ser disipado. Con 40 A aplicando lo justificado en dicho apartado tenemos una generación de calor de  $657.89 \cdot 10^6$  W/m<sup>3</sup>. Lo que provoca que el transistor se encuentre con una temperatura de la unión aproximada de 68 °C tal y como se observa en la Ilustración 38.

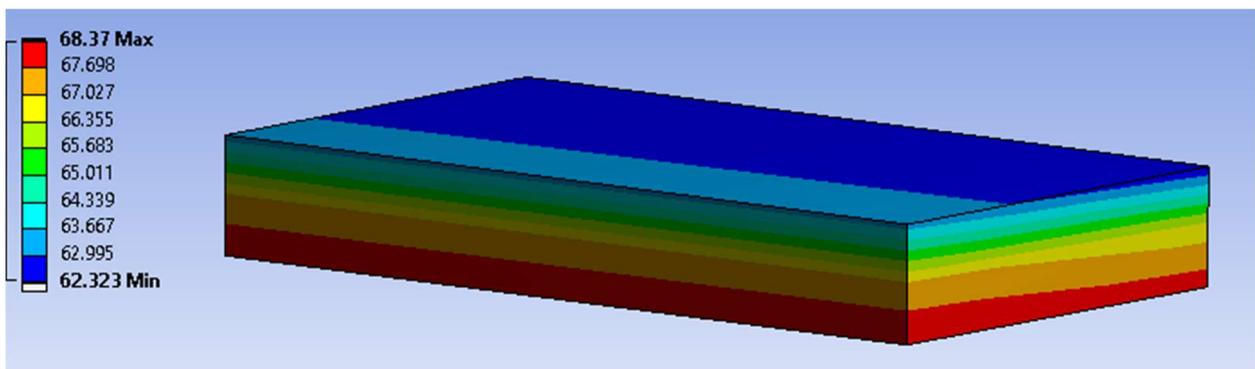


Ilustración 38 Temperatura alcanzada en el transistor.

Siendo el flujo disipado por el ventilador de  $28.20 \cdot 10^3$  W/m<sup>2</sup>. En el ventilador vamos a tener una temperatura media de 56°C tal y como se obtiene en la Ilustración 39.

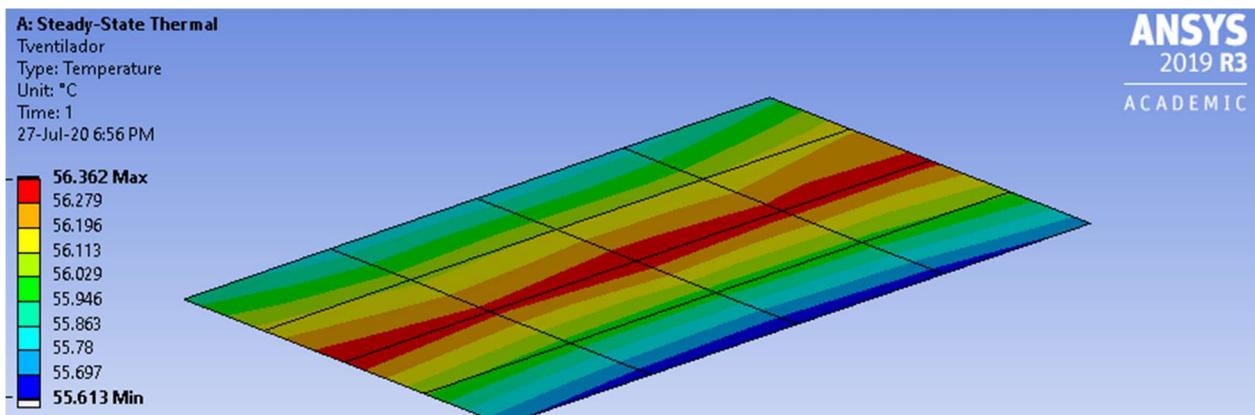


Ilustración 39 temperatura alcanzada en el ventilador.

Se recuerda que esta distribución de calor no es del todo cierta. Si quisiéramos realizar este análisis de forma precisa observaríamos como la distribución de calor en el ventilador se adapta a las leyes de la fluidomecánica y la termodinámica. De igual modo si el transistor en vez de ser diseñado como un bloque, se diseñara cada capa descrita en la parte de justificación, veríamos la temperatura exacta de la unión además de la temperatura de los distintos puntos del transistor. Realizar el análisis de ese modo quedaría fuera de lo especificado por el cliente y del volumen de un trabajo de fin de master.

Por tanto, queda demostrado que el sistema es capaz de disipar el calor para unas condiciones esperadas de funcionamiento límites. Considerando límite el régimen de

funcionamiento más alto esperado por el equipo diseñador de la placa PCB. Queda demostrado que será muy peligroso si el transistor funciona con una corriente de drenaje superior a 40 A durante un periodo relativamente largo de tiempo. Dicho de otro modo, el régimen de funcionamiento medio en el tiempo debe estar por debajo de los 40 A. Si se trabaja por debajo de los 40 A por lo mostrado en la Ilustración 37 y en el apartado anterior, las pérdidas de calor siempre van a ser inferiores. Por tanto, va a ser necesario disipar menos calor y la temperatura en la capsula del transistor, en la unión y en los ventiladores va a ser inferior.

A continuación, hablaremos también del resto de condiciones demostrando que están también dentro de un límite desfavorable para este caso. Lo que permite justificar que, si bajo unas condiciones límites el sistema es capaz de disipar el calor, en casos menos desfavorables también será posible.

Se recuerda que estos resultados han sido obtenidos realizando las distintas iteraciones descritas en la justificación del modelo térmico.

### 8.3 Influencia de los distintos parámetros.

#### Conductividad de los transistores.

En la parte de justificación del modelo veíamos como quedan definidas las distintas resistencias térmicas entre las partes de un transistor. Se dijo que la resistencia térmica es principalmente una función de las propiedades térmicas de los materiales que constituyen el conjunto. Se ha tratado de asignar una conductividad térmica a cada transistor de forma que la temperatura entre la unión y la capsula sea lo más real posible.

Se vio como la resistencia térmica queda definida por la Ecuación 1:

$$\theta_{JC} = (T_J - T_c)/P_d$$

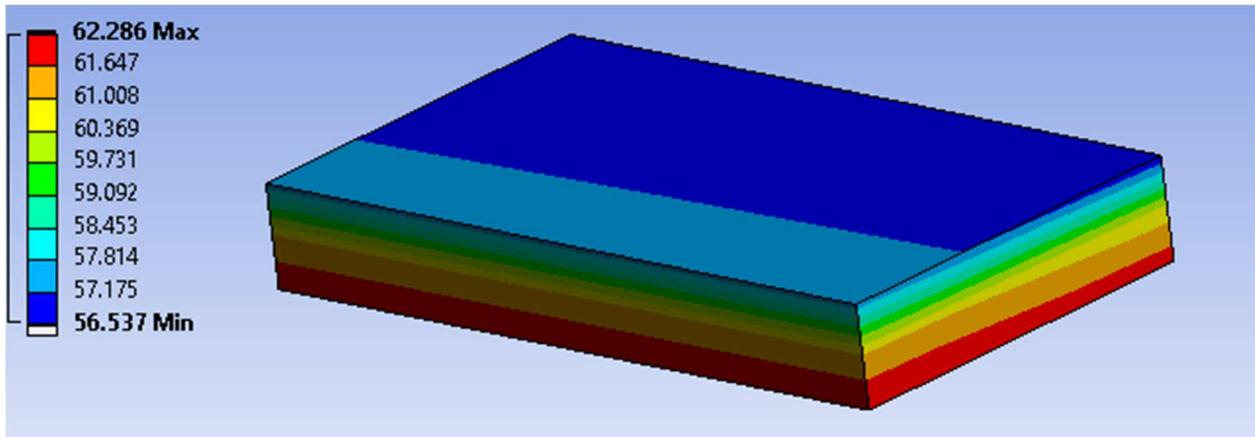
Si tomamos el valor de  $P_d$  (disipación de energía) igual a las pérdidas de calor del transistor, tenemos 17.077 W. En el anexo II, en las características del transistor encontramos 0.55 °C/W como resistencia térmica entre la unión y la capsula. Aplicando la formula vemos como la temperatura entre la unión y la capsula debe ser de 9.39 °C. En las simulaciones vemos como la diferencia máxima de temperatura del transistor es de aproximadamente entre 6 y 9 °C. Por tanto, se puede decir que la consideración de conductividad media de los distintos materiales en el conjunto es válida. Si le damos una conductividad más alta, similar a la del cobre la diferencia de temperatura máxima entre los distintos puntos del transistor es lógicamente menor, pero los resultados de la temperatura que se alcanza en el transistor y flujo disipado son prácticamente similares.

#### Convección natural.

Realizando varias pruebas se ha podido comprobar como la convección natural si tiene una influencia importante sobre el calor total disipado. Como se describía en la definición del modelo nos hemos puesto en un caso desfavorable, pero ¿qué ocurriría si el coeficiente de convección natural fuera mayor?

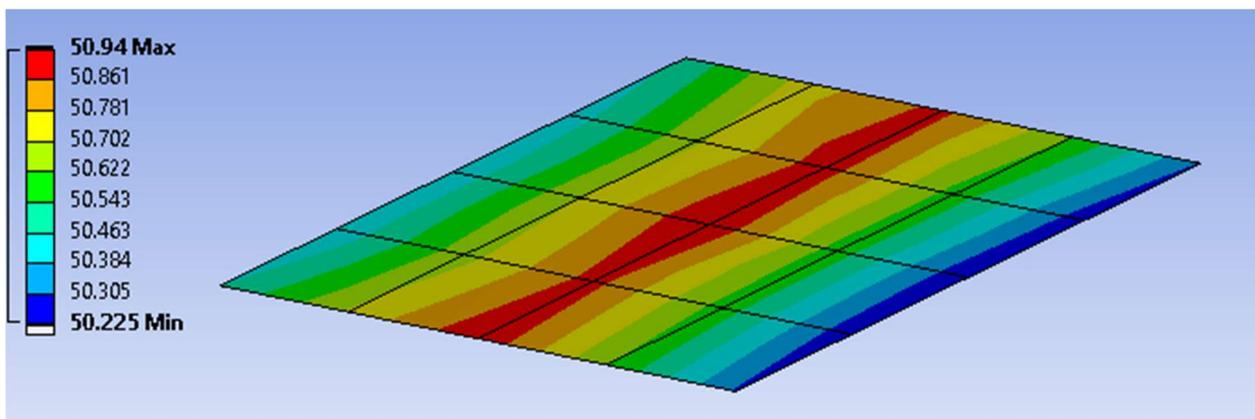
Si tomamos 10 W/m<sup>2</sup>·°C como coeficiente de convección natural en las superficies del transistor y los disipadores de cobre; y 24 W/m<sup>2</sup>·°C para las superficies de la tapa vemos como la temperatura del transistor disminuye y el sistema tiene menor dificultad para disipar el calor generado.

La temperatura del transistor en la unión alcanza los 62°C tal y como se observa en la Ilustración 40



*Ilustración 40 Temperatura del transistor con mejores condiciones de convección natural*

De igual modo la temperatura del ventilador disminuye hasta los 51°C como se observa en la Ilustración 41.



*Ilustración 41 Temperatura del ventilador con mejores condiciones de convección natural*

Las pérdidas de calor del transistor serán de  $625.89 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$  y el flujo disipado por el ventilador de  $25.73 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ .

Aunque la influencia de variar el parámetro del coeficiente de película sea alta, al ponernos en un caso desfavorable comprobamos la veracidad y fiabilidad de nuestros resultados.

#### 8.4 Caso donde el material TIM no cumpliera su función o el transistor GaN no tuviera un contacto perfecto con la placa de cobre.

Como se ha descrito en los apartados anteriores el material TIM juega un papel importante dentro del modelo. Se puede dar la posibilidad de que el material TIM no se monte adecuadamente y este no cumpla su función. También puede ocurrir que las barras de presión descritas en el apartado de búsqueda de soluciones no estén montadas adecuadamente. Aquí se va a analizar esa influencia.

Vamos a poner un caso donde el material TIM de todos los elementos de unión no está montado adecuadamente y se presenta la misma resistencia térmica para todas las uniones. Tal y como se describió en el apartado de la definición del modelo se va a imponer una conductancia térmica en la unión. Se observa en la simulación como a partir de una conductancia térmica de  $10 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  empiezan a diferir los resultados. Vamos a imponer un caso donde la conductancia térmica sea un 3.45 % respecto al caso perfecto. Es decir, en los contactos vamos a tener una conductancia de  $34500 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

Para este caso presentamos una generación de calor de  $1041.87 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$ . Lo que provoca que el transistor se encuentre con una temperatura de la unión aproximada de  $140^\circ\text{C}$  tal y como se observa en la Ilustración 42.

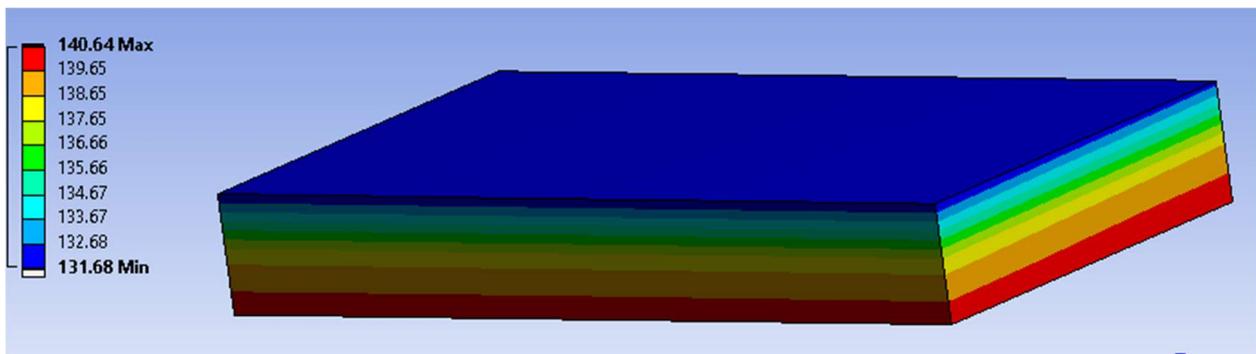


Ilustración 42 Temperatura alcanzada en el transistor para el caso de mal funcionamiento del material TIM.

Siendo el flujo disipado por el ventilador de  $42.053 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ . En el ventilador vamos a tener una temperatura media de  $89^\circ\text{C}$  tal y como se obtiene en la Ilustración 43.

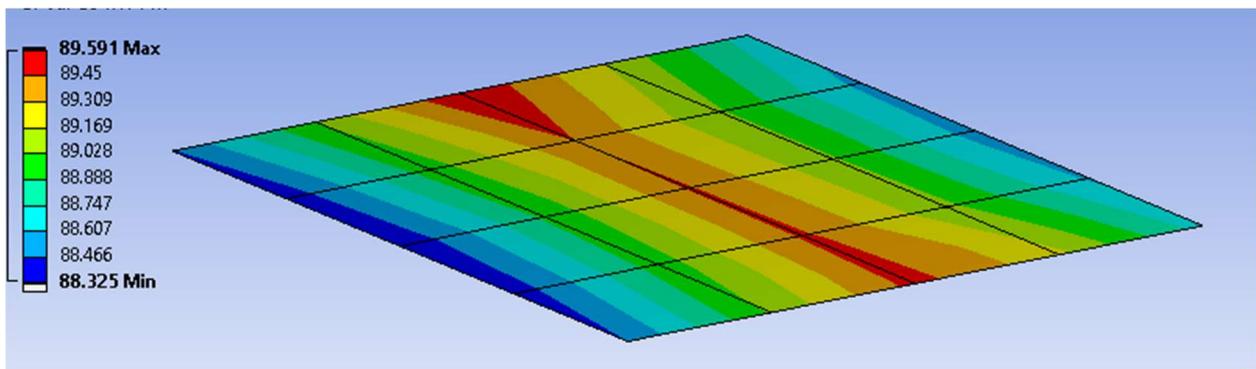
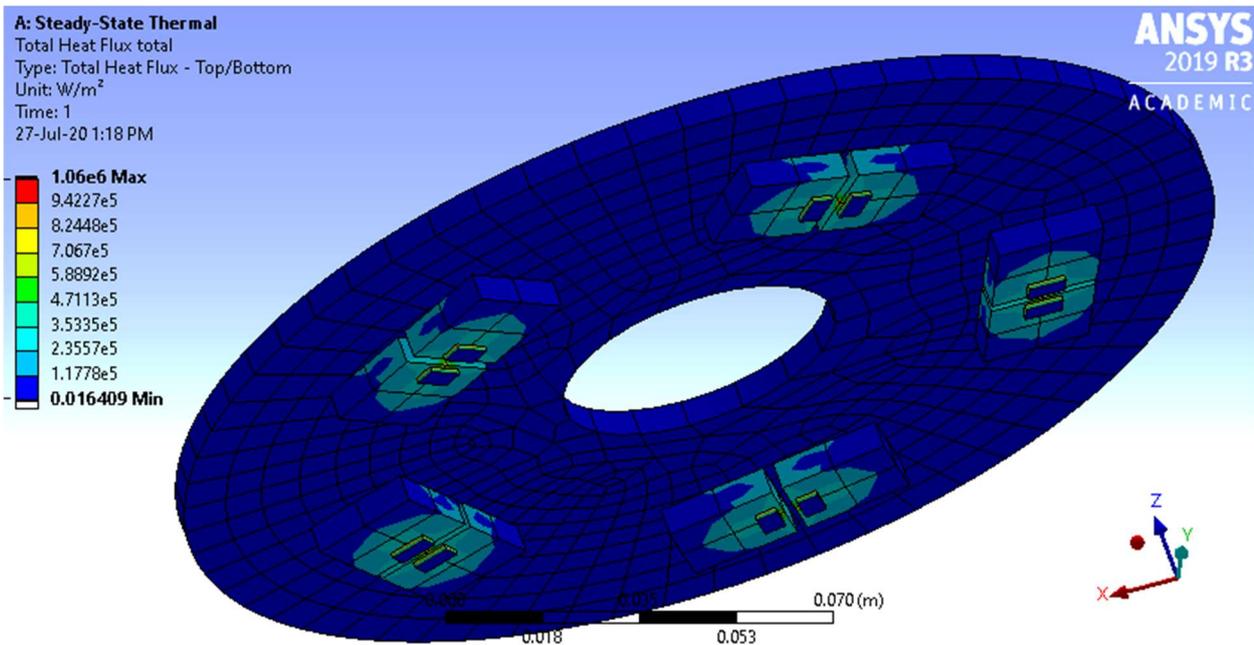


Ilustración 43 temperatura alcanzada en el ventilador para el caso de mal funcionamiento del material TIM..

Para traducir estos resultados y ver lo que implican usamos la Ecuación 3 de la conductividad térmica que se definió en el apartado de la justificación del modelo. Se va a calcular el área de contacto

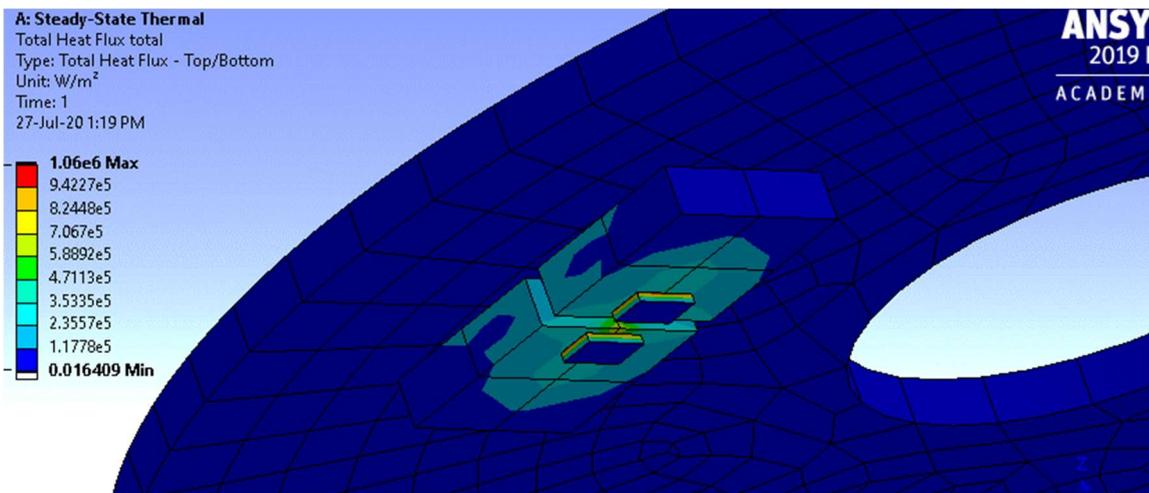
$$A = \frac{Q}{h_c \cdot \Delta T}$$

La distribución del flujo de calor es la mostrada en la Ilustración 44.



*Ilustración 44 Distribución de flujo de calor para el caso en el que el material TIM no cumple su función.*

El flujo de calor máximo en el transistor es de  $1.06 \cdot 10^6$  W/m<sup>2</sup> como se observa en la Ilustración 45.



*Ilustración 45 Distribución del flujo de calor en los transistores para el caso en el que el material TIM no cumple su función.*



Sabemos que la superficie total de intercambio del transistor es  $2.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$  y el salto de temperatura que se observaría en el plano de la unión al prolongar la distribución lineal de temperatura de la zona no perturbada es de  $51 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Por tanto, el área de contacto se reduciría a  $1.686 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ . Si el área de contacto real es inferior al valor obtenido, en los transistores se alcanzaría una temperatura superior, lo cual no se desea como se ha descrito anteriormente.

### 8.5 Caso donde uno de los ventiladores dejara de funcionar.

Como se ha descrito en los apartados anteriores se puede dar la posibilidad de que uno de los ventiladores deje de funcionar. Aquí se va a analizar esa influencia.

Se va a analizar un caso donde solo uno de los ventiladores es el que deja de funcionar y el contacto entre los distintos elementos es el correcto. En este caso se plantea la hipótesis en la que los transistores cuyo ventilador asociado funciona correctamente tienen las mismas pérdidas y la misma temperatura independientemente de su posición. Se van a analizar, por tanto:

- Las pérdidas y temperaturas de los dos transistores cuyo ventilador asociado no funciona correctamente.
- Las pérdidas y temperaturas de los ocho transistores cuyos ventiladores asociados sí funcionan adecuadamente.
- El flujo disipado y la temperatura en los ventiladores que funcionan correctamente.
- La temperatura del ventilador que funciona correctamente.

La temperatura que se alcanza en la unión en los transistores cuyo ventilador asociado no funciona correctamente es de  $150^{\circ}\text{C}$ , obteniéndose unas pérdidas de calor de  $1073.87 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$ , como se observa en la Ilustración 46.

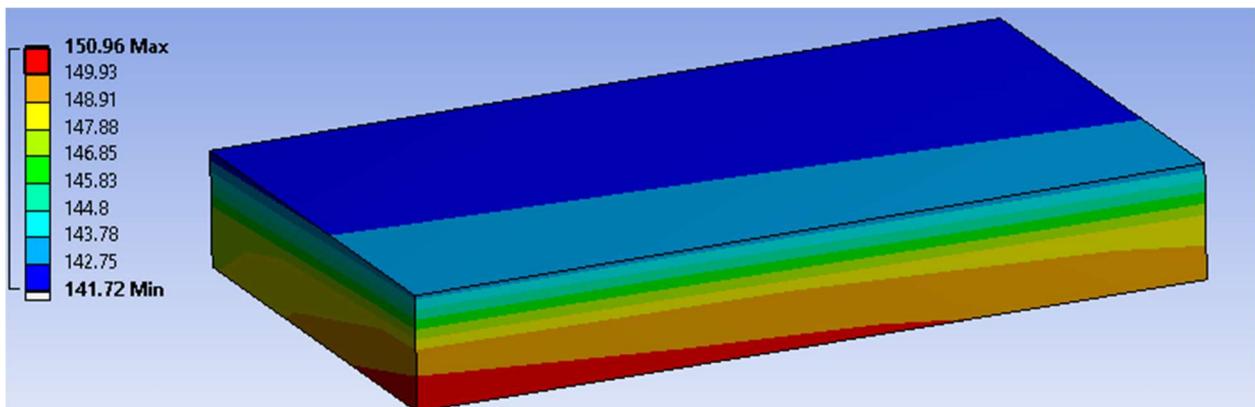


Ilustración 46 Temperatura que se alcanza en los transistores cuyo ventilador asociado no funciona correctamente.

La temperatura que se alcanza en la unión en los transistores cuyo ventilador asociado sí funciona correctamente es de  $101^{\circ}\text{C}$ , obteniéndose unas pérdidas de calor de  $833.88 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$ , como se observa en la Ilustración 47.

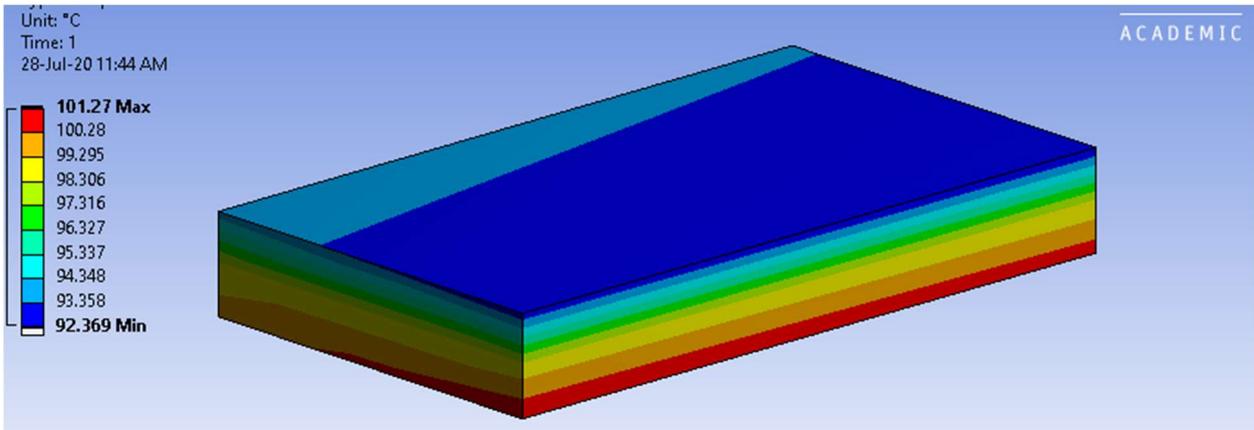


Ilustración 47 Temperatura que se alcanza en los transistores cuyo ventilador asociado si funciona correctamente

El flujo disipado por los ventiladores que si funcionan correctamente es de  $44.032 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ , siendo la temperatura que se alcanza en ellos de unos  $82 \text{ }^\circ\text{C}$ , cómo se observa en la Ilustración 48.

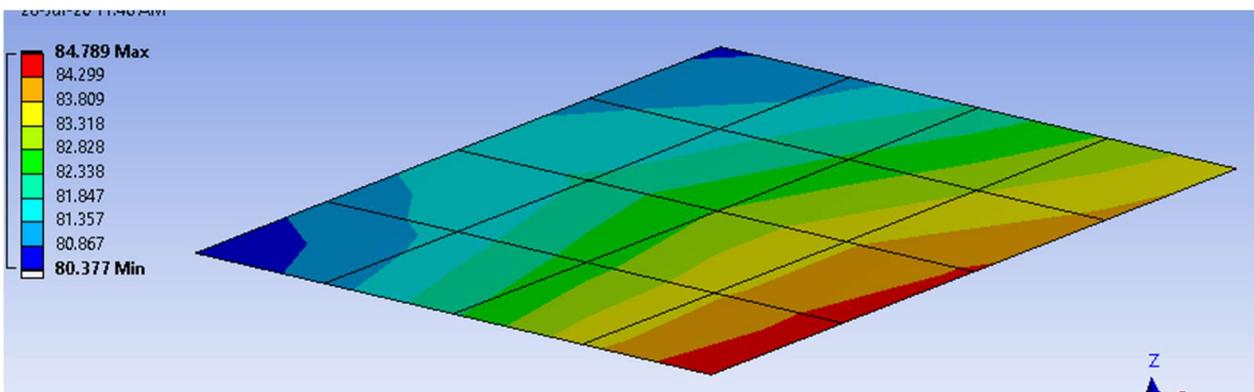


Ilustración 48 Temperatura alcanzada en los ventiladores que funcionan correctamente.

La temperatura que se alcanza en el ventilador que no funciona correctamente es  $133 \text{ }^\circ\text{C}$  tal y como se observa en la Ilustración 48.

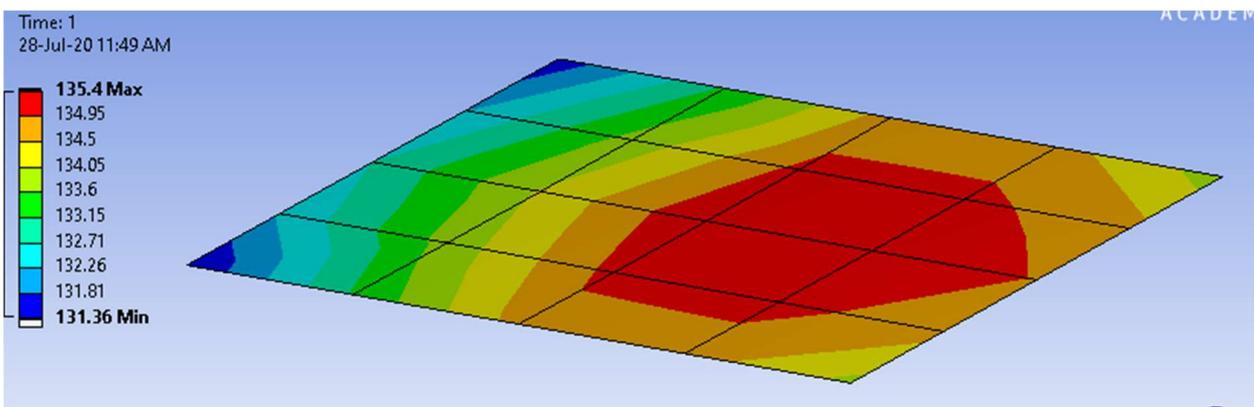


Ilustración 49 Temperatura alcanzada en los ventiladores que no funcionan correctamente.

### 8.6 Resumen de los resultados.

En la Tabla 4 encontramos un resumen de los resultados. La forma de leer la tabla es la siguiente: escoger uno de los tres regímenes de funcionamiento, en el caso de  $I_{DS} = 40$  A, escoger una de las dos opciones de condiciones convectivas. Para ese régimen de funcionamiento y condición convectiva, bajando en la misma columna se leen las distintas pérdidas y flujo de calor, además de las temperaturas en los distintos componentes según el caso.

Régimen de funcionamiento ( $I_{DS}$ )		40 A		40 A (si el material TIM está montado incorrectamente)	40 A (si un ventilador no funciona)
Condiciones convectivas	En la superficie de la tapa ( $W / m^2 \cdot ^\circ C$ )	11	24	11	11
	En la superficie del transistor y placas de cobre ( $W / m^2 \cdot ^\circ C$ )	2	10	2	2
Pérdidas de calor generadas en los transistores	En los transistores cuyos componentes contiguos tienen un buen funcionamiento en la disipación de calor ( $W/m^2$ ) $\cdot 106$	657.89	625.9	1041.87	1073.87
	En los transistores cuyos componentes contiguos no tienen un buen funcionamiento en la disipación del calor. ( $W/m^2$ ) $\cdot 106$				833.88
Flujo disipado por los ventiladores	Cuyo funcionamiento es correcto ( $W/m^2$ ) $\cdot 103$	28.20	25.73	42.05	44.032
	Cuyo funcionamiento no es correcto ( $W/m^2$ ) $\cdot 103$				0

Temperatura en la unión de los transistores	En los transistores cuyos componentes contiguos tienen un buen funcionamiento en la disipación de calor (°C)	68	62	140	101
	En los transistores cuyos componentes contiguos no tienen un buen funcionamiento en la disipación del calor. (°C)				150
Temperatura de los ventiladores	Cuyo funcionamiento es correcto (°C)	56	51	89	83
	Cuyo funcionamiento no es correcto (°C)				135

*Tabla 4 Resumen de los resultados*

Como resumen de un análisis de los resultados se puede concluir que el sistema podrá trabajar en un régimen de funcionamiento medio inferior a los 40 A alcanzándose una temperatura inferior 68 °C en la unión e inferior a los 56°C en el ventilador. No se podrá trabajar durante un periodo relativamente largo con un régimen de funcionamiento superior a los 60 A.

Este modelo térmico es fiel y permite obtener unos resultados de acuerdo con los esperados, ya que el modelo permite simular adecuadamente la generación de calor en los transistores, cómo se conduce el calor a través de los distintos materiales y cómo se disipa a través de los ventiladores.

La simplificación realizada para describir el comportamiento térmico del transistor es adecuada por lo demostrado en el apartado donde se describe la influencia de los distintos parámetros, ya que nos permite conocer la temperatura en la unión, aunque no conozcamos la temperatura de todas las capas del transistor. En este mismo apartado se demuestra como la influencia de la convección natural es importante. Dado que nosotros nos ponemos en un caso de convección natural desfavorable podemos decir que estos resultados están del lado de la seguridad.



Simulando los posibles defectos o malos funcionamientos del sistema se comprueba como al instalar un material TIM que no realiza su función correctamente el transistor alcanza una temperatura en la unión límite en relación con lo especificado por el fabricante. Del mismo modo, si falla uno de los ventiladores seguimos en el margen de lo especificado.

## 9 SOLUCIÓN PARA LA FABRICACIÓN.

En este apartado se va a dar respuesta a la última fase del proyecto. El interés de esta fase es hacer real el diseño mecánico creado para poder integrarlo en el banco de ensayo. El análisis térmico y los resultados obtenidos dan la orientación para saber el régimen de funcionamiento al cual deben realizarse los test en el banco de ensayo.

De las piezas que se tienen que hacer, dos de ellas son más complejas que las otras. Las piezas más complejas son la estructura metálica y la tapa. Estas dos piezas se mecanizarán con los medios de la escuela francesa. La descripción de este apartado viene acompañada de los croquis de las piezas en el anexo III. Son unos croquis donde se incluyen ciertas dimensiones y comentarios.

### 9.1 Piezas complejas

Se comenzó haciendo el programa de mecanizado usando TopSolid. No conocía el software antes del inicio del proyecto, pero gracias a los conocimientos de otros programas de CAD fue posible aprender a usar el software a la vez que lo utilizaba. También se contó con la ayuda de un profesor del departamento de fabricación de la escuela francesa, Ph.D LEPOIVRE, y un técnico a quien me gustaría agradecer el tiempo dedicado.

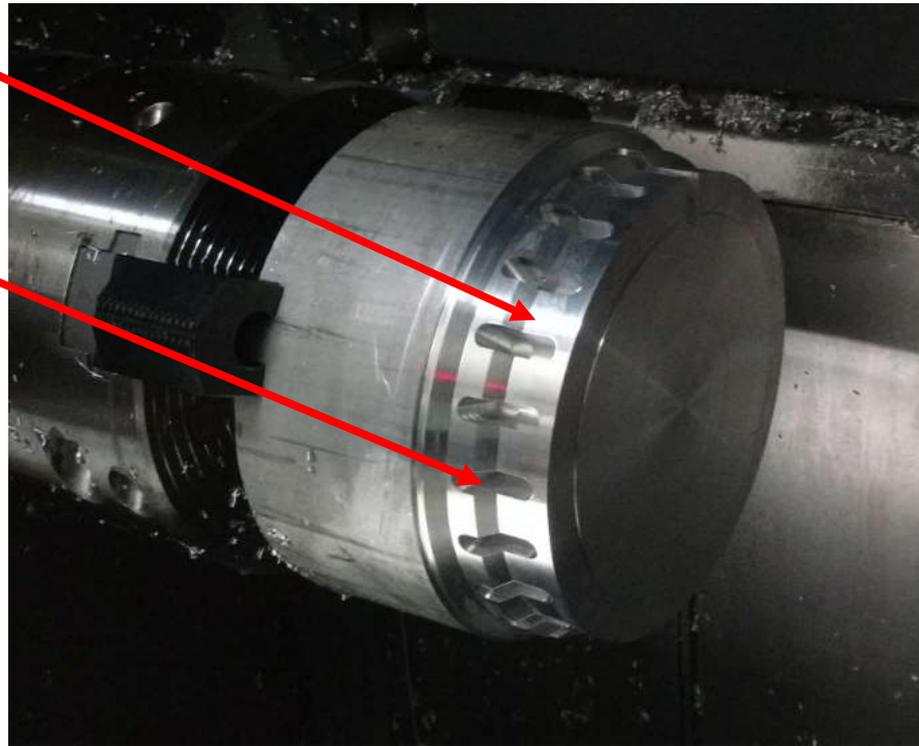
#### Estructura metálica:

Para hacer la estructura metálica, se partió de un aluminio de 220mm y 102mm de largo. Primero, se eligieron las mordazas comprobando el buen tamaño para poder fabricar las dos estructuras metálicas usando el mismo crudo. Se realizaron las siguientes operaciones (Ilustración 50 Fabricación de la estructura metálica, primera etapa en tornollustración 50) :

- Torneado exterior.
- Refrentado y acabado superficial.
- Fresado de las ranuras y la ventana.

Torneado y  
refrentado

Fresado de las  
ranuras



*Ilustración 50 Fabricación de la estructura metálica, primera etapa en torno (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

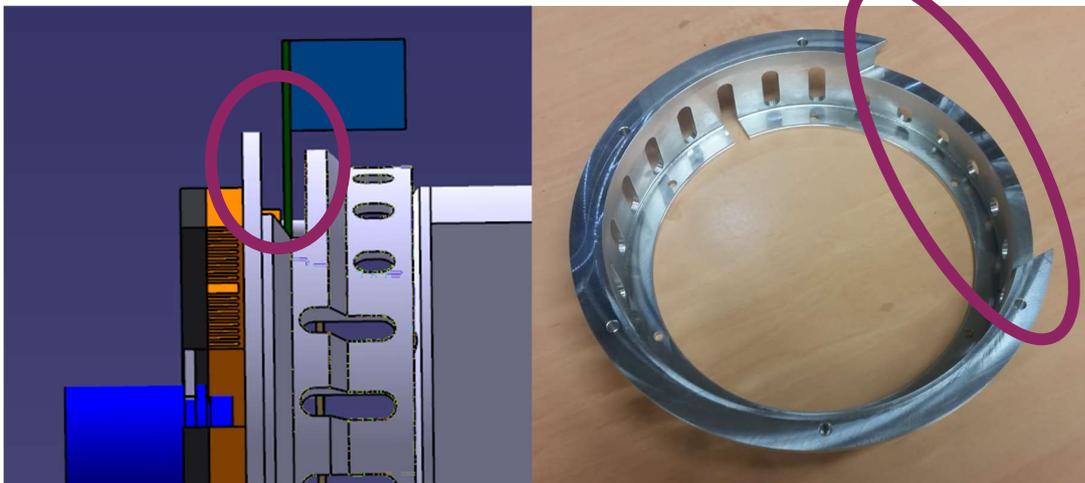
El torneado y el acabado superficial son dos operaciones para las que no se ha tenido ninguna dificultad. El fresado, por otro lado, llevado a cabo con el torno, fue más complicado. Las dificultades que se tuvieron fueron con TOPSOLID para definir la repetición de ranuras. Se resolvieron mediante la creación de bocetos en un plano en el eje de la pieza con el fin de repetirlos para crear cada ranura. Es importante remarcar que no se puede realizar la repetición usando como parámetro un ángulo negativo, porque se produce un problema de lectura en el torno. El problema está en que el torno tiene una lectura en valores absolutos y TOPSOLID en relativo. Cuando se creó el programa por primera vez, el fresado de algunas ranuras se superponía. Para resolver el problema se creó en TOPSOLID el fresado de las ranuras que faltaban. El final de esta primera etapa fue realizar un corte para fabricar la segunda pieza.

La siguiente etapa consiste en el ranurado para el paso de la PCB, el vaciado central de la pieza y la realización de perforaciones para las distintas uniones. Para esta etapa se necesitó la realización de una pieza de plástico para poder sostener nuestra pieza sin que se deforme. La Ilustración 51 nos muestra el montaje en la fresadora. Encontramos las mordazas de la propia fresa donde se sujeta la pieza de plástico por 3 puntos y las mordazas colocadas sobre la pieza de plástico para presionar la pieza a mecanizar sin que está rote.



*Ilustración 51 Fabricación de la estructura metálica, segunda etapa en fresadora (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

Se comenzó realizando el ranurado que se muestra en la Ilustración 52.



*Ilustración 52 Fabricación de la estructura metálica, segunda etapa en fresadora, vista del ranurado superior para la PCB (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

A continuación, se realizó el vaciado de la estructura metálica para darle su forma final del mismo modo en la fresadora. Las perforaciones para las uniones se observan también en la Ilustración 53. Encontramos seis perforaciones para la unión con el motor y otras cinco perforaciones para la unión con la tapa.



*Ilustración 53 Estructura metálicas terminada (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

A pesar de los pequeños defectos debidos a las primeras versiones del código generado a través de TOPSOLID, ambas piezas son compatibles y funcionales.

### Tapa:

La tapa es una pieza más simple a mecanizar, pero también tuvimos que utilizar TOPSOLID. Comenzamos con un crudo de aluminio de 8 mm de espesor en el que logramos albergar las dos tapas a hacer. El mecanizado se realiza en una sola fase, en una fresadora de 3 ejes.

Comenzamos por la superficie de la placa para quitar el sobrante de 3mm, luego pasamos a realizar las perforaciones para la unión con la estructura metálica y la realización de los chaflanes de estas perforaciones. A continuación, se realiza la perforación de los agujeros roscados (M3, M4, M5) para las uniones con los ventiladores, las bridas que sujetan el codificador y las uniones de las barras de presión de los transistores GaN. Luego vienen las operaciones de perforar y escariar el centro de la tapa y el corte final de la placa.

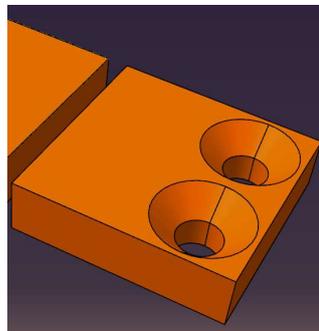
### 9.2 Otras partes

No dio tiempo a realizar el resto de las piezas antes de terminar el proyecto de final de especialidad en Francia, que a diferencia de España tiene una fecha límite establecida desde el inicio del curso académico. No obstante, se quiere dar una especificación de las piezas a fabricar. El objetivo es poder dar al cliente todas las consignas para conseguir montar el conjunto.

- Los anillos espaciadores. Hay 20 anillos espaciadores inferiores y 20 anillos espaciadores superiores para los 2 inversores. Estos espaciadores son rápidos de hacer, son sólo cilindros perforados por un agujero de 4,2 mm de diámetro interior. El diámetro exterior

será de 8 mm. Están hechas de aluminio. Tendrán que ser mandrinados para dejar pasar los tornillos M4 de fijación PCB/tapa.

- Los disipadores (Ilustración 54). Hay 20 a hacer. Una vez más, estas son piezas bastante simples de hacer. Lo complicado es realizar las perforaciones. La principal dificultad radica en el material, el cobre, que no estamos acostumbrados a mecanizar. Sabiendo esto, se realizaron unas pruebas con placas de este material. Parece que, con una alta velocidad de rotación de la broca, la perforación resultante es correcta. Una vez determinadas las condiciones de corte y comprado el crudo de cobre, los cortes tendrán que hacerse para obtener las piezas. Las superficies de apoyo en los lados del TIM y GaN tendrán que ser pulidas, de modo que el estado de la superficie sea bueno y la transferencia térmica se realice correctamente. Las medidas son 20x20x5.2 mm.



*Ilustración 54 disipador (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

- Las barras de flexión y los falso GaN a fabricar con la fibra de vidrio de la PCB. Hay 10 a fabricar y deben tener 1,5 mm de grosor.
- Bridas: se trata de pequeñas placas de aluminio plegadas a 90 grados y perforadas para dejar pasar un tornillo de fijación M5. Hay 3 de ellos, y permiten que el codificador quede sujeto a la tapa tal y cómo se ha explicado en la parte de elaboración del modelo mecánico.

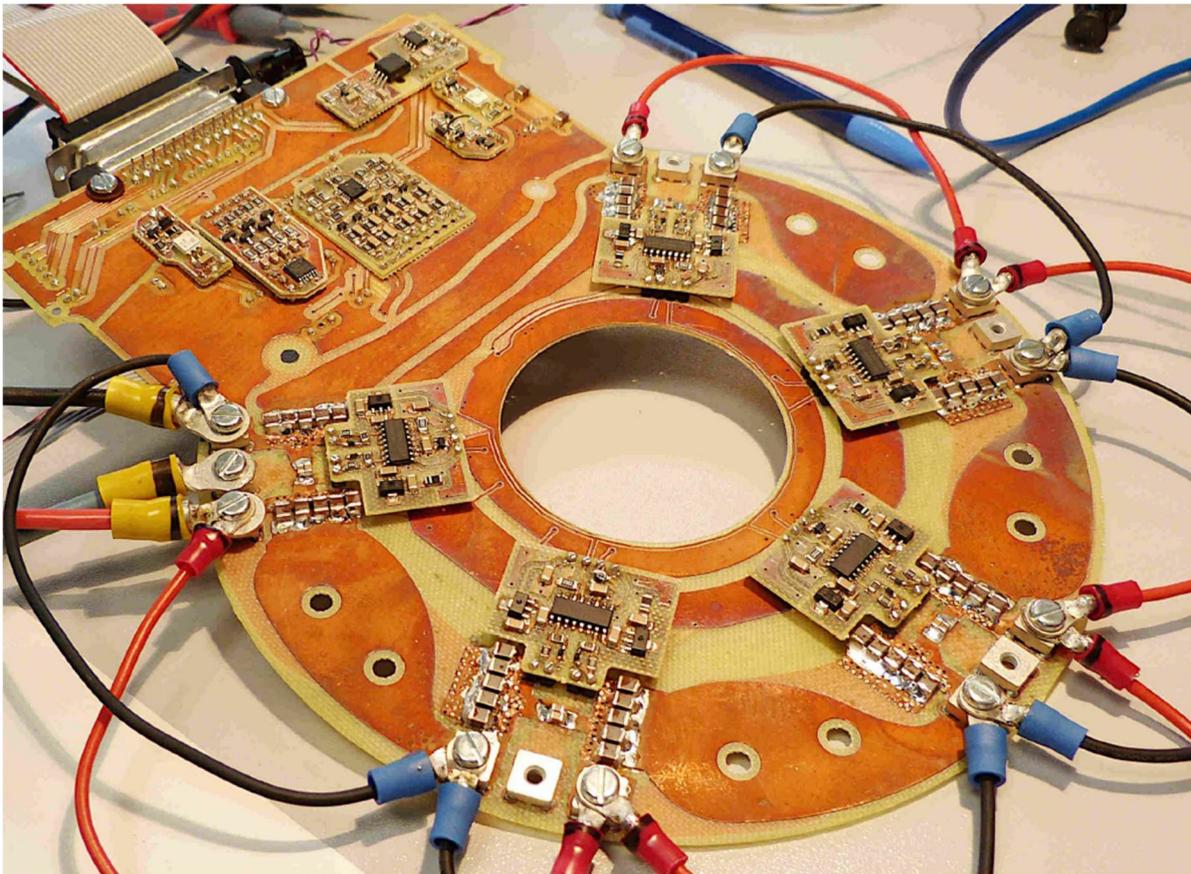
En el apartado 11 del análisis económico se encuentra la lista de componentes necesarios (tabla 5), especificando los componentes ya disponibles en la escuela francesa, los componentes a fabricar y los componentes que es necesario comprar.



## 10 SOLUCIÓN PARA EL MONTAJE FINAL.

La siguiente fase del proyecto es montar el conjunto una vez que todas las piezas han sido fabricadas o compradas y la PCB está diseñada y fabricada por el equipo correspondiente.

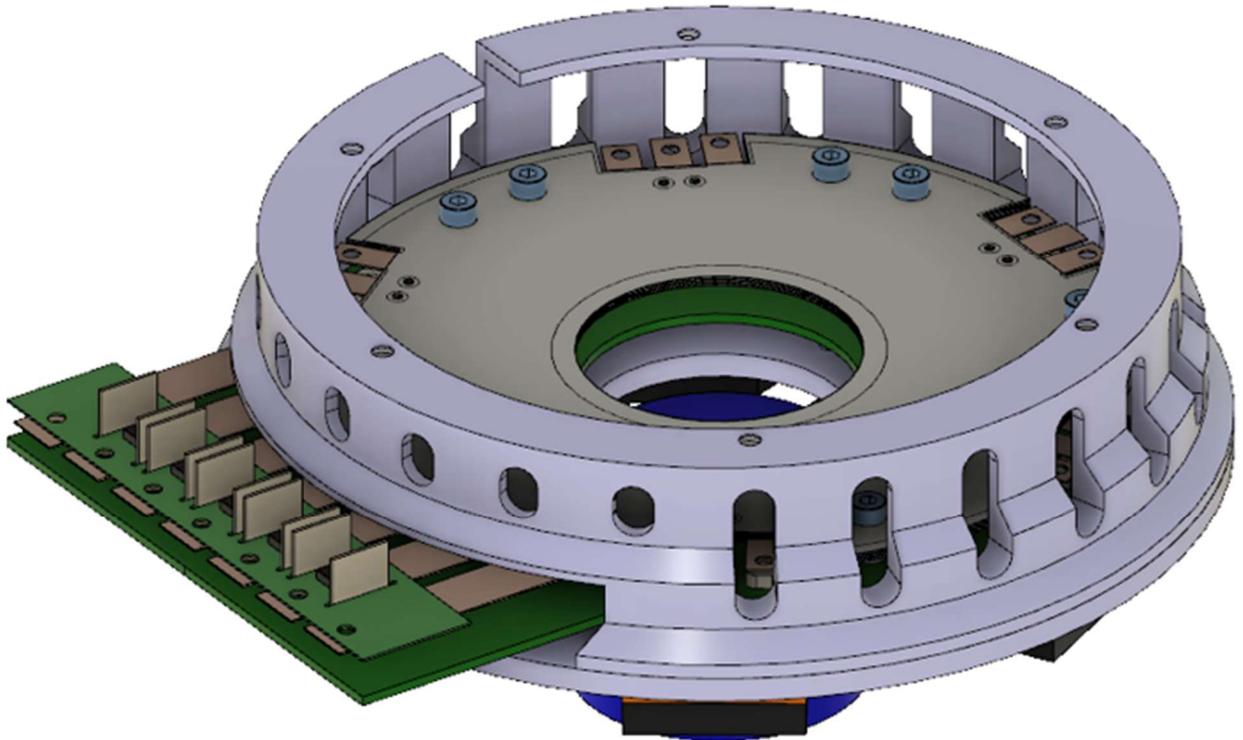
En la Ilustración 55 se observa la PCB fabricada a falta de montar otros dispositivos electrónicos.



*Ilustración 55 Vistas de la PCB con los transistores instalados (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

Durante el montaje, es importante asegurarse de tres puntos fundamentales :

- Preste atención a las caras de la tapa: los ventiladores se montan con las bridas en la cara cruda, a diferencia de los esparcidores y la PCB que se montan sobre la superficie pulida.
- Preste atención al ensamblaje de los elementos en la tapa ya que esta cuenta con numerosas perforaciones. Es recomendable consultar el croquis de la tapa en el anexo III, que incluye algunas dimensiones.
- Preste atención al montaje de la tapa sobre la estructura metálica: la ranura para la salida de los bornes del cableado debe quedar hacia arriba. En la Ilustración 56 se observa una vista completa donde se observa la ranura por donde salen los bornes de conexión.

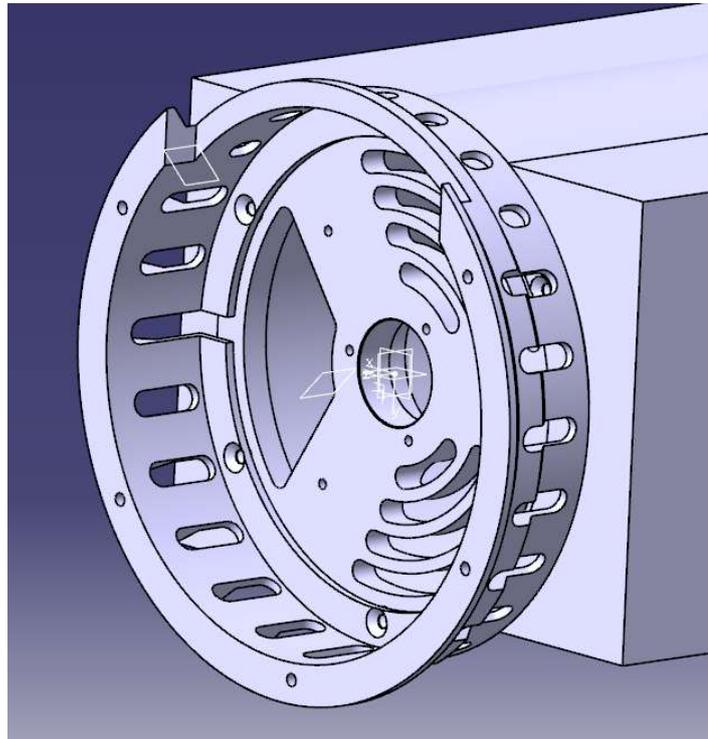


*Ilustración 56 Vista del conjunto completo (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

Para facilitar el montaje al cliente, se le ha hecho entrega de los ficheros CAD en sus distintos formatos. Estos ficheros también han sido entregados junto a la memoria. En el anexo III están disponibles algunas vistas adicionales y los croquis de las piezas complejas.

La instalación debe hacerse de la siguiente manera, y en este orden:

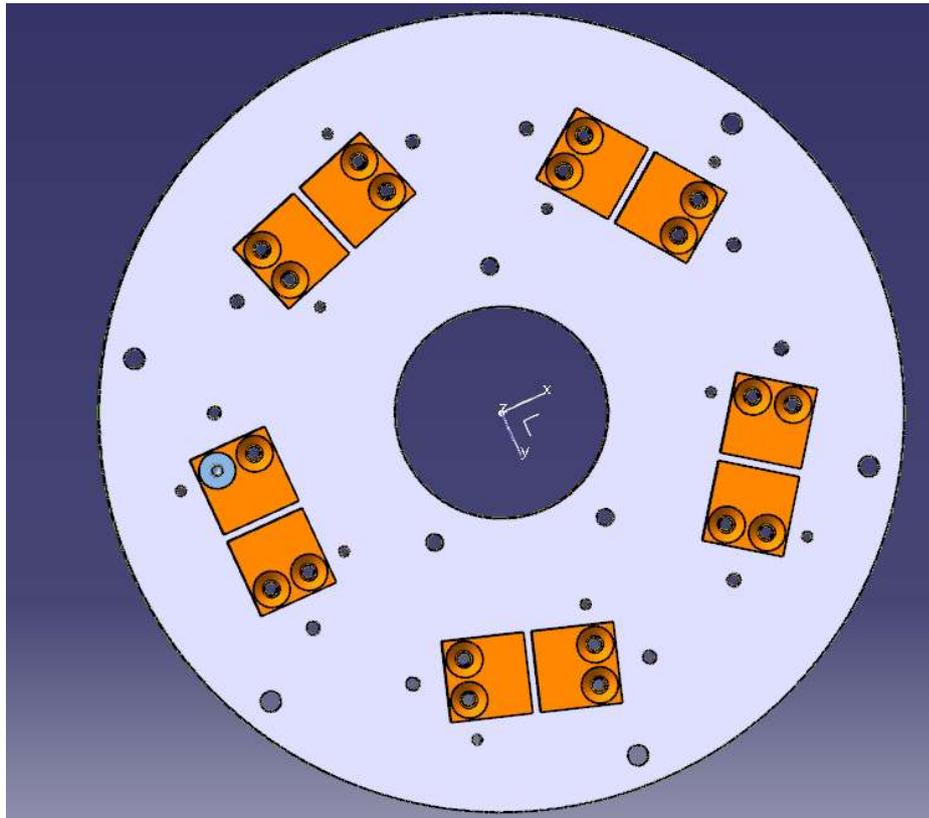
- Retirar los tornillos de unión de la tapa ranurada actual del motor visible en la Ilustración 57. A continuación, tome los 6 tornillos M4 para montar la estructura metálica sobre el motor eléctrico. La tapa ranurada actual del motor queda entre la estructura metálica y el motor eléctrico.



*Ilustración 57 Vista de la estructura metálica sobre el motor (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

Del lado opuesto, tenemos el acoplador. Por tanto, será necesario quitar el acoplador separando el árbol para colocar la estructura metálica en los agujeros que se encuentran en la misma posición, en su lado opuesto.

- En la tapa, montar los disipadores de cobre con los tornillos especiales PPS M4 con una cabeza fresada tal y como se representa en la Ilustración 58. Es importante prestar atención a la orientación de los disipadores. No olvidarse de aplicar el material TIM entre la tapa y los disipadores teniendo en cuenta la perforación para los tornillos. Como se indicó al inicio, hay que utilizar la cara pulida de la tapa para montar los disipadores.

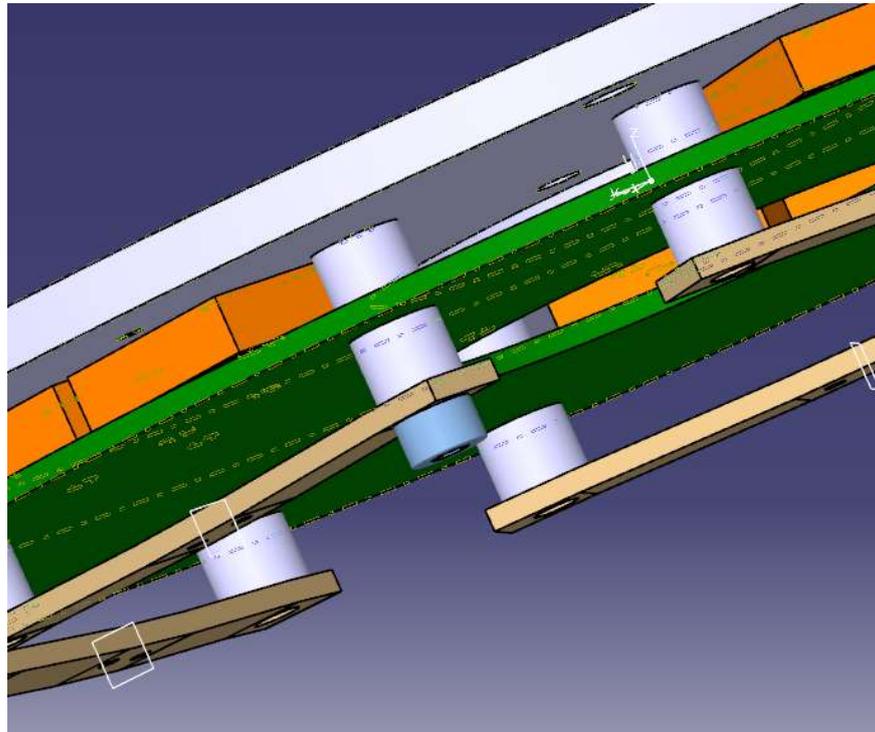


*Ilustración 58 Vista de la tapa con todas las perforaciones. En naranja las placas de cobre (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

- Montar la PCB con los espaciadores, la barra de presión y los tornillos CHC M4. El orden es el siguiente tal y como se muestra en la Ilustración 59:
  - Arandela de seguridad antiaflojamiento.
  - Espaciador superior (longitud de 6,2 mm).
  - PCB.
  - Espaciador inferior (longitud de 6 mm).
  - Barra de presión.
  - Tornillo CHC M4.

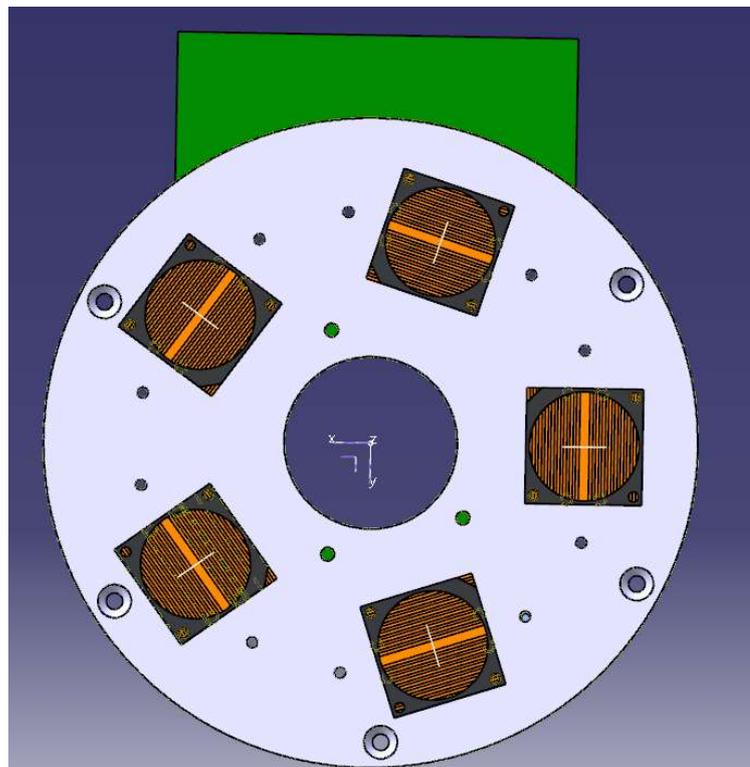
No olvidarse de aplicar también el material TIM entre el transistor GaN y los disipadores.

**Nota: La longitud de los espaciadores superiores puede ser ligeramente demasiado grande para que el contacto GaN/Disipador se realice correctamente. Es posible que deban limar ligeramente el espaciador para ajustarse.**



*Ilustración 59 Vista de la unión tapa, disipador, PCB y barra de presión (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

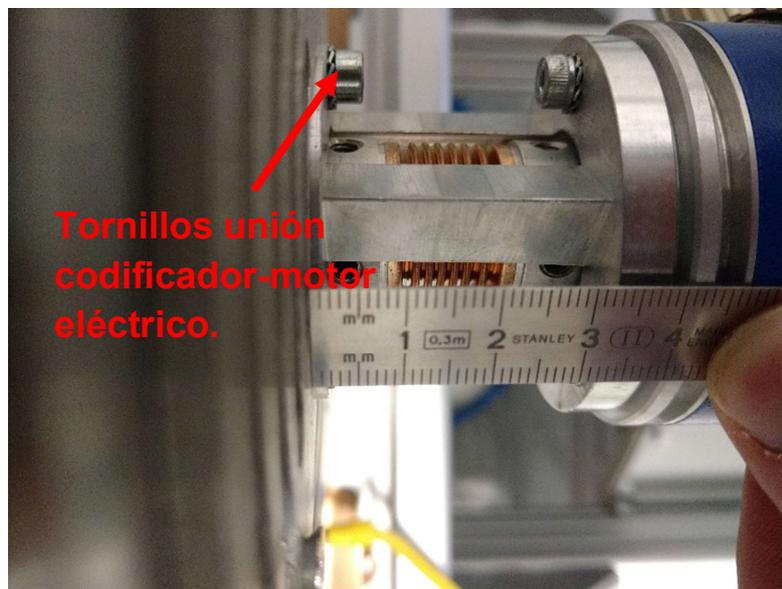
- Pasando a la otra cara de la tapa montar los ventiladores con los tornillos M3 tal y como se observa en la Ilustración 60.



*Ilustración 60 Vista superior de la tapa con los ventiladores instalados (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

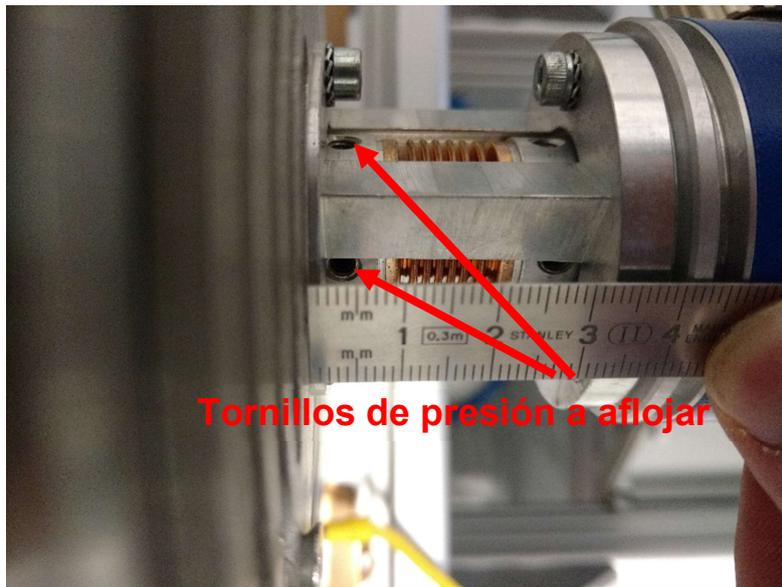
Del mismo modo, montar un segundo conjunto con todos los elementos acoplados a la tapa.

- Una vez que tenemos la estructura metálica montada sobre el motor eléctrico y todos los elementos acoplados a la tapa, se puede pasar a la última etapa. Del lado del acoplamiento, colocar el primer conjunto tapa con todos los elementos acoplados y unirlo con los tornillos M5 a la estructura metálica. Del lado del codificador, quitar los tres tornillos de la Ilustración 61 con los que se encuentra actualmente el codificador unido al motor eléctrico.



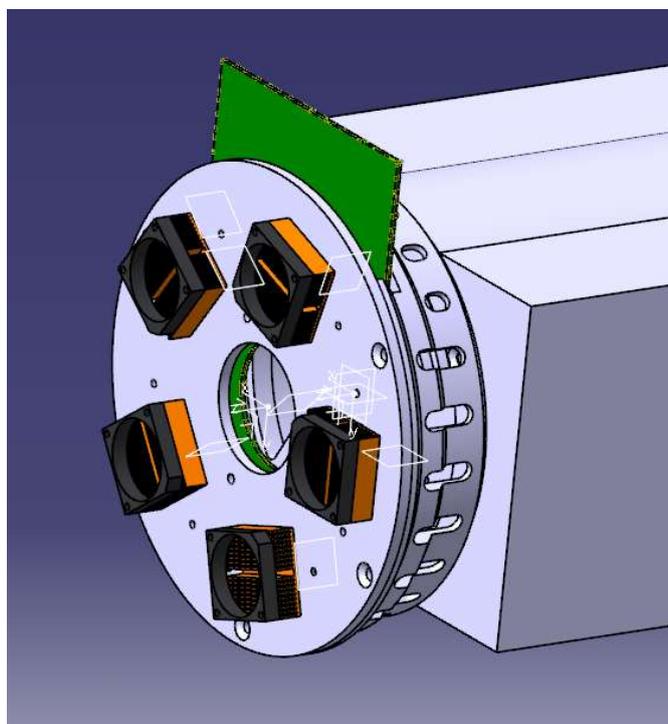
*Ilustración 61 Uniones del codificador (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

También será necesario aflojar los tornillos de presión mostrados en la Ilustración 62.



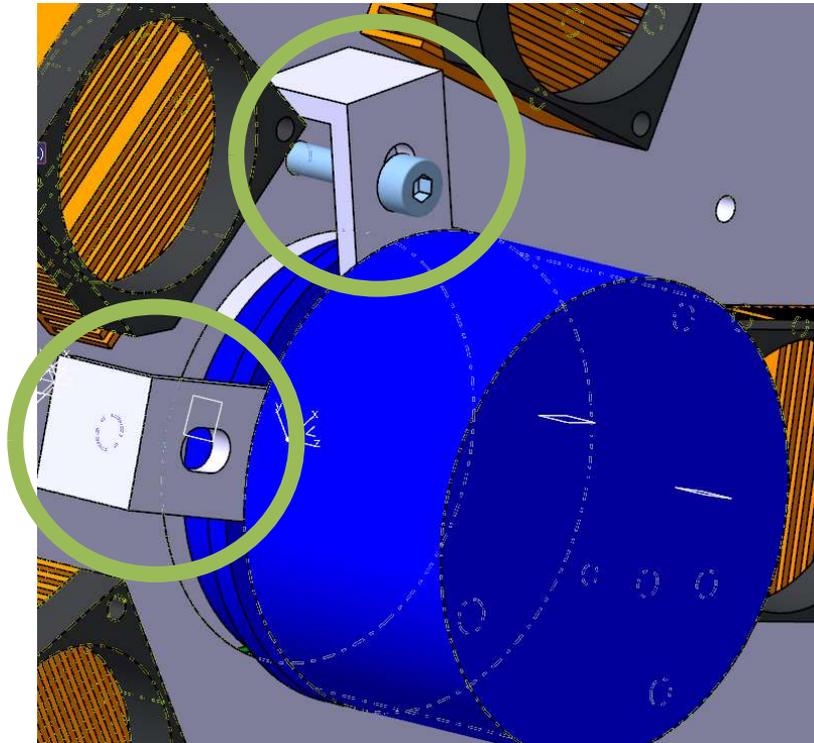
*Ilustración 62 Vista de los tornillos de presión del codificador (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

Una vez separado el codificador, montar la tapa sobre la estructura metálica utilizando los tornillos M5. El montaje debe quedar como el de la Ilustración 63.



*Ilustración 63 Vista de la tapa unida a la estructura metálica a falta de montar el codificador (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

Para montar el codificador, coloque las 3 bridas en la ranura adecuada del codificador y apriete los 3 tornillos M5 para fijar el codificador a la tapa tal y como se representa en la Ilustración 64.



*Ilustración 64 Vista de las bridas (rodeadas en verde) de unión del codificador a la tapa (Cortesía del laboratorio L2EP/ENSAM).*

Una vez unidas las dos tapas con la estructura metálica se puede proceder a montar el árbol. Del mismo modo que ha sido desmontado el acoplador, montarlo. A través de la ventana de la estructura metálica, volver a apretar los tornillos de fijación del codificador.

El montaje queda terminado.

## 11 ANÁLISIS ECONÓMICO

Por el momento es muy difícil hacer un análisis económico completo ya que el coste material más alto es el de los componentes de la PCB, los cuales el autor de este trabajo desconoce. Además casi todos los componentes del conjunto habían sido ya comprados en el primer prototipo realizado. Los componentes nuevos que se han diseñado, han sido fabricados con los propios medios de la escuela francesa, con lo cual no ha sido un coste a tener en cuenta. La fabricación de estos componentes se integra dentro del coste del taller de la propia escuela para la formación de los alumnos. El taller ya disponía de todas las herramientas, plaquitas, y por supuesto, los brutos de acero y cobre. Algunos componentes que han sido comprados posteriormente, como por ejemplo algunos tornillos, tienen un coste muy bajo. Por lo tanto, cuando el proyecto global pase a una fase de comercialización será necesario costear toda la tecnología desarrollada en este TFM y la tecnología creada por el resto de los equipos de trabajo del proyecto global que yo desconozco.

Sin embargo, se trata de dar algunas cifras de los precios de compra y fabricación:

Componente	Cantidad Por inversor	Estado	Precio unitario (€)
Disipador + Ventilador	5	Proporcionado	20 €
Tornillo "tapa ↔ disipador" Cabeza avellanada M3 x16	10	Comprado	< 0.5 € según precio medio mercado
Tapa - Estructura metálica	1	Para ser mecanizado	40 € bruto según precio medio mercado
Tornillo "tapa ↔ estructura metálica" M5 CHC x10	5	Comprado	< 0.5 € según precio medio mercado
Tornillo "máquina ↔ estructura metálica" CHC M4 x20	6	Comprado	< 0.5 € según precio medio mercado
PCB y componentes	1	Proporcionado	Calcular según los componentes en la PCB
TIM "GaN ↔ disipadores"	10 (4mm-6mm)	Pedido por cliente	10 € según precio medio mercado
Disipador cobre	10	A fabricar	10 € bruto para 10 placas según precio medio mercado.
M4 x 12 "tapa ↔ disipador" tornillo aislante PPS	20	Comprado	0.8 € según (MiSumi, s.f.)
TIM "Disipador ↔ Tapa"	5 (20mm-42mm)	Pedido por cliente	10 € según precio medio mercado
Tornillo en PCB "Tapa ↔ barra de presión" CHC M4x30	20	Comprado	<0.5 € según precio medio mercado
Barra de presión	5	A fabricar	10 € bruto para 5 placas según precio medio mercado.
Espaciadores inferiores y superiores	40	A fabricar	20 € bruto para los 5 espaciadores según precio medio mercado.
Bridas	6	Proporcionado	15 € bruto para los 5 espaciadores según precio medio mercado.
Transistores GaN	10	Ya Comprado	10.64 € según (Systems, s.f.)

Falso GaN	10	A fabricar	5 € bruto para 10 según precio medio del mercado.
-----------	----	------------	---

*Tabla 5 Lista de componentes*

El precio de mecanizado de piezas suele estar entre 35 y 50 € de media por hora de fabricación. Sin contar las horas de preparación de los ficheros de TopSolid, ni el tiempo de reflexión para encontrar la solución al proceso de fabricación, se estima el tiempo de mecanizado de 15h. En este tiempo se incluye el tiempo de preparación de las herramientas, y el tiempo de introducción y extracción de las piezas.



## 12 CONCLUSIÓN

### 12.1 Descripción del proceso seguido para cumplir los objetivos marcados y síntesis de la solución tecnológica elegida.

A partir del trabajo del autor desde el inicio del proyecto en la ENSAM en Francia hasta la posterior continuación en la UVA ha sido posible dar respuesta a las exigencias del cliente. Dar respuesta al diseño mecánico, comprobar su funcionalidad térmica especificando el régimen de funcionamiento, y por último, elaborar la fabricación y montaje para que el cliente pueda instalarlo en su banco de ensayo.

En primer lugar, ha sido posible familiarizarse con el contexto para poder entender adecuadamente el proyecto. Fue fundamental conocer el interés del proyecto global y el interés y las ventajas de esta solución de hibridación planteada por Valeo. También fue muy importante entender el funcionamiento de la máquina de ensayo y la tecnología que se quería usar en esta solución mild-hybrid. Desde mi punto de vista una primera etapa fundamental para cualquier proyecto de ingeniería.

En segundo lugar, ha sido posible desarrollar esa etapa de los proyectos en ingeniería, elaborar un cuaderno de carga con todas las exigencias del cliente y analizar el conjunto de problemas iniciales del cliente en su primera solución. Una vez conocida esta primera solución ha sido clave analizar los componentes utilizados en ella, así como analizar los componentes que el cliente tiene pensado utilizar.

A continuación, se ha llevado a cabo la elaboración del diseño mecánico del inversor considerando la solución inicial y las restricciones del cliente, así como el análisis y la caracterización de componentes realizada. Como en cualquier proyecto de ingeniería se han ido aportando soluciones al cliente, con su feedback se han realizado modificaciones hasta llegar a la solución final. En este caso no fue necesaria una formación en CAD ya que el alumno contaba con los conocimientos necesarios sobre el software CATIA para poder realizar el proyecto.

Dado que al finalizar el proyecto en Francia no dio tiempo a comprobar si el diseño mecánico tenía un funcionamiento correcto térmicamente hablando, el autor del proyecto quiso continuar el proyecto para validar el diseño mecánico realizado. Fue necesario volver a analizar y caracterizar térmicamente todos los componentes para poder realizar el análisis del comportamiento térmico del conjunto. Fue necesario analizar en profundidad los transistores GaN, entender su funcionamiento, las distintas capas que lo componen y la resistencia térmica de estas, además de las pérdidas de estos transistores según su régimen de funcionamiento. Esta etapa se realizó a través de la consulta de distintas tesis, trabajos realizados externamente y consultación de la información aportada por el cliente. Dado el periodo de pandemia por el que pasamos durante la elaboración de este Trabajo Fin de Master, además de la inexperiencia de la escuela sobre este tema, el alumno tuvo que resolver esta etapa de forma autónoma. Si que fue posible explicar al cliente el modo de funcionamiento de los transistores, las pérdidas generadas según los regímenes de

funcionamiento para llegar a concluir esta etapa con unas hipótesis de funcionamiento y un comportamiento térmico del transistor según el régimen de funcionamiento de este. El cliente ya tenía una orientación sobre el régimen de funcionamiento al que debían someterse los transistores para un funcionamiento correcto del conjunto del dispositivo creado.

Una vez finalizado el análisis termo-eléctrico del transistor GaN y justificar el comportamiento térmico en la simulación que se quiere realizar, se analizó la conductividad de los distintos materiales del conjunto, la convección con el medio y todos los factores que influían para que el modelo computacional sea lo más real posible. Por ejemplo, se tuvo en cuenta el material TIM, que en la realidad no tiene por qué ser 100% eficaz, las condiciones del régimen de funcionamiento del transistor y la influencia del medio. Para justificar el comportamiento térmico del ventilador fue necesario ponerse en contacto con el fabricante. Finalmente, se establecieron todas las justificaciones térmicas necesarias que nos permitían crear el modelo térmico.

Para elaborar el modelo térmico el autor del trabajo tuvo que dedicar unas 40 horas de formación sobre el programa Ansys, en concreto el módulo steady-state Thermal. Utilizó formaciones gratuitas online ofrecidas por el propio dueño del programa, ejemplos realizados en otros proyectos y los conocimientos del alumno de otros programas con funciones que se asemejaban. En esta etapa, en primer lugar, se elaboró la geometría. Ha sido posible construir una geometría a partir del modelo mecánico que permite simular el comportamiento térmico del conjunto. A esta geometría se le han asignado los materiales necesarios y al modelo se le han dado todos los parámetros necesarios para su correcta simulación.

## 12.2 Principales aportaciones del autor al TFM.

La aportación más destacable realizada a través del análisis y trabajo descrito anteriormente es comprobar que el régimen de funcionamiento máximo de los transistores debe ser inferior a los 40 V, alcanzando temperaturas de 68 °C en la llamada unión del transistor y de 56°C en los ventiladores. A esta situación límite se le da el margen de error necesario poniéndonos en unas condiciones de convección desfavorables y comprobando lo que ocurriría si se producen desperfectos o anomalías en el dispositivo. Se ha dicho al cliente que la unión del transistor se pondría a 140°C si el material TIM se deteriora o se monta de forma incorrecta. Además, el cliente ha sido informado de que si falla uno de los ventiladores, en dos de los cinco pares de transistor se alcanzarían los 150°C.

El diseño mecánico ya fue una aportación muy importante para el cliente, pero el hecho de hacer el diseño real a través de su fabricación ha sido fundamental. El cliente puede disfrutar de la metodología para fabricar todas las piezas y los archivos en TOPSOLID para fabricaciones futuras. El alumno tuvo que aprender a utilizar este programa también,

utilizando los conceptos de otros programas de CAD y la ayuda del profesor responsable del departamento de fabricación de la escuela francesa junto al técnico del taller.

Después de la fabricación, el hecho de abordar el montaje ha sido esencial para que el cliente pueda integrar nuestro dispositivo en su cámara de ensayo y realizar las simulaciones pertinentes.

El trabajo del autor de este TFM ha sido compartido por el alumno en una conferencia online organizada por IMFAHE (International Mentorig Foundation for the advancement of the Higher Education). Para presentar el trabajo hubo un proceso de selección donde los participantes se expusieron a criterios de selección como pueden ser el interés del tema en termino de innovación o el nivel de contribución al avance de la ciencia mediante la compartición del conocimiento.

En el anexo IV se encuentra un diagrama Gantt donde se representa la forma en la que se organiza el autor, y el tiempo dedicado a cada bloque del proyecto.

### 12.3 Sugerencias para trabajos futuros.

De aquí en adelante se esperan obtener ciertos resultados de la simulación en el banco de ensayo realizada por el cliente, a partir de esta simulación real pueden surgir posibles modificaciones del diseño mecánico u otras comprobaciones térmicas. Estas pueden alterar la fabricación y el montaje.

Para trabajos futuros se puede llevar a cabo un análisis térmico más profundo si las exigencias del proyecto global lo requieren. Se podría tratar de obtener temperaturas precisas de las distintas capas del transistor teniendo en cuenta su geometría exacta real en vez de la simplificación que se realiza en este TFM. Al ser una tecnología nueva estos datos no son fáciles de obtener. El fabricante realiza estudios termoeléctricos con el programa SPICE y experimentaciones reales usando cámaras de termografía IR. Una posible continuación de este proyecto podría ser generar un grupo de trabajo termo-eléctrico que junto al fabricante realice estos estudios mucho más exhaustivos. Otra posible continuación respecto a la simulación térmica es realizar un análisis en régimen transitorio en vez de estacionario como se realiza en este TFM. El objetivo sería definir el espacio de tiempo en el que los transistores pueden estar funcionando en un régimen de funcionamiento de 60 V antes de alcanzar la temperatura máxima especificada por el fabricante, 150 °C en la unión del transistor.

Por otro lado, en un futuro si fuera necesario realizar una fabricación de varios conjuntos sería necesario externalizar la fabricación para realizarla de una forma más barata y rápida con tornos y fresadoras más modernas. En este caso sería necesario elaborar un informe del proceso de fabricación. En este informe sería necesario incorporar la descripción detallada de la geometría, de la funcionalidad y del material de las distintas piezas, ya realizada en este TFM. Además, sería necesario realizar una descripción de la fabricación y entregar los planos de fabricación. A continuación, habría que especificar las herramientas y el utillaje necesario

a utilizar y encontrar una empresa que disponga de ellas. Por último, habría que elaborar las gamas y fichas de fabricación. Este informe de fabricación debe contar también con las especificaciones del portaherramientas, plaquitas y otras especificaciones necesarias. Por supuesto, sería necesario especificar las operaciones de mecanizado analizando las velocidades, avance, potencia empleada, profundidad de pasada, fuerza específica de corte, tiempo de operación, necesidades de lubricación y rugosidades. Estos informes se suelen realizar conjuntamente entre la empresa solicitante del servicio y la empresa que da el servicio.

Otro aspecto relevante en el caso de llegar a comercializar el producto creado en este TFM, es la necesidad de elaborar manuales de montaje especificando concretamente cada una de las partes, los pasos y las herramientas necesarias. Este manual debe incluir planos de montaje.

Por supuesto en un futuro se debe realizar un análisis económico completo como se comenta en el apartado 11 análisis económico. Por el momento es una tecnología que se integra en un banco de ensayo. En el momento que este dispositivo se integre en el vehículo será necesario traducir las ventajas de esta tecnología en ventajas económicas. En este análisis económico se debe tener en cuenta el coste de compra de los materiales y componentes del conjunto, todos los costes de fabricación y los costes del proceso de ensamblado. Con este análisis económico se podrá dar un precio de venta de la tecnología realizando un estudio de mercado. En este Trabajo Fin de Master ya se dan algunas cifras de los precios de compra.

Para futuros trabajos se explica la forma de reutilizar los ficheros de la concepción. Hemos trabajado a lo largo de este proyecto con el software CATIA, bajo una versión para estudiantes CATIA V5-6R2017. Esta versión no es la presente en la escuela, vamos a proponer 2 soluciones para seguir teniendo acceso al CAD.

En primer lugar, se ha entregado al cliente los ficheros en formato .3dxml de las distintas piezas y el ensamblaje. Es un formato de archivo que se puede abrir con cualquier software CAD, gratuito o de pago. Tiene la ventaja de conservar el árbol de las piezas que componen el ensamblaje, y también permite medir, girar alrededor del modelo u ocultar ciertas piezas. De esta manera se puede entender mejor nuestro proyecto, y puede ayudar durante el montaje.

Por tanto, se pueden utilizar múltiples software CAD para abrir estos archivos. En concreto, ofreceremos uno. Se trata de dibujos electrónicos, proporcionados con Solidworks de Dassault Systemes. Se pueden descargar de forma gratuita en el enlace:  
<http://www.edrawingsviewer.com/ed/download.htm>

También se proporciona al cliente los archivos CATIA y todos los documentos en una carpeta. Se proporciona en formato .CatPart, .CatProduct, .stp y .igs para asegurarnos que se puedan



abrir los archivos desde cualquier versión sin tener en cuenta el año. Los archivos .stp y .igs no tienen las ventajas de .3dxml.



## BIBLIOGRAFÍA

- BaochaoWang, S. D. (25 de Marzo de 2019). A Comparative Study on the Switching Performance of GaN and Si Power Devices for Bipolar Complementary Modulated Converter Legs. *Energies MPDI*.
- Bassel, A. (2013). *Conception de Machines Polyphasés à Aimants et Bobinage Concentré à Pas Fractionnaire avec Large Plage de Vitesse*. Autre. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM: NNT : 2013ENAM0039. pastel-00973528. Páginas: 3-13.
- ce2i. (2020). *Intelligent Integrated Energy Converter*. Recuperado el 2 de Marzo de 2020, de <https://ce2i.pole-medee.com/home/>
- Co.KG, H. c. (s.f.). *silicone foil TFO-X-SI*.
- Cypress semiconductor. (2017). *Understanding Temperature Specifications: An Introduction*. 198 Champion Court San Jose, CA 95134-1709.
- Eighthave. (7 de marzo de 2008). *Duty cycle*. Recuperado el 2 de Julio de 2020, de [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/PWM\\_duty\\_cycle\\_with\\_label.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/PWM_duty_cycle_with_label.gif)
- Francisco. (5 de Abril de 2018). *e-automotive*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2020, de <https://noticias-renting.aldautomotive.es/saber-ccohes-hibridos>
- GalcoTV. (2018). *Qué es un codificador y cómo funcionan*. Recuperado el 5 de Julio de 2020, de <https://www.youtube.com/watch?v=LGkrxZyUyaM#:~:text=Un%20codificador%20es%20un%20dispositivo,u%20otro%20equipo%20en%20movimiento>.
- GRANDE, M. I. (2000). *INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DEL CONTACTO EN LA RESISTENCIA TÉRMICA DE CONTACTO*. Madrid. Página: 2.
- Inc, G. S. (2009). *Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor Preliminary Datasheet*.
- J. Roberts, C. (15 de marzo de 2015). *GaN Systems*. Recuperado el 7 de Junio de 2020, de <https://www.pσμα.com/sites/default/files/uploads/tech-forums-packaging/presentations/is85-maximizing-gan-power-transistor-performance-embedded-packaging.pdf>
- MiSumi. (s.f.). *Vis mécaniques à tête plate/PEEK (polyétheréthercétone)*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2020, de <https://fr.misumi-ec.com/vona2/detail/221000713163/?KWSearch=NIPPON%20CHEMICAL%20SCREW&searchFlow=results2products>
- S.Marco., A. (1958). *Adaptado al SI. Introduction to heat transfer 3ªed*. McGraw-Hill. Recuperado el 20 de Junio de 2020, de [Propiedades térmicas de algunos materiales: https://blog.utp.edu.co/docenciaedwin/files/2015/06/coeficientes-de-conduccion-termica.pdf](https://blog.utp.edu.co/docenciaedwin/files/2015/06/coeficientes-de-conduccion-termica.pdf)
- Schemm, N. (Febrero de 2018). *Optimizing Efficiency Through Dead Time Control With the LMG1210 GaN Driver*. Texas instrument.
- Simon. (10 de Enero de 2019). *El vehículo eléctrico: elementos principales y funcionamiento*. Recuperado el 4 de Mayo de 2020, de <https://www.simonelectric.com/blog/el-vehiculo-electrico-elementos-principales-y-funcionamiento#:~:text=Los%20inversores%20sirven%20para%20transformar,en%20forma%20de%20corriente%20continua>.



Systems, G. (s.f.). *Mouser Spain* . Recuperado el 26 de Septiembre de 2020, de  
[https://www.mouser.es/ProductDetail/GaN-Systems/GS61008T-MR?qs=OIC7AqGiEDn2e0Gcr445SQ==&vip=1&gclid=Cj0KCQjwzbv7BRDIARIsAM-A6-0KEFIVPsK\\_a5pKJeDla5Ajo3TjBjbGuNSXf5AfxvIIQYXQNHdx9tMaAmwbEALw\\_wcB](https://www.mouser.es/ProductDetail/GaN-Systems/GS61008T-MR?qs=OIC7AqGiEDn2e0Gcr445SQ==&vip=1&gclid=Cj0KCQjwzbv7BRDIARIsAM-A6-0KEFIVPsK_a5pKJeDla5Ajo3TjBjbGuNSXf5AfxvIIQYXQNHdx9tMaAmwbEALw_wcB)  
Universidad Politécnica de Valencia. (s.f.). *Tema 3. Convección. Página: 5*. Recuperado el 16 de  
Junio de 2020, de  
[http://personales.upv.es/vsoto/index\\_archivos/FTP/TC/Conveccion.pdf](http://personales.upv.es/vsoto/index_archivos/FTP/TC/Conveccion.pdf)



## ANEXO I

### Información de contacto para el fabricante de tornillos aislantes:

Tornillos aislantes térmicos y eléctricos.  
MISUMI Europa GmbH,  
Franklin61-63,  
60486 Frankfurt am Main, Alemania  
<https://fr.misumi-ec.com/>

## ANEXO II

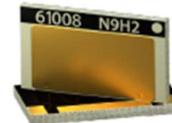
### a. Gan



## GS61008T Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor Preliminary Datasheet

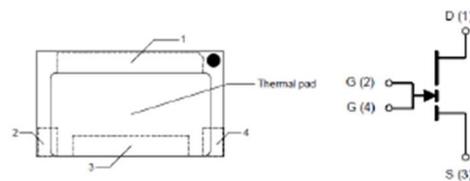
### Features

- 100 V enhancement mode power transistor
- Top-side cooled configuration
- $R_{DS(on)} = 7 \text{ m}\Omega$
- $I_{DS(max)} = 90 \text{ A}$
- Ultra-low FOM die
- Low inductance GaN $Px^*$  package
- Simple gate drive requirements (0 V to 6 V)
- Transient tolerant gate drive (-20 V / +10 V)
- Very high switching frequency (> 10 MHz)
- Fast and controllable fall and rise times
- Reverse current capability
- Zero reverse recovery loss
- Small 7.0 x 4.0 mm<sup>2</sup> PCB footprint
- Dual gate pads for optimal board layout
- RoHS 3 (6 + 4) compliant



Package Outline

Circuit Symbol



*The top-side thermal pad is internally connected to Source (S pin 3) and substrate*

### Applications

- Energy Storage Systems
- AC-DC Converters (secondary side)
- Uninterruptable Power Supplies
- Industrial Motor Drives
- Fast Battery Charging
- Class D Audio amplifiers
- Traction Drive

### Description

The GS61008T is an enhancement mode GaN-on-silicon power transistor. The properties of GaN allow for high current, high voltage breakdown and high switching frequency. GaN Systems innovates with industry leading advancements such as patented **Island Technology<sup>®</sup>** and **GaN $Px^*$**  packaging. **Island Technology<sup>®</sup>** cell layout realizes high-current die and high yield. **GaN $Px^*$**  packaging enables low inductance & low thermal resistance in a small package. The GS61008T is a top-side cooled transistor that offers very low junction-to-case thermal resistance for demanding high power applications. These features combine to provide very high efficiency power switching.



GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet

**Absolute Maximum Ratings** ( $T_{case} = 25\text{ °C}$  except as noted)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Operating Junction Temperature	$T_J$	-55 to +150	°C
Storage Temperature Range	$T_S$	-55 to +150	°C
Drain-to-Source Voltage	$V_{DS}$	100	V
Drain-to-Source Voltage - transient (note 1)	$V_{DS(transient)}$	120	V
Gate-to-Source Voltage	$V_{GS}$	-10 to +7	V
Gate-to-Source Voltage - transient (note 1)	$V_{GS(transient)}$	-20 to +10	V
Continuous Drain Current ( $T_{case} = 25\text{ °C}$ ) (note 2)	$I_{DS}$	90	A
Continuous Drain Current ( $T_{case} = 100\text{ °C}$ ) (note 2)	$I_{DS}$	65	A
Pulse Drain Current (Pulse width 50 $\mu$ s, $V_{GS} = 6\text{ V}$ )	$I_{DS\ Pulse}$	140	A

(1) Pulse  $\leq 1\ \mu$ s

**Thermal Characteristics** (Typical values unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Value	Units
Thermal Resistance (junction-to-case) – Top side	$R_{\theta JC}$	0.55	°C/W
Maximum Soldering Temperature (MSL3 rated)	$T_{SOLD}$	260	°C

**Ordering Information**

Ordering code	Package type	Packing method	Qty	Reel Diameter	Reel Width
GS61008T-TR	GaN $\mu$ X® Top-Side Cooled	Tape-and-Reel	3000	13" (330 mm)	16 mm
GS61008T-MR	GaN $\mu$ X® Top-Side Cooled	Mini-Reel	250	7" (178 mm)	16 mm



GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet

Electrical Characteristics (Typical values at  $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V_{GS} = 6\text{ V}$  unless otherwise noted)

Parameters	Sym.	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Drain-to-Source Blocking Voltage	$V_{(BL)DSS}$	100			V	$V_{GS} = 0\text{ V}$ $I_{DSS} = 50\text{ }\mu\text{A}$
Drain-to-Source On Resistance	$R_{DS(on)}$		7	9.5	$\text{m}\Omega$	$V_{GS} = 6\text{ V}$ , $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$ $I_{DS} = 27\text{ A}$
Drain-to-Source On Resistance	$R_{DS(on)}$		17.5		$\text{m}\Omega$	$V_{GS} = 6\text{ V}$ , $T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$ $I_{DS} = 27\text{ A}$
Gate-to-Source Threshold	$V_{GS(th)}$	1.1	1.7	2.6	V	$V_{DS} = V_{GS}$ , $I_{DS} = 7\text{ mA}$
Gate-to-Source Current	$I_{GS}$		200		$\mu\text{A}$	$V_{GS} = 6\text{ V}$ , $V_{DS} = 0\text{ V}$
Gate Plateau Voltage	$V_{plat}$		3.5		V	$V_{DS} = 50\text{ V}$ $I_{DS} = 90\text{ A}$
Drain-to-Source Leakage Current	$I_{DSS}$		0.5	50	$\mu\text{A}$	$V_{DS} = 100\text{ V}$ , $V_{GS} = 0\text{ V}$ $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$
Drain-to-Source Leakage Current	$I_{DSS}$		100		$\mu\text{A}$	$V_{DS} = 100\text{ V}$ , $V_{GS} = 0\text{ V}$ $T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$
Internal Gate Resistance	$R_G$		0.64		$\Omega$	$f = 5\text{ MHz}$ open drain
Input Capacitance	$C_{ISS}$		600		pF	$V_{DS} = 50\text{ V}$ $V_{GS} = 0\text{ V}$ $f = 100\text{ kHz}$
Output Capacitance	$C_{OSS}$		250		pF	
Reverse Transfer Capacitance	$C_{RSS}$		12		pF	
Effective Output Capacitance, Energy Related (Note 2)	$C_{O(ER)}$		351		pF	$V_{GS} = 0\text{ V}$ $V_{DS} = 0\text{ to }50\text{ V}$
Effective Output Capacitance, Time Related (Note 3)	$C_{O(TR)}$		433		pF	
Total Gate Charge	$Q_G$		8		nC	$V_{GS} = 0\text{ to }6\text{ V}$ $V_{DS} = 50\text{ V}$ $I_{DS} = 90\text{ A}$
Gate-to-Source Charge	$Q_{GS}$		3.5		nC	
Gate threshold charge	$Q_{G(th)}$		1.9		nC	
Gate switching charge	$Q_{G(sw)}$		4.1		nC	
Gate-to-Drain Charge	$Q_{GD}$		1.7		nC	$V_{GS} = 0\text{ V}$ , $V_{DS} = 50\text{ V}$
Output Charge	$Q_{OSS}$		21.3		nC	
Reverse Recovery Charge	$Q_{RR}$		0		nC	

(2)  $C_{O(ER)}$  is the fixed capacitance that would give the same stored energy as  $C_{OSS}$  while  $V_{DS}$  is rising from 0 V to the stated  $V_{DS}$

(3)  $C_{O(TR)}$  is the fixed capacitance that would give the same charging time as  $C_{OSS}$  while  $V_{DS}$  is rising from 0 V to the stated  $V_{DS}$ .



GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet

Electrical Characteristics cont'd (Typical values at  $T_j = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{GS} = 6\text{ V}$  unless otherwise noted)

Parameters	Sym.	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Output Capacitance Stored Energy	$E_{OSS}$		0.39		$\mu\text{J}$	$V_{DS} = 50\text{ V}$ $V_{GS} = 0\text{ V}$ $f = 100\text{ kHz}$
Switching Energy during turn-on	$E_{on}$		2.8		$\mu\text{J}$	$V_{DS} = 50\text{ V}$ , $I_{DS} = 20\text{ A}$ $V_{GS} = -3 - 6\text{ V}$ , $R_{G(on)} = 4.7\ \Omega$ , $R_{G(off)} = 1\ \Omega$
Switching Energy during turn-off	$E_{off}$		1.6		$\mu\text{J}$	$L = 28\ \mu\text{H}$ $L_p = 3.8\text{ nH}$ (notes 4, 5)

(4)  $L_p$  is the switching circuit parasitic inductance.

(5) See Figure 16 for switching loss test circuit.



GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet

Electrical Performance Graphs

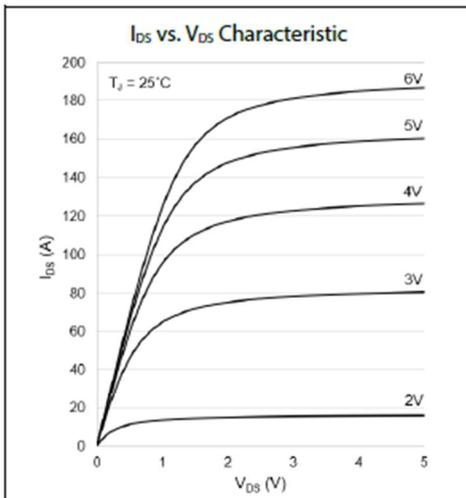


Figure 1: Typical  $I_{DS}$  vs.  $V_{DS}$  @  $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$

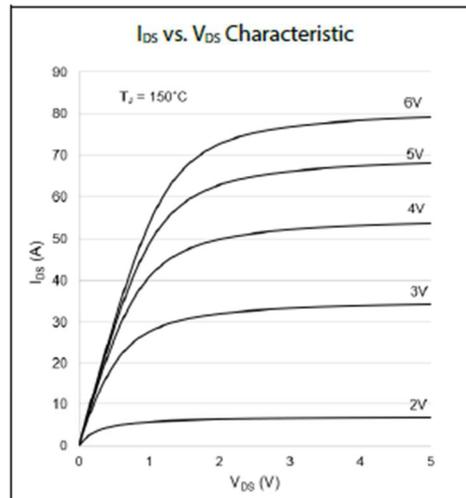


Figure 2: Typical  $I_{DS}$  vs.  $V_{DS}$  @  $T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$

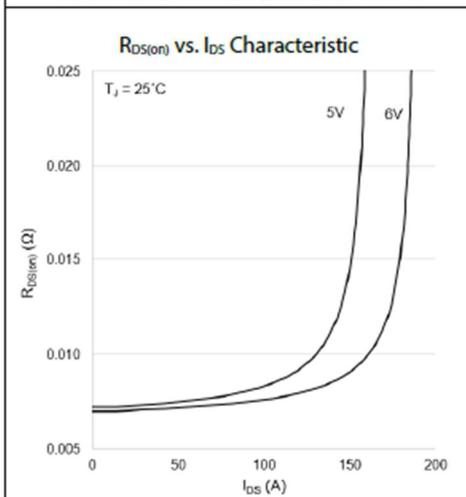


Figure 3:  $R_{DS(on)}$  vs.  $I_{DS}$  at  $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$

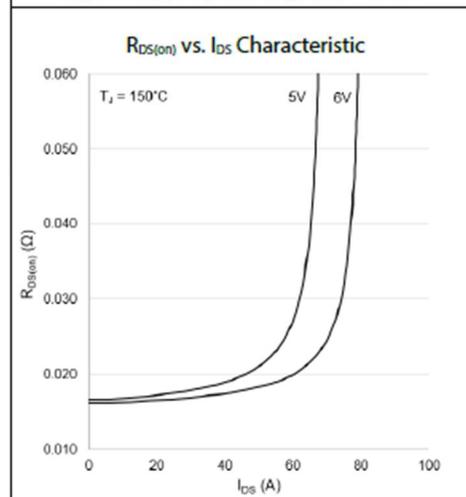
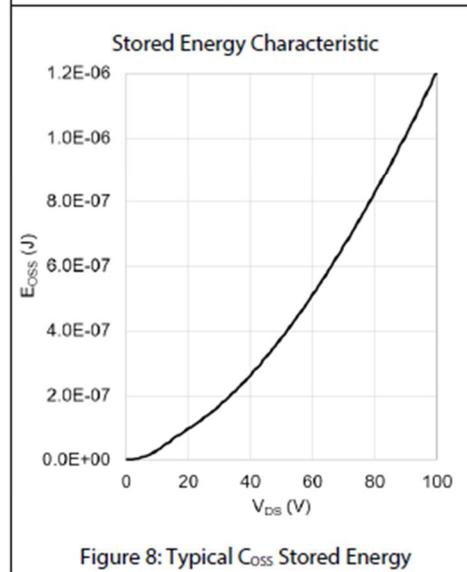
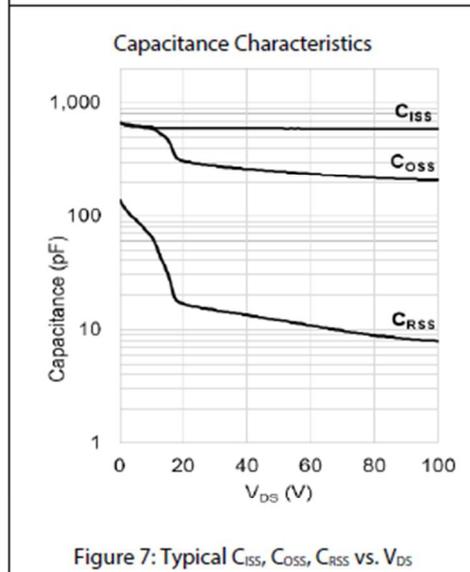
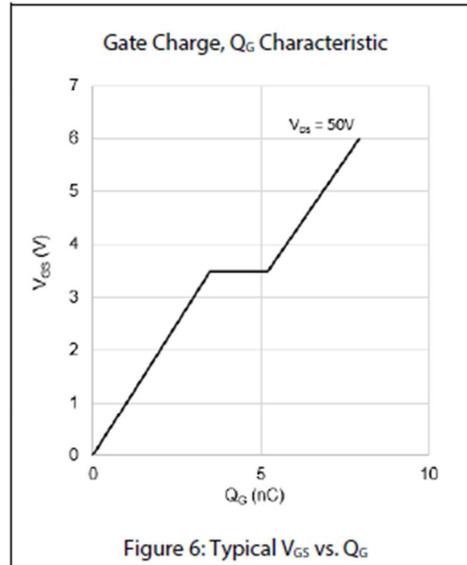
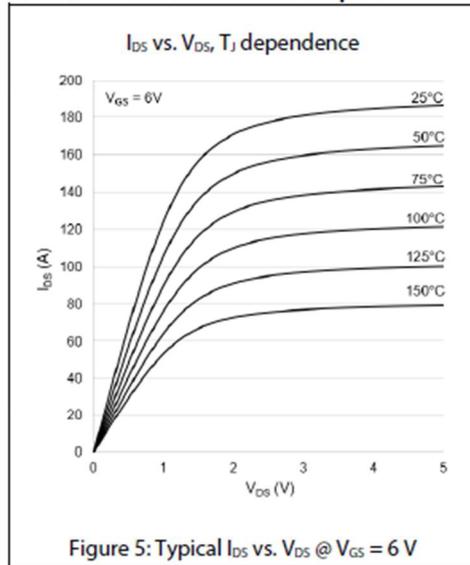


Figure 4:  $R_{DS(on)}$  vs.  $I_{DS}$  at  $T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$



GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet

Electrical Performance Graphs



Rev 200227

© 2009-2020 GaN Systems Inc.

6

This information pertains to a product under development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice.

[Submit Datasheet Feedback](#)



GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet

Electrical Performance Graphs

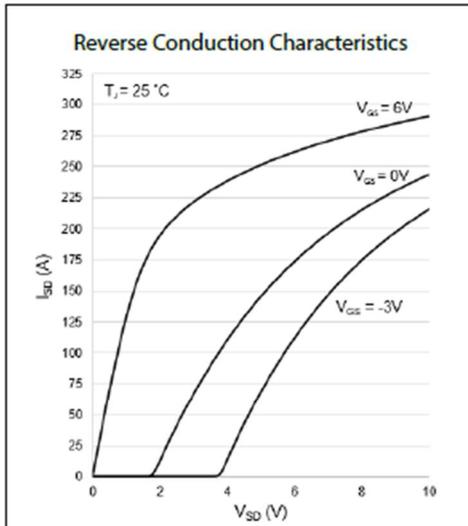


Figure 9: Typical  $I_{SD}$  vs.  $V_{SD}$  at  $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$

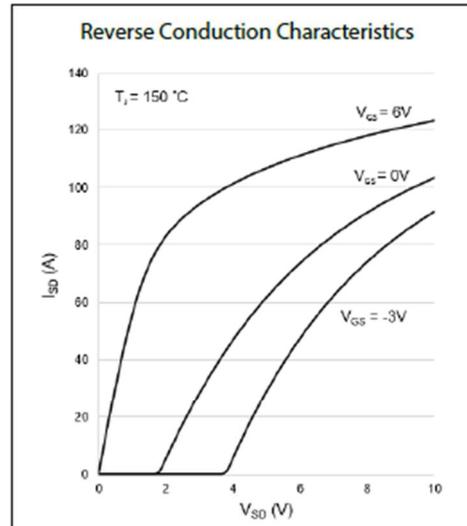


Figure 10: Typical  $I_{SD}$  vs.  $V_{SD}$  at  $T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$

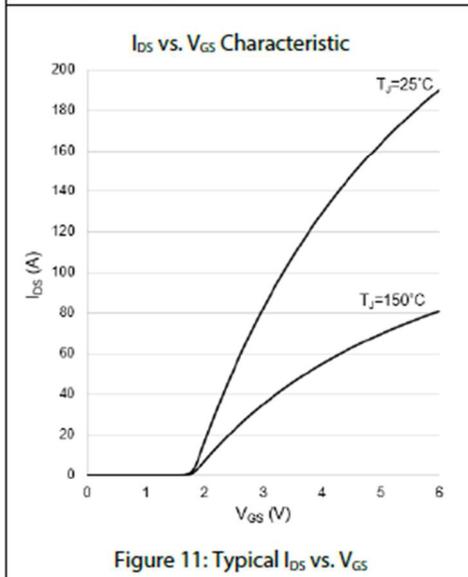


Figure 11: Typical  $I_{DS}$  vs.  $V_{GS}$

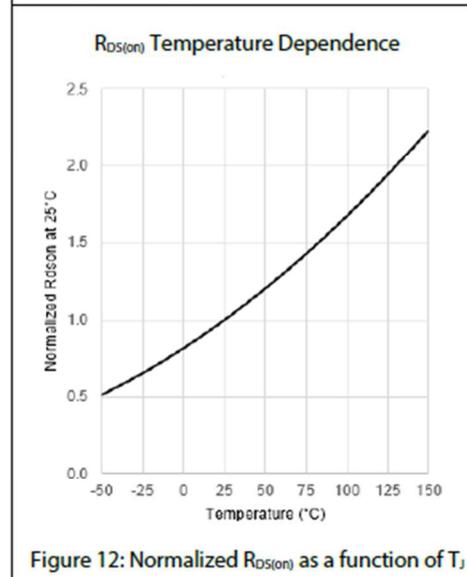


Figure 12: Normalized  $R_{DS(on)}$  as a function of  $T_J$

Rev 200227

© 2009-2020 GaN Systems Inc.

7

This information pertains to a product under development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice.

[Submit Datasheet Feedback](#)



GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet

Thermal Performance Graphs

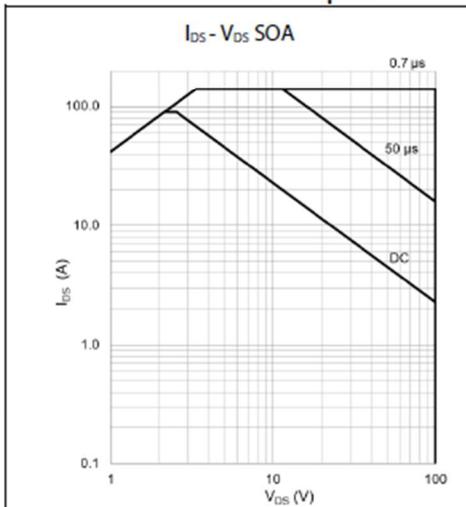


Figure 13: Safe Operating Area @  $T_{case} = 25\text{ °C}$

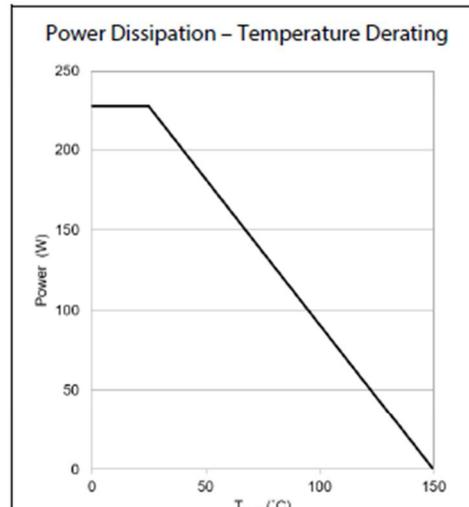


Figure 14: Derating vs. Case Temperature

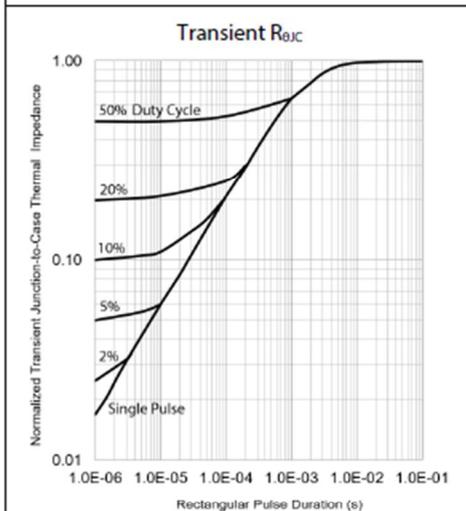


Figure 15: Transient Thermal Impedance  
1.00 = Nominal DC thermal impedance

Rev 200227

© 2009-2020 GaN Systems Inc.

8

This information pertains to a product under development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice.

[Submit Datasheet Feedback](#)

## Test Circuits

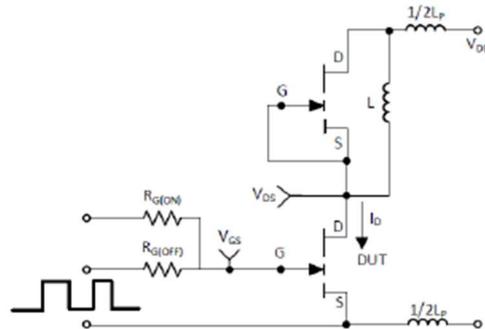


Figure 16: Switching Loss Test Circuit

## Application Information

### Gate Drive

The recommended gate drive voltage range,  $V_{GS}$ , is 0 V to +6 V for optimal  $R_{DS(on)}$  performance. Also, the repetitive gate to source voltage, maximum rating,  $V_{GS(A-C)}$ , is +7 V to -10 V. The gate can survive non-repetitive transients up to +10 V and -20 V for pulses up to 1  $\mu$ s. These specifications allow designers to easily use 6.0 V or 6.5 V gate drive settings. At 6 V gate drive voltage, the enhancement mode high electron mobility transistor (E-HEMT) is fully enhanced and reaches its optimal efficiency point. A 5 V gate drive can be used but may result in lower operating efficiency. Inherently, GaN Systems E-HEMT do not require negative gate bias to turn off. Negative gate bias, typically  $V_{GS} = -3$  V, ensures safe operation against the voltage spike on the gate, however it may increase reverse conduction losses if not driven properly. For more details, please refer to the gate driver application note "GN001 How to Drive GaN Enhancement Mode Power Switching Transistors" at [www.gansystems.com](http://www.gansystems.com)

Similar to a silicon MOSFET, the external gate resistor can be used to control the switching speed and slew rate. Adjusting the resistor to achieve the desired slew rate may be needed. Lower turn-off gate resistance,  $R_{G(OFF)}$  is recommended for better immunity to cross conduction. Please see the gate driver application note (GN001) for more details.

A standard MOSFET driver can be used as long as it supports 6V for gate drive and the UVLO is suitable for 6V operation. Gate drivers with low impedance and high peak current are recommended for fast switching speed. GaN Systems E-HEMTs have significantly lower  $Q_G$  when compared to equally sized  $R_{DS(on)}$  MOSFETs, so high speed can be reached with smaller and lower cost gate drivers.

GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet

Many non-isolated half bridge MOSFET drivers are not compatible with 6 V gate drive for GaN enhancement mode HEMT due to their high under-voltage lockout threshold. Also, a simple bootstrap method for high side gate drive will not be able to provide tight tolerance on the gate voltage. Therefore, special care should be taken when you select and use the half bridge drivers. Alternatively, isolated drivers can be used for a high side device. Please see the gate driver application note (GN001) for more details.

**Parallel Operation**

The dual gate drive pins are used to achieve balanced gate drive, especially useful in parallel GaN transistors operation. Both gate drive pins are internally connected to the gate, so only one needs to be connected. Connecting both may lead to timing improvements at very high frequencies. The two gates on the GS61008T top-side cooled device are not designed to be used as a signal pass-through. When multiple devices are used in parallel, it is not recommended to use one gate connection to the other (on the same transistor) as a signal path for the gate drive to the next device. Design wide tracks or polygons on the PCB to distribute the gate drive signals to multiple devices. Keep the drive loop length to each device as short and equal length as possible. GaN enhancement mode HEMTs have a positive temperature coefficient on-state resistance which helps to balance the current. However, special care should be taken in the driver circuit and PCB layout since the device switches at very fast speed. It is recommended to have a symmetric PCB layout and equal gate drive loop length (star connection if possible) on all parallel devices to ensure balanced dynamic current sharing. Adding a small gate resistor (1-2  $\Omega$ ) on each gate is strongly recommended to minimize the gate parasitic oscillation.

**Source Sensing**

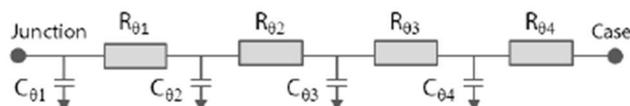
Although the GS61008T does not have a dedicated source sense pin, the GaN<sub>FX</sub>® packaging utilizes no wire bonds so the source connection is already very low inductance. By simply using a dedicated "source sense" connection on the PCB to the Source pad in a kelvin configuration, the function can easily be implemented. It is recommended to implement a "source sense" connection to improve drive performance.

**Thermal**

The substrate is internally connected to the thermal pad on the top-side and to the source pin on the bottom side of the GS61008T. The transistor is designed to be cooled using a heat sink on the top of the device. The Drain and Source pads are not as thermally conductive as a thermal pad. However, adding more copper under these two pads will improve thermal performance by reducing the packaging temperature.

**Thermal Modeling**

RC thermal models are available to support detailed thermal simulation using SPICE. The thermal models are created using the Cauer model, an RC network model that reflects the real physical property and packaging structure of our devices. This thermal model can be extended to the system level by adding extra  $R_{\theta}$  and  $C_{\theta}$  to simulate the Thermal Interface Material (TIM) or Heatsink.

**RC Thermal Model:**

Rev 200227

© 2009-2020 GaN Systems Inc.

10

This information pertains to a product under development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice.

[Submit Datasheet Feedback](#)

GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary DatasheetRC breakdown of  $R_{\theta JC}$ 

$R_{\theta}$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )	$C_{\theta}$ ( $\text{W}\cdot\text{s}/^{\circ}\text{C}$ )
$R_{\theta 1} = 0.017$	$C_{\theta 1} = 7.0\text{E-}05$
$R_{\theta 2} = 0.253$	$C_{\theta 2} = 6.7\text{E-}04$
$R_{\theta 3} = 0.264$	$C_{\theta 3} = 5.9\text{E-}03$
$R_{\theta 4} = 0.016$	$C_{\theta 4} = 1.8\text{E-}03$

For more detail, please refer to Application Note GN007 "Modeling Thermal Behavior of GaN Systems' GaNPX® Using RC Thermal SPICE Models" available at [www.gansystems.com](http://www.gansystems.com).

**Reverse Conduction**

GaN Systems enhancement mode HEMTs do not have an intrinsic body diode and there is zero reverse recovery charge. The devices are naturally capable of reverse conduction and exhibit different characteristics depending on the gate voltage. Anti-parallel diodes are not required for GaN Systems transistors as is the case for IGBTs to achieve reverse conduction performance.

On-state condition ( $V_{GS} = +6\text{ V}$ ): The reverse conduction characteristics of a GaN Systems enhancement mode HEMT in the on-state is similar to that of a silicon MOSFET, with the I-V curve symmetrical about the origin and it exhibits a channel resistance,  $R_{DS(on)}$ , similar to forward conduction operation.

Off-state condition ( $V_{GS} \leq 0\text{ V}$ ): The reverse characteristics in the off-state are different from silicon MOSFET as the GaN device has no body diode. In the reverse direction, the device starts to conduct when the gate voltage, with respect to the drain, ( $V_{GD}$ ) exceeds the gate threshold voltage. At this point the device exhibits a channel resistance. This condition can be modeled as a "body diode" with slightly higher  $V_F$  and no reverse recovery charge.

If negative gate voltage is used in the off-state, the source-drain voltage must be higher than  $V_{GS(th)} + V_{GS(off)}$  in order to turn the device on. Therefore, a negative gate voltage will add to the reverse voltage drop " $V_F$ " and hence increase the reverse conduction loss.

**Blocking Voltage**

The blocking voltage rating,  $V_{BI,DOSS}$ , is defined by the drain leakage current. The hard (unrecoverable) breakdown voltage is approximately 30 % higher than the rated  $V_{BI,DOSS}$ . As a general practice, the maximum drain voltage should be de-rated in a similar manner as IGBTs or silicon MOSFETs. All GaN E-HEMTs do not avalanche and thus do not have an avalanche breakdown rating. The maximum drain-to-source rating is 100 V and does not change with negative gate voltage. GaN Systems tests devices in production with a 120V Drain-to-source voltage pulse to insure blocking voltage margin.



## GS61008T Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor Preliminary Datasheet

### Packaging and Soldering

The package material is high temperature epoxy-based PCB material which is similar to FR4 but has a higher temperature rating, thus allowing the GS61008T device to be specified to 150 °C. The device can handle at least 3 reflow cycles.

It is recommended to use the reflow profile in IPC/JEDEC J-STD-020 REV D.1 (March 2008)

The basic temperature profiles for Pb-free (Sn-Ag-Cu) assembly are:

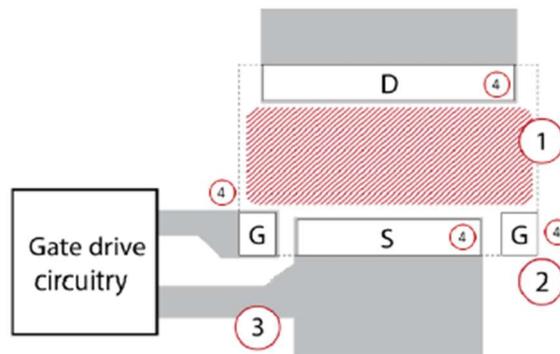
- Preheat/Soak: 60 - 120 seconds.  $T_{min} = 150\text{ °C}$ ,  $T_{max} = 200\text{ °C}$ .
- Reflow: Ramp up rate 3°C/s maximum. Peak temperature is 260 °C and time within 5 °C of peak temperature is 30 seconds.
- Cool down: Ramp down rate 6 °C/s maximum.

Using "No-Clean" soldering paste and operating at high temperatures may cause a reactivation of the "No-Clean" flux residues. In extreme conditions, unwanted conduction paths may be created. Therefore, when the product operates at greater than 100 °C it is recommended to also clean the "No-Clean" paste residues.

Avoid placing printed circuit board traces with high differential voltage to the source or drain directly underneath the top-cooled GS66508T package on the PCB to avoid potential electro-migration and solder mask isolation issues during high temperature or/and voltage operation

GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet**Routing Guidelines**

The following layout recommendations are highlighted. Additional detail is provided in Application Note GN001 at [www.gansystems.com](http://www.gansystems.com).

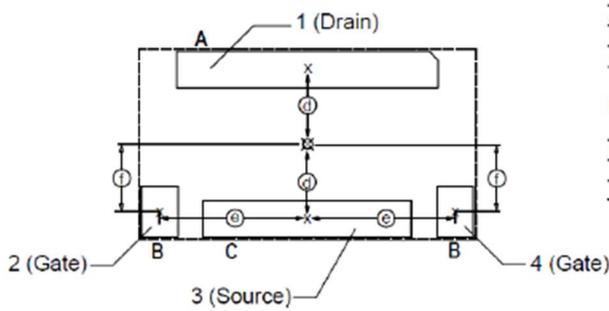


- ① **Keep out area:** Avoid placing traces or vias on the top layer of the PCB, directly underneath the GS61008T package. This is to prevent potential electro-migration and solder mask isolation issues during high temperature or/and voltage operation.
- ② **Symmetrical dual gates** are provided for flexible layout and easy paralleling. Either gate drive can be used. If the second gate is not used, it should be left floating.
- ③ A separate Source Sense pin is not provided on our top-side products because of the ultra-low inductance of our GaN<sub>px</sub>® packaging. The Source Sense pin functionality can be implemented simply by routing a Kelvin connection at the side of the Source pad. This can be done at either side of the source pad for layout optimization.
- ④ Do not route vias within the Gate pad as it may affect long term solder joint reliability. For other pads, it is recommended to implement filled vias for better solder joint reliability.



GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet

Recommended PCB Footprint



Pad sizes

	mm		Inches	
	X (width)	Y (height)	X (width)	Y (height)
A	5.40	0.75	0.213	0.030
B	0.75	1.05	0.030	0.040
C	4.30	0.75	0.170	0.030

Dimensions

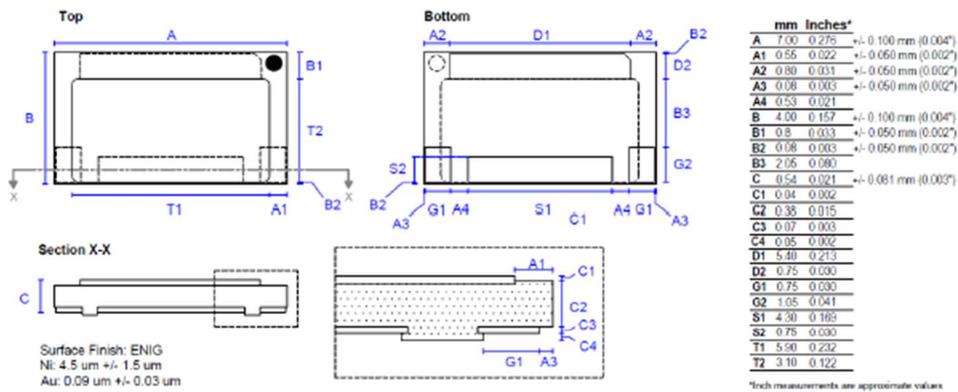
	mm	Inches
d	1.57	0.062
e	3.05	0.120
f	1.40	0.056

- PCB pad openings
- Package outline

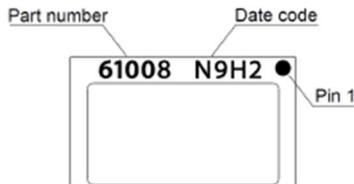


GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet

Package Dimensions



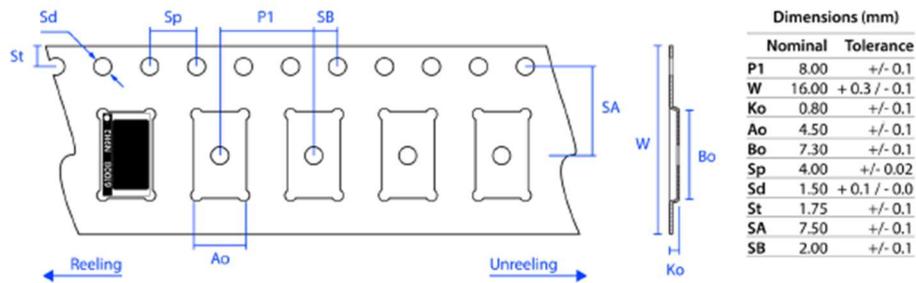
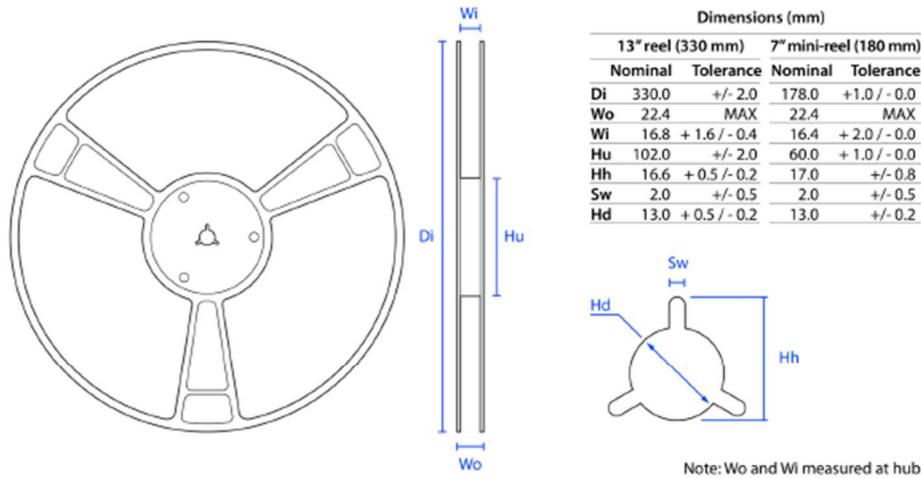
Part Marking





GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet

Tape and Reel Information



Rev 200227

© 2009-2020 GaN Systems Inc.

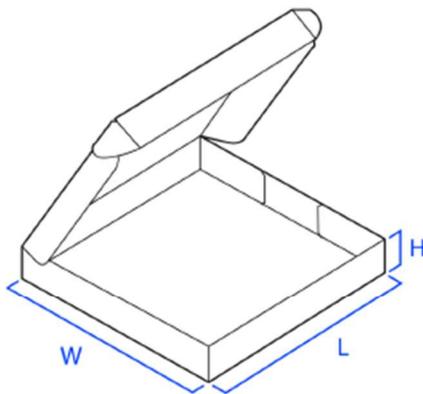
16

This information pertains to a product under development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice.

[Submit Datasheet Feedback](#)

GS61008T  
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor  
Preliminary Datasheet

## Tape and Reel Box Dimensions



## Outside dimensions (mm)

	7" mini-reel	13" tape-reel
W	206.5	340
L	218.5	355
H	32	50

[www.gansystems.com](http://www.gansystems.com)

**Important Notice** – Unless expressly approved in writing by an authorized representative of GaN Systems, GaN Systems components are not designed, authorized or warranted for use in lifesaving, life sustaining, military, aircraft, or space applications, nor in products or systems where failure or malfunction may result in personal injury, death, or property or environmental damage. The information given in this document shall not in any event be regarded as a guarantee of performance. GaN Systems hereby disclaims any or all warranties and liabilities of any kind, including but not limited to warranties of non-infringement of intellectual property rights. All other brand and product names are trademarks or registered trademarks of their respective owners. Information provided herein is intended as a guide only and is subject to change without notice. The information contained herein or any use of such information does not grant, explicitly, or implicitly, to any party any patent rights, licenses, or any other intellectual property rights. GaN Systems standard terms and conditions apply. All rights reserved.

Rev 200227

© 2009-2020 GaN Systems Inc.

17

This information pertains to a product under development. Its characteristics and specifications are subject to change without notice.

[Submit Datasheet Feedback](#)

b. TIM

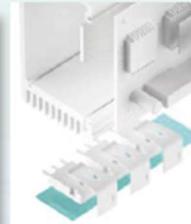
SILICONE FOILS / CAPS

**SILICONE FOIL TFO-X-SI**

fibreglass reinforced



TFO-X-SI is a high performance electrically insulating thermally conductive silicone foil for an optimised thermal coupling between electronic packages and heat sinks. Through the specific formulation and filling with highly thermally conductive ceramic particles an excellent thermal conductivity is reached. Its conformal surface structure guarantees a very good compliance to the contact surfaces. Thus the total thermal resistance is minimised. The fibreglass reinforcement provides for an outstanding mechanic stability and cutthrough resistance as well as easy handling. For an easy and reliable preassembly the interface material is available with low tack pressure sensitive adhesive on one side.



**PROPERTIES**

- Thermal conductivity: 5.0 W/mK
- High surface compliance
- Excellent thermal contact
- Outstanding mechanic stability through fibreglass reinforcement
- Extraordinary chemical resistance and longterm stability
- Residue-free removal after use

**AVAILABILITY**

- Sheet 440 x 510 mm
- Non tacky
- (TFO-XXXX-SI)
- Tacky on one side (TFO-XXXX-SI-A1)
- Die cut parts
- Kiss cut parts on sheet

**APPLICATION EXAMPLES**

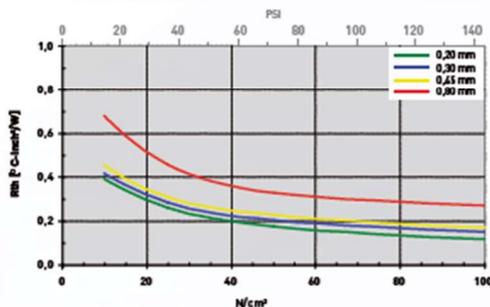
- Thermal link of:
- MOSFETs or IGBTs
  - Power diodes or AC/DC converters
  - Power modules
- For use in Switch mode power supplies / Motor control units / Automotive engine management systems / UPS units / Solar systems

Property	Unit	TFO-X200-SI	TFO-X300-SI	TFO-X450-SI	TFO-X800-SI
<b>Material</b>		Ceramic filled silicone	Ceramic filled silicone	Ceramic filled silicone	Ceramic filled silicone
Colour		White	White	White	White
Reinforcement		Fibreglass	Fibreglass	Fibreglass	Fibreglass
Thickness	mm	0.20	0.30	0.45	0.80
Tensile Strength <sup>1</sup>	kpsi	1.3	1.2	0.7	0.6
UL Flammability	UL 94	V0	V0	V0	V0
RoHS Conformity	2011 / 65 / EU	Yes	Yes	Yes	Yes
<b>Thermal</b>					
Resistance <sup>2</sup> @ 150 PSI	°C-inch <sup>2</sup> /W	0.11	0.15	0.17	0.27
Resistance <sup>2</sup> @ 30 PSI	°C-inch <sup>2</sup> /W	0.29	0.32	0.35	0.52
Thermal Conductivity	W/mK	5.0	5.0	5.0	5.0
Operating Temperature Range	°C	- 50 to + 200			
<b>Electrical</b>					
Breakdown Voltage <sup>3</sup>	KV AC	3.0	6.0	9.0	> 10
Volume Resistivity	Ohm - cm	1.7 x 10 <sup>15</sup>	7.9 x 10 <sup>15</sup>	9.2 x 10 <sup>15</sup>	8.9 x 10 <sup>15</sup>
Dielectric Constant @ 1 MHz		3.3	3.3	3.3	3.3

Measurement technique according to: <sup>1</sup> ASTM D 412, <sup>2</sup> ASTM D 5470, <sup>3</sup> ASTM D 169. All data without warranty and subject to change. Please contact us for further data and information. Shelf life adhesive: 6 months when stored in original packaging at room temperature and 50% relative humidity.

Thicknesses: 0.08 mm / 0.20 mm / 0.30 mm / 0.45 mm / 0.80 mm

Rth vs. N/cm<sup>2</sup> (PSI)



HALA Contec GmbH & Co. KG / Hans-Böckler-Straße 15 / D-73230 Kirchheim u.T. / Fon +49 7021 73141-0 / Fax +49 7021 73141-99 / contec@hala-tec.de / www.hala-tec.de

c. Ventiladores

02/10/2018

HF35 - Malico Inc.

## Heat Sink

Home About Malico All Heat Sink ShowRoom Warranty Technical Info. Contact Us

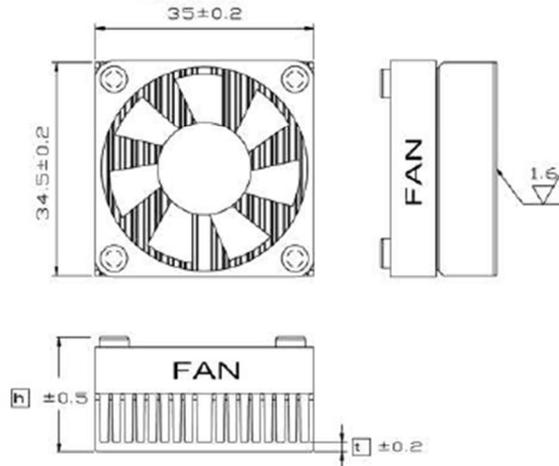
Home >> All Heat Sink >> Standard Heat Sink >> Active Heat Sink >> HF

search...

**:: HF35 :: Dimension**

Model No.	Height (mm)	Thickness (mm)	Weight (grams)	Rth ( °C/W )	CAD	Attachment
HF35-15	15	1.7	19.0	2.03	By request	Clip , Tape
HF35-18	18	1.7	22.0	1.87	By request	Clip , Tape
HF35-21	21	1.7	24.8	1.65	By request	Clip , Tape

Dimensions: mm Material : AL6063 Finish :black anodize



**:: Fan ::**

Dimension	Bearing	Voltage (VDC)	Speed (RPM)	Air Flow (CFM)	Noise (dBA)
35 x 35 x 6.9mm	VAPO	5V	7600	5.5	26

Remarks:

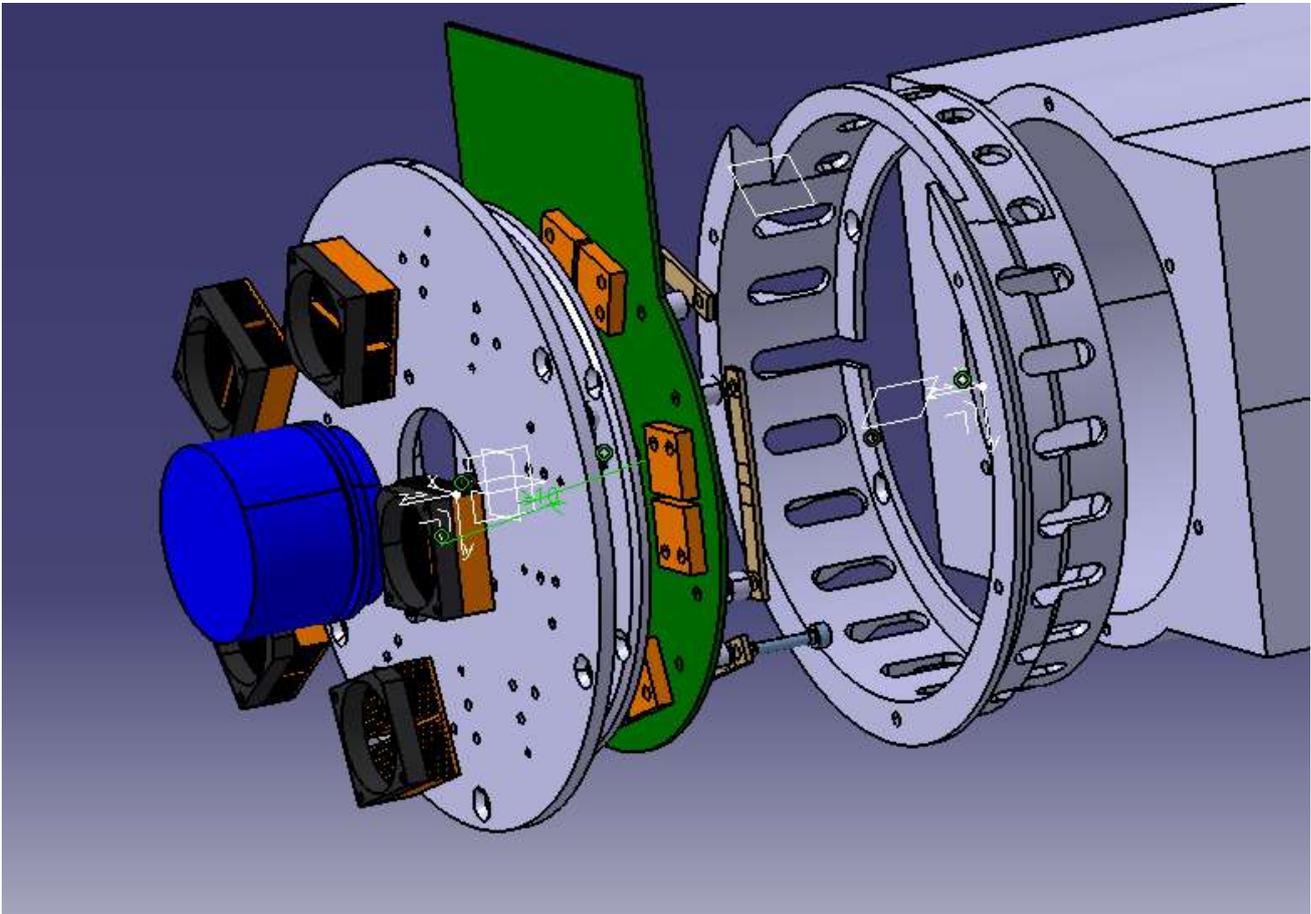
- 1) Standard wire length 300mm.
- 2) Connector Molex 2695-3P or equivalent

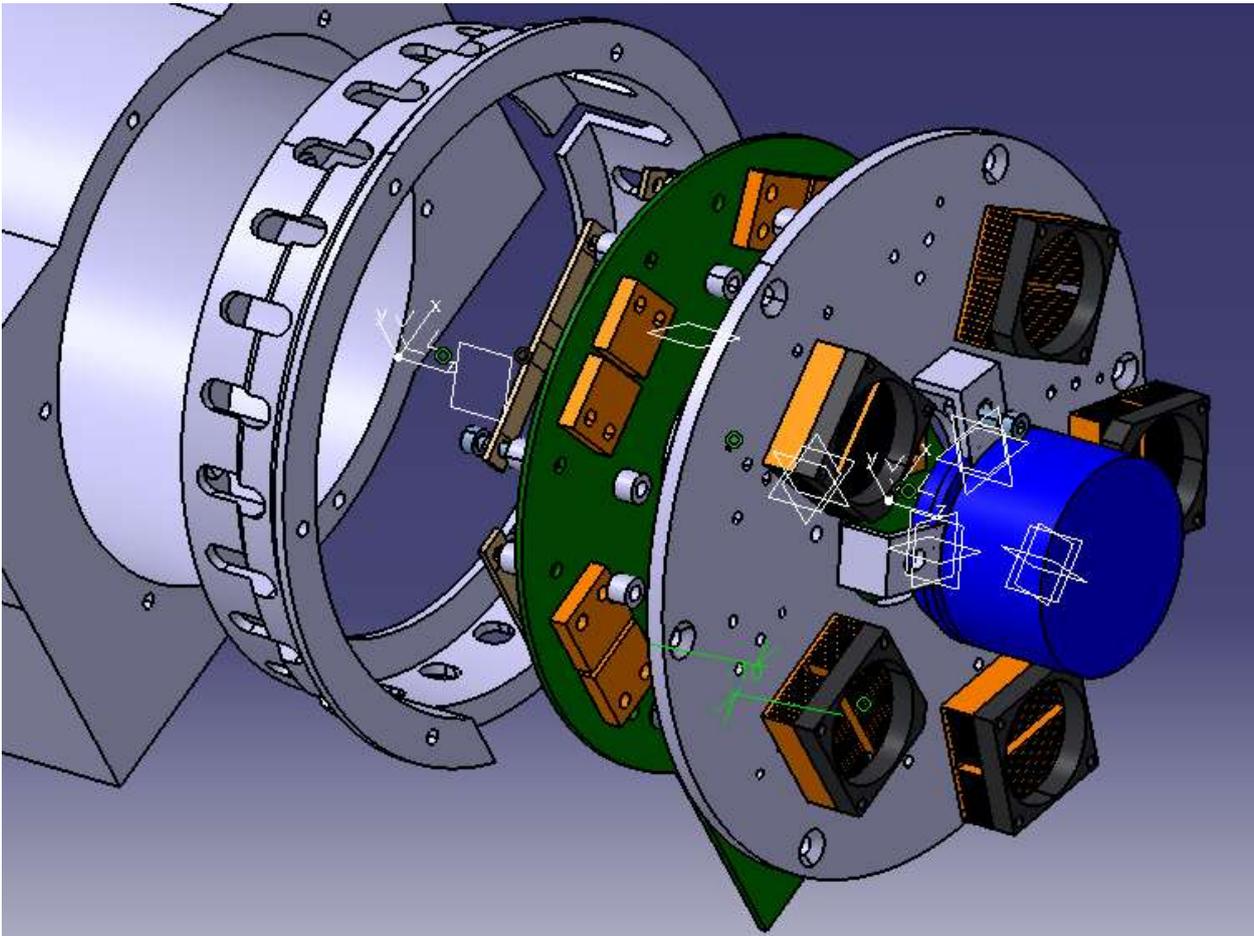
Copyright © 2009 Malico Inc. All trademarks or registered trademarks are the property of their respective holders.

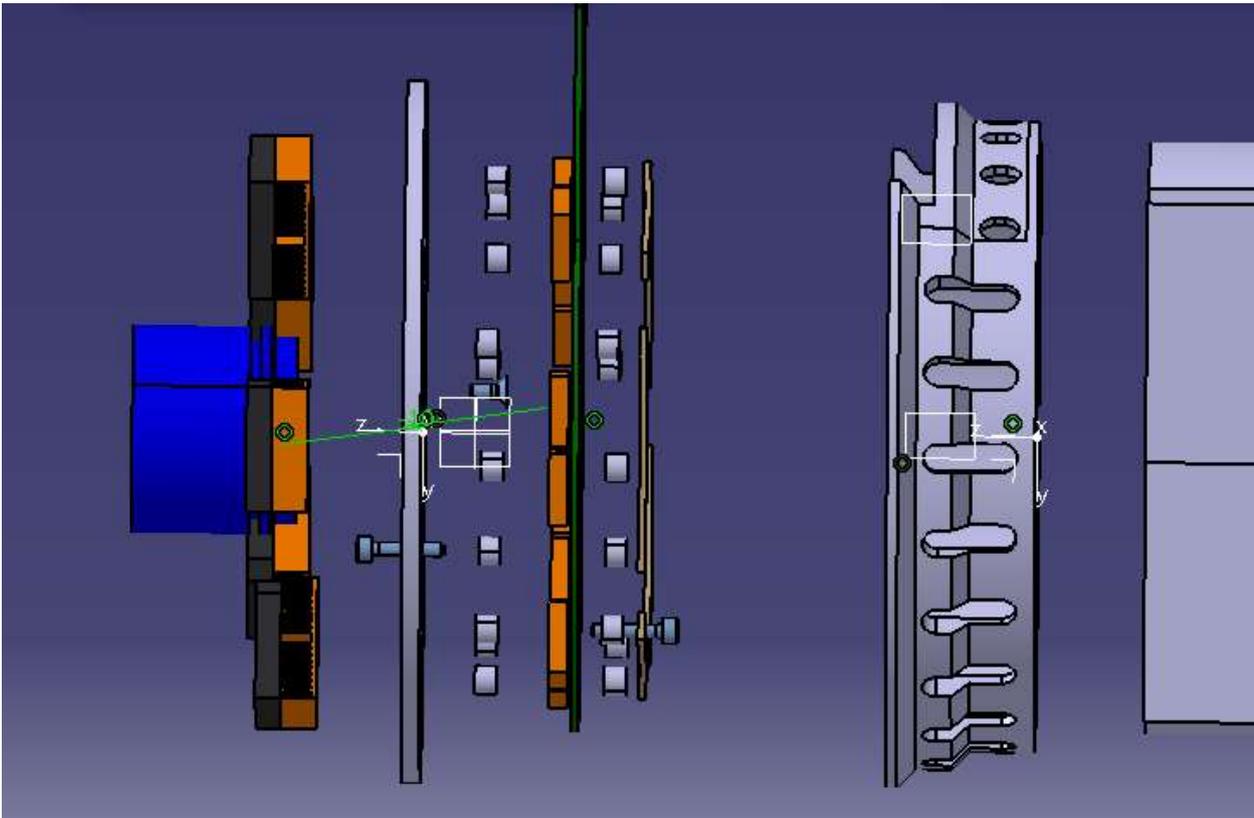


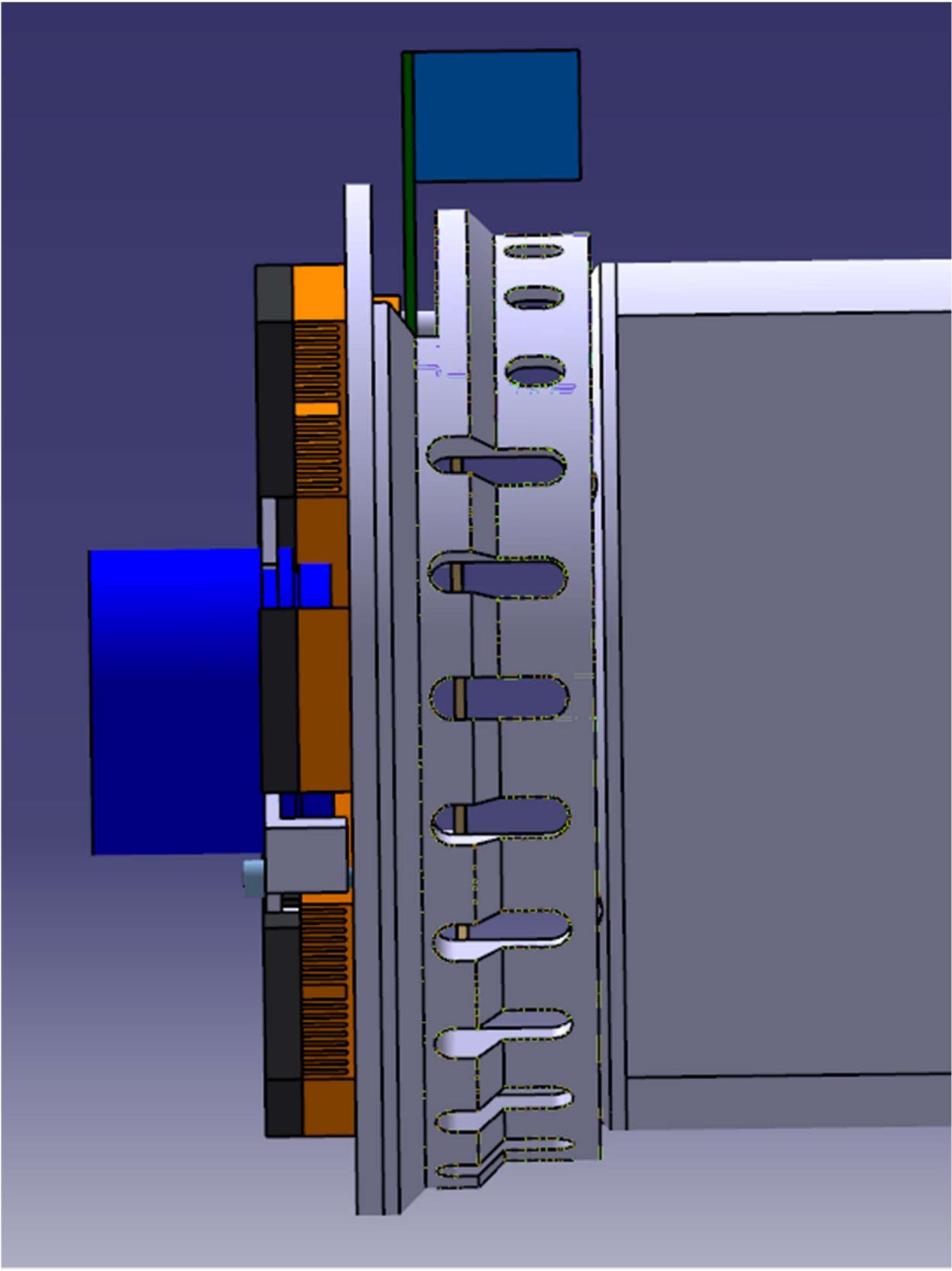
## ANEXO III

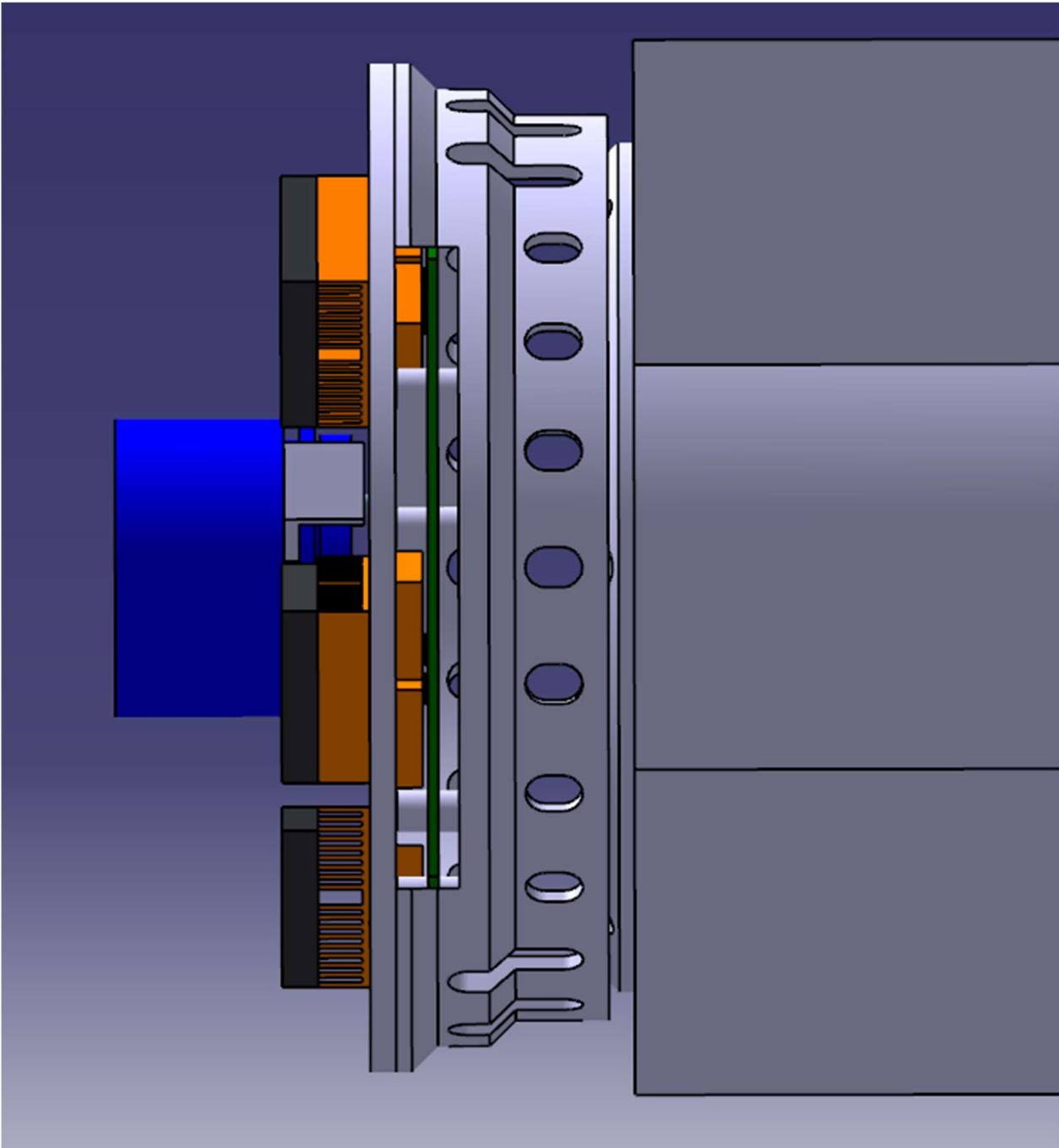
### a. Vistas adicionales

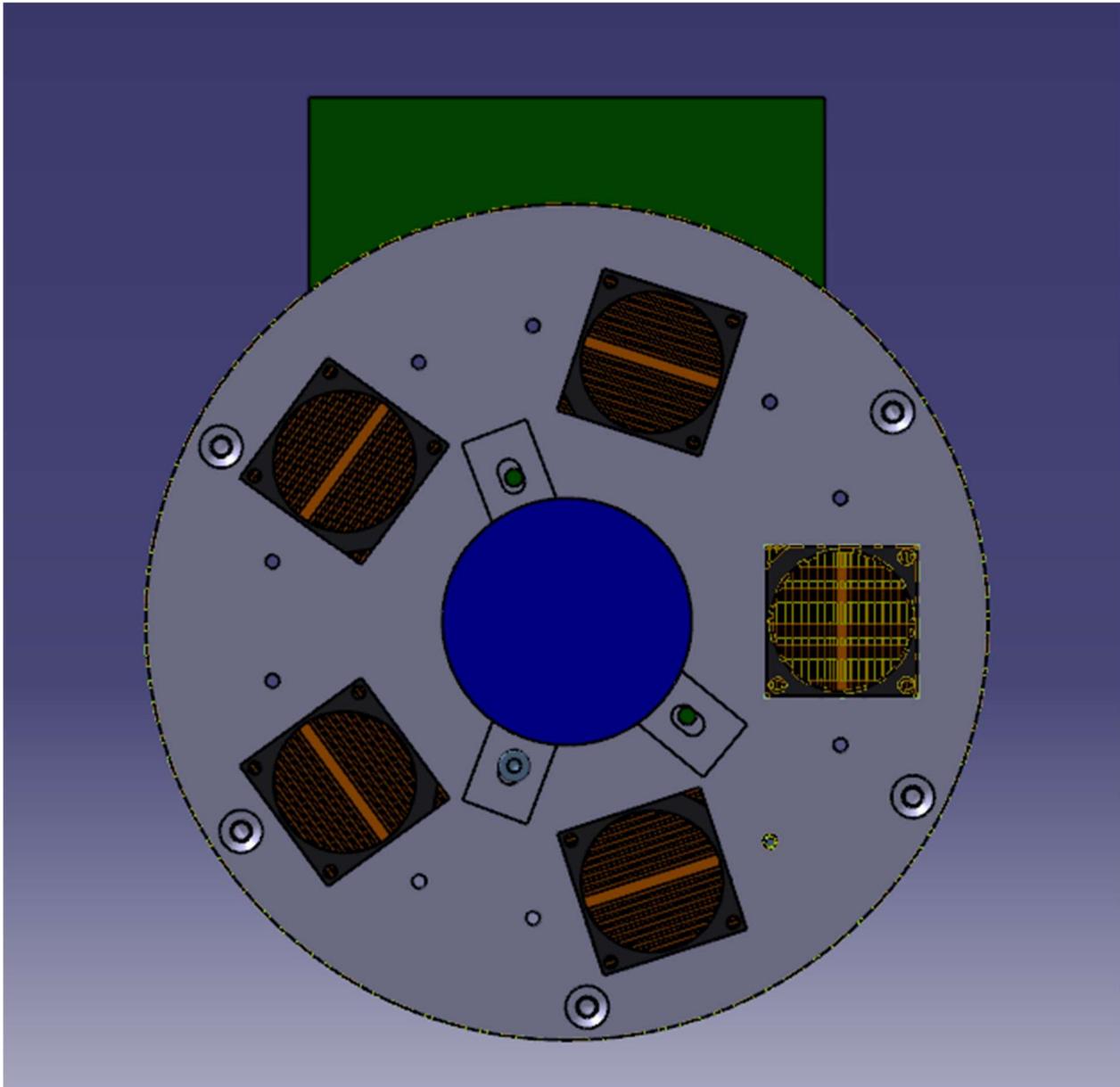


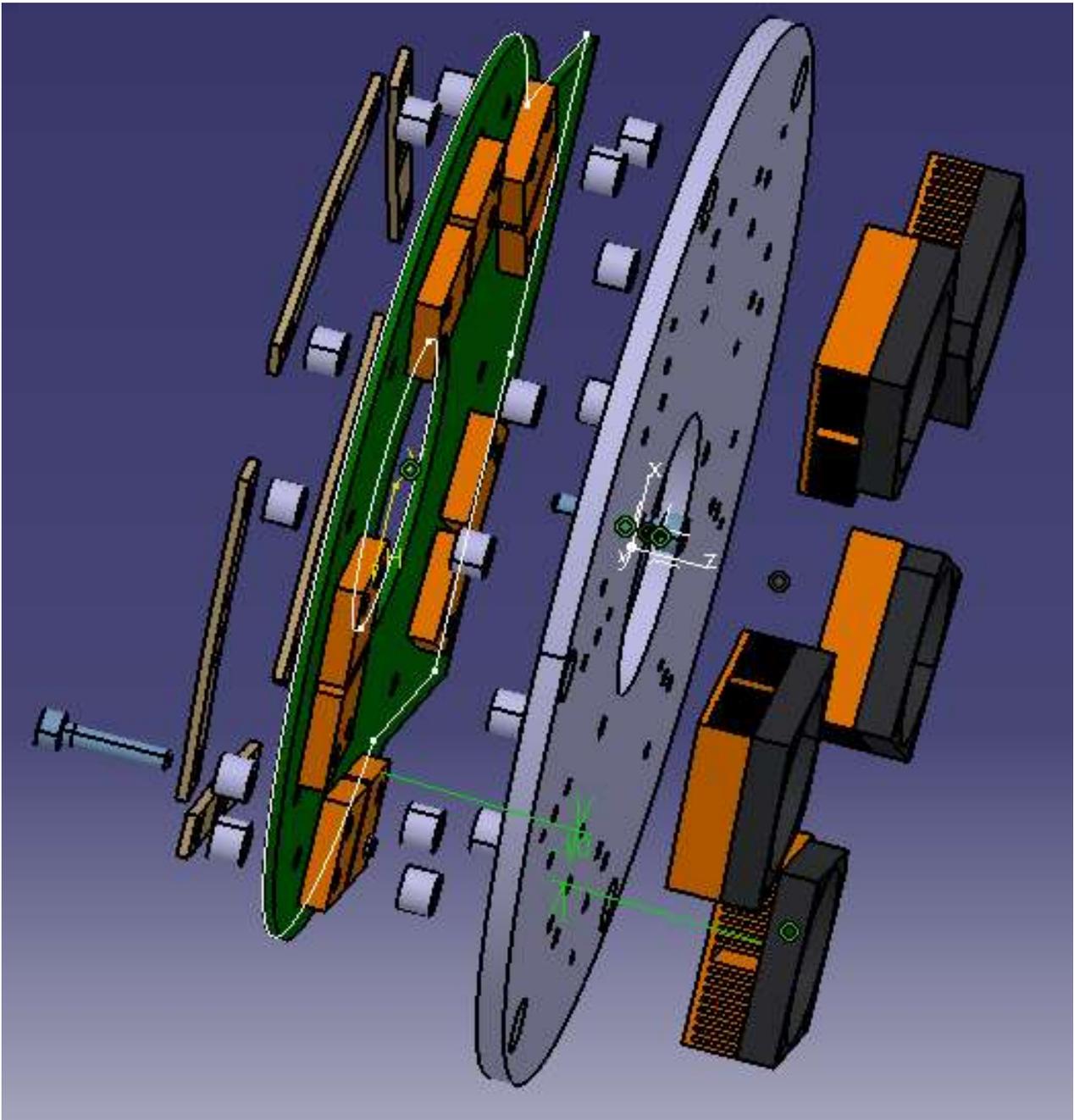


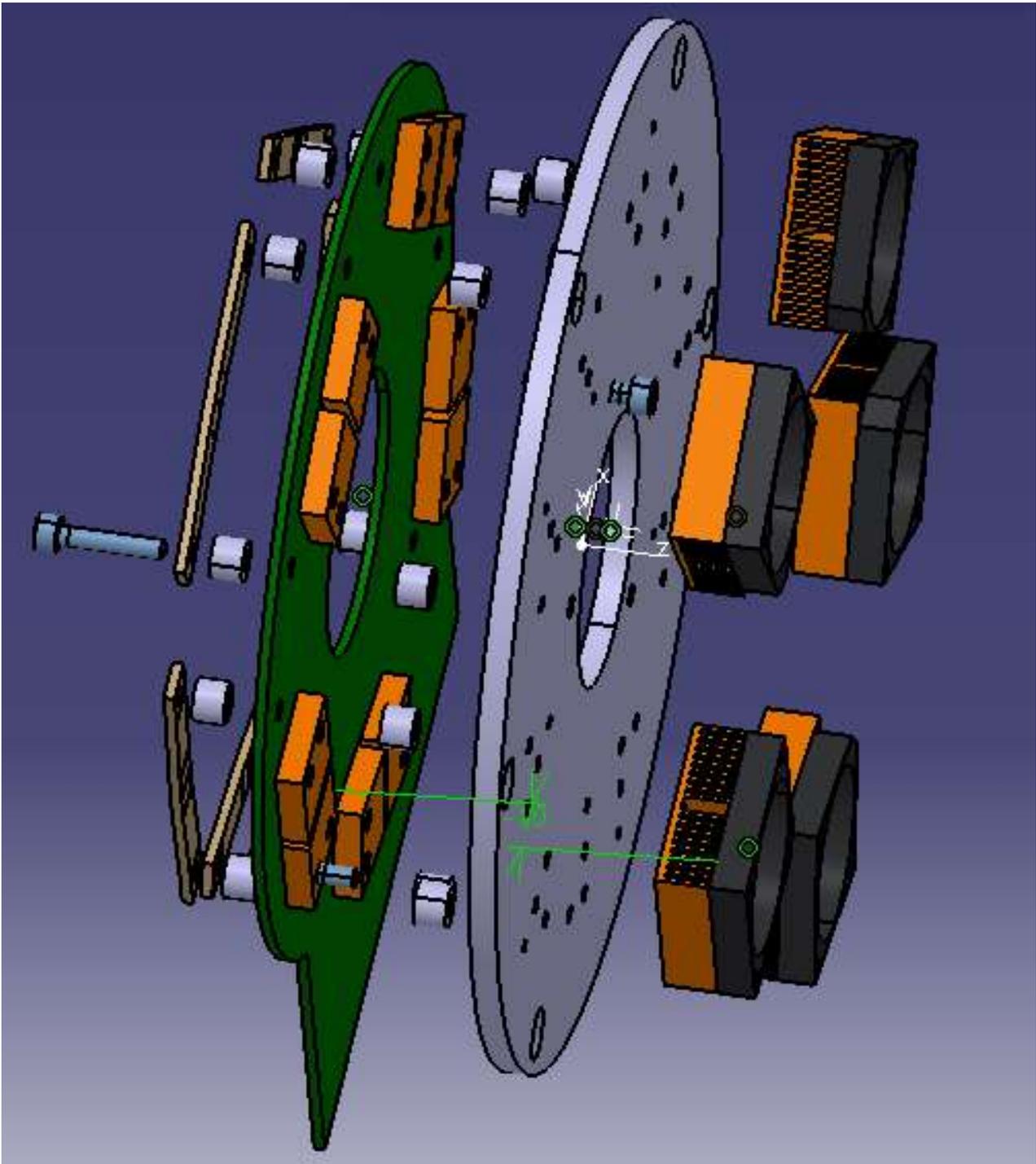


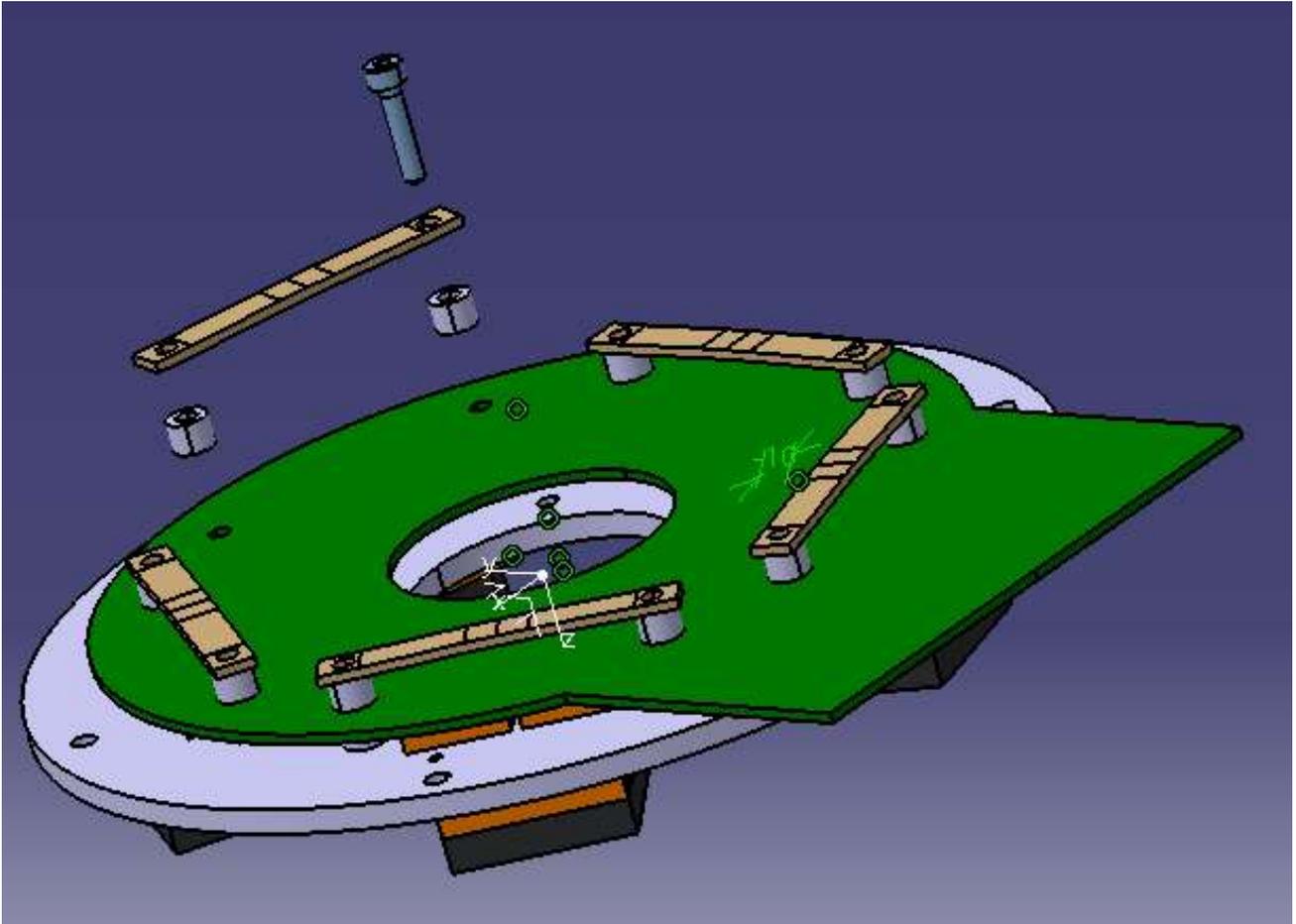


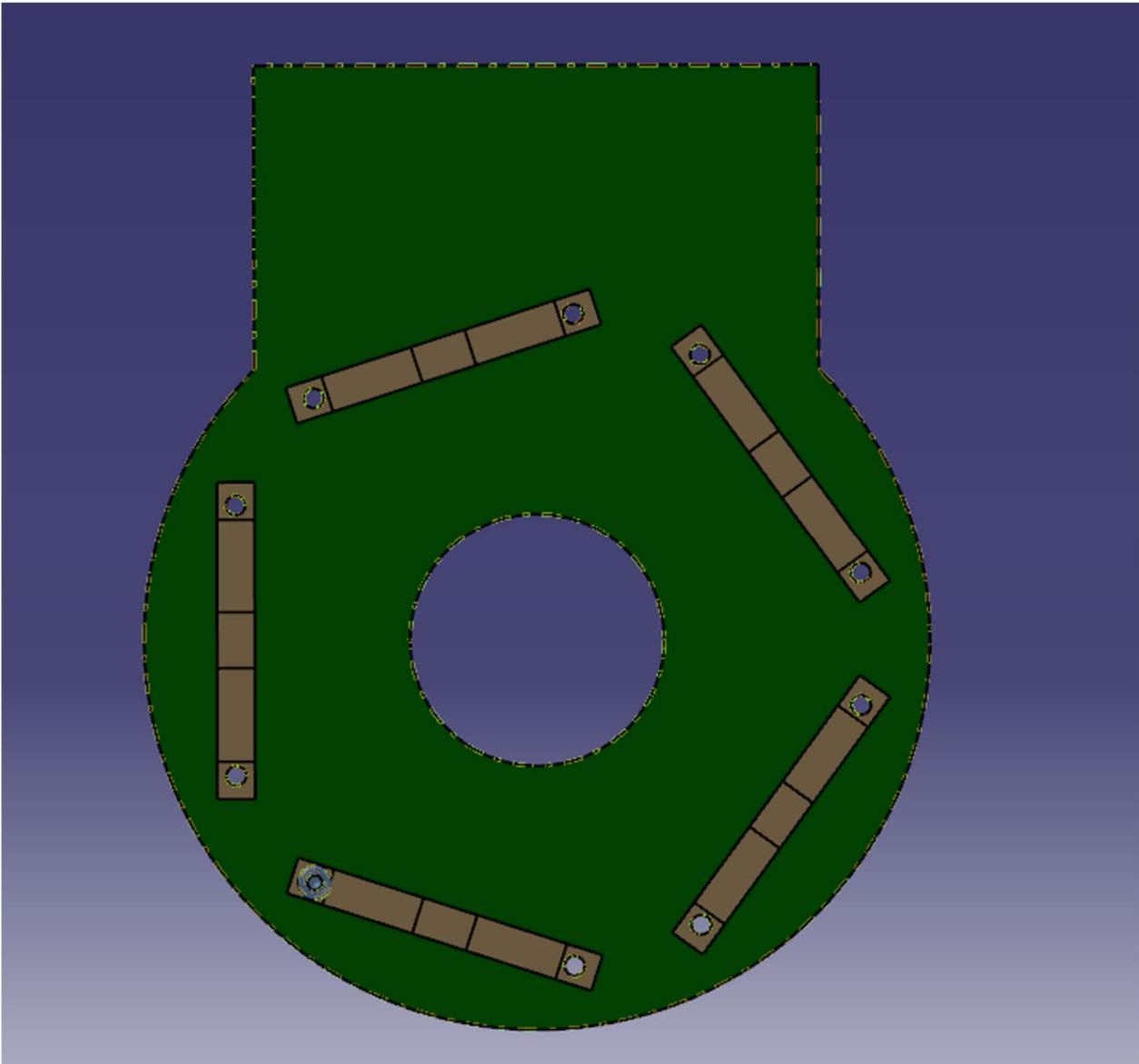


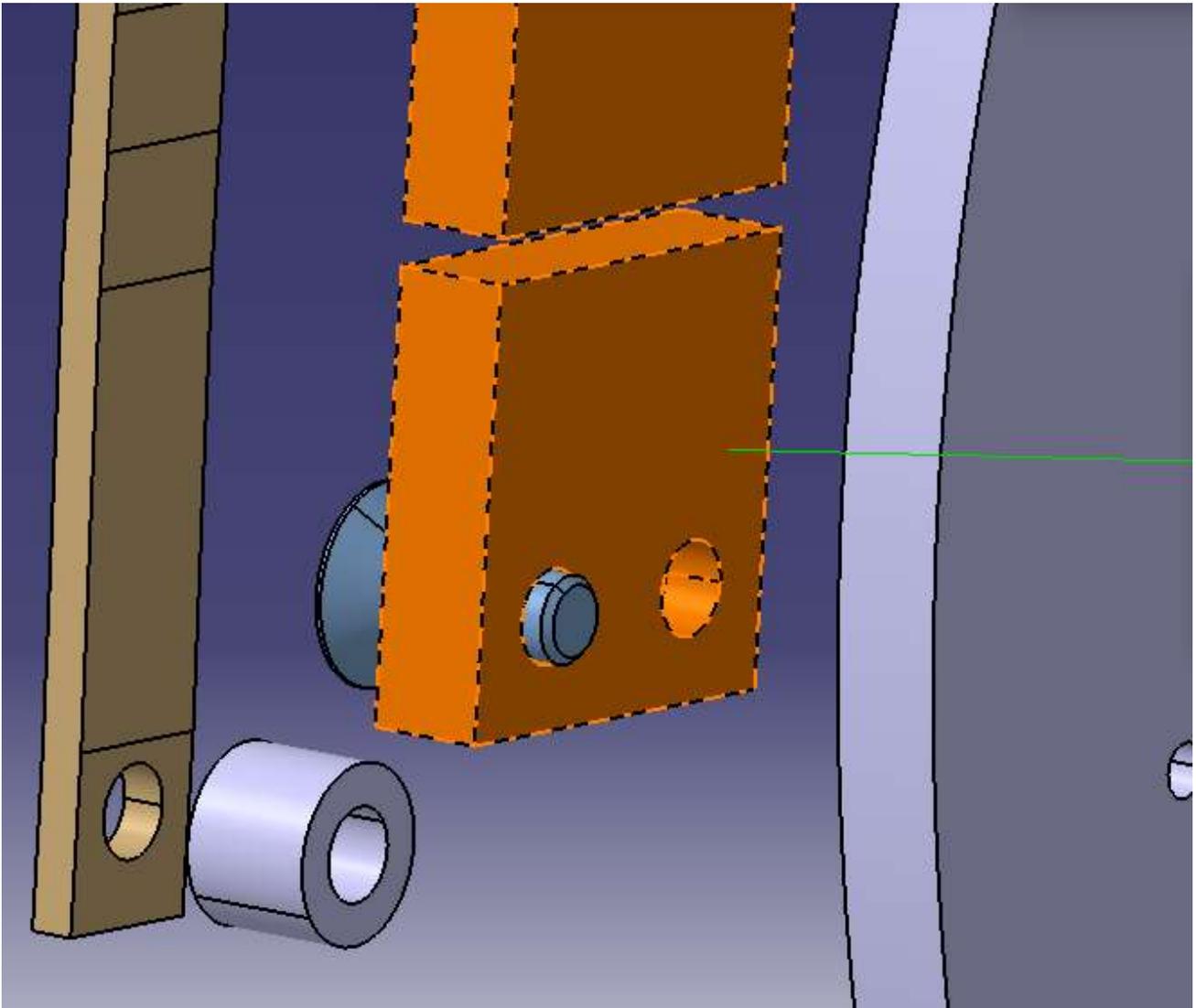


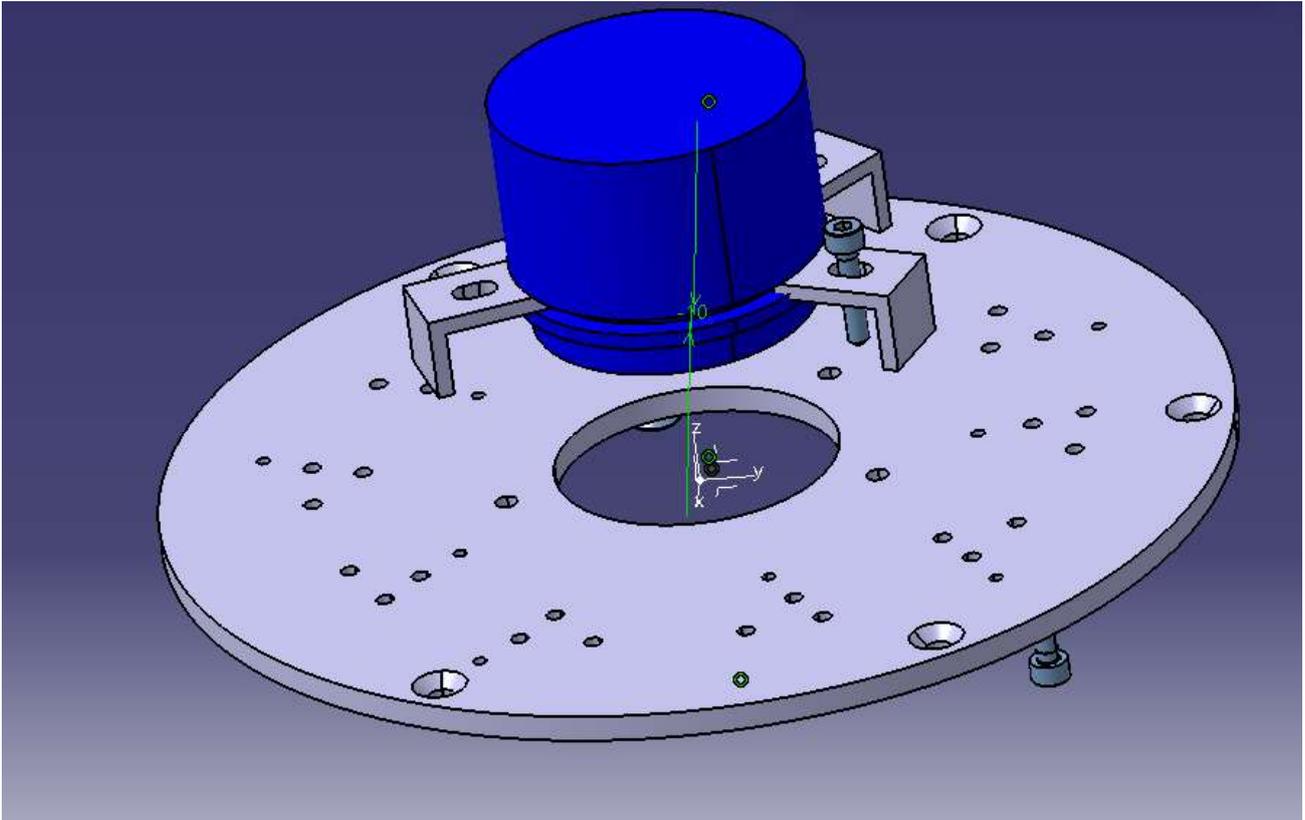






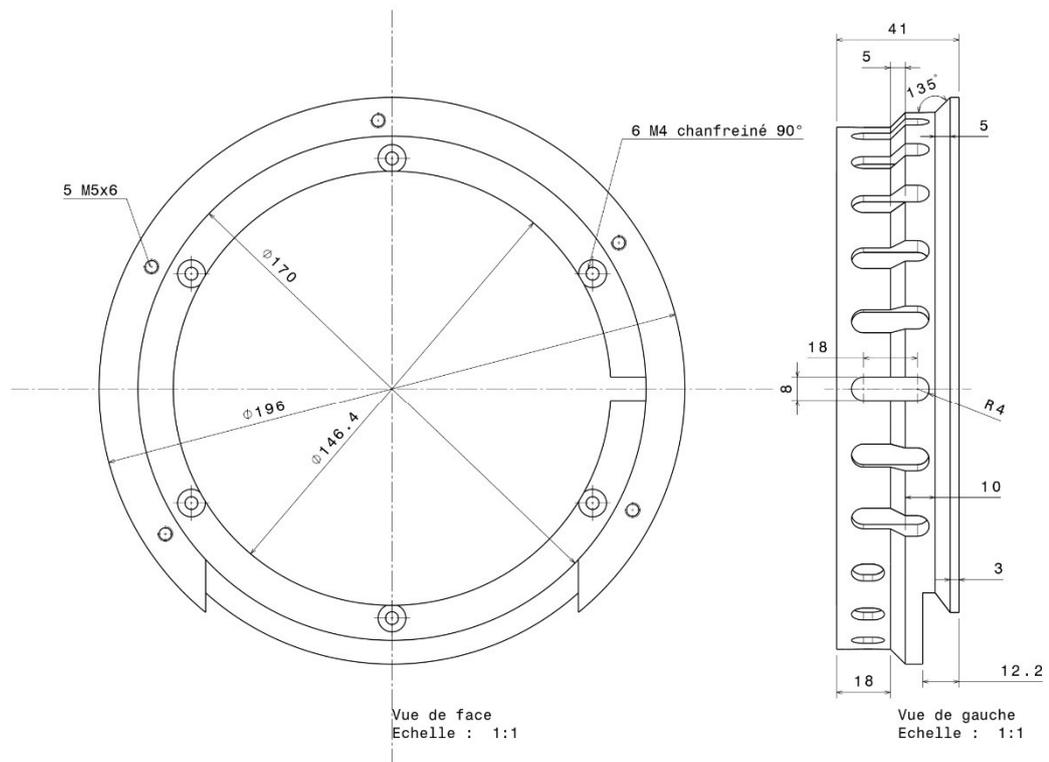




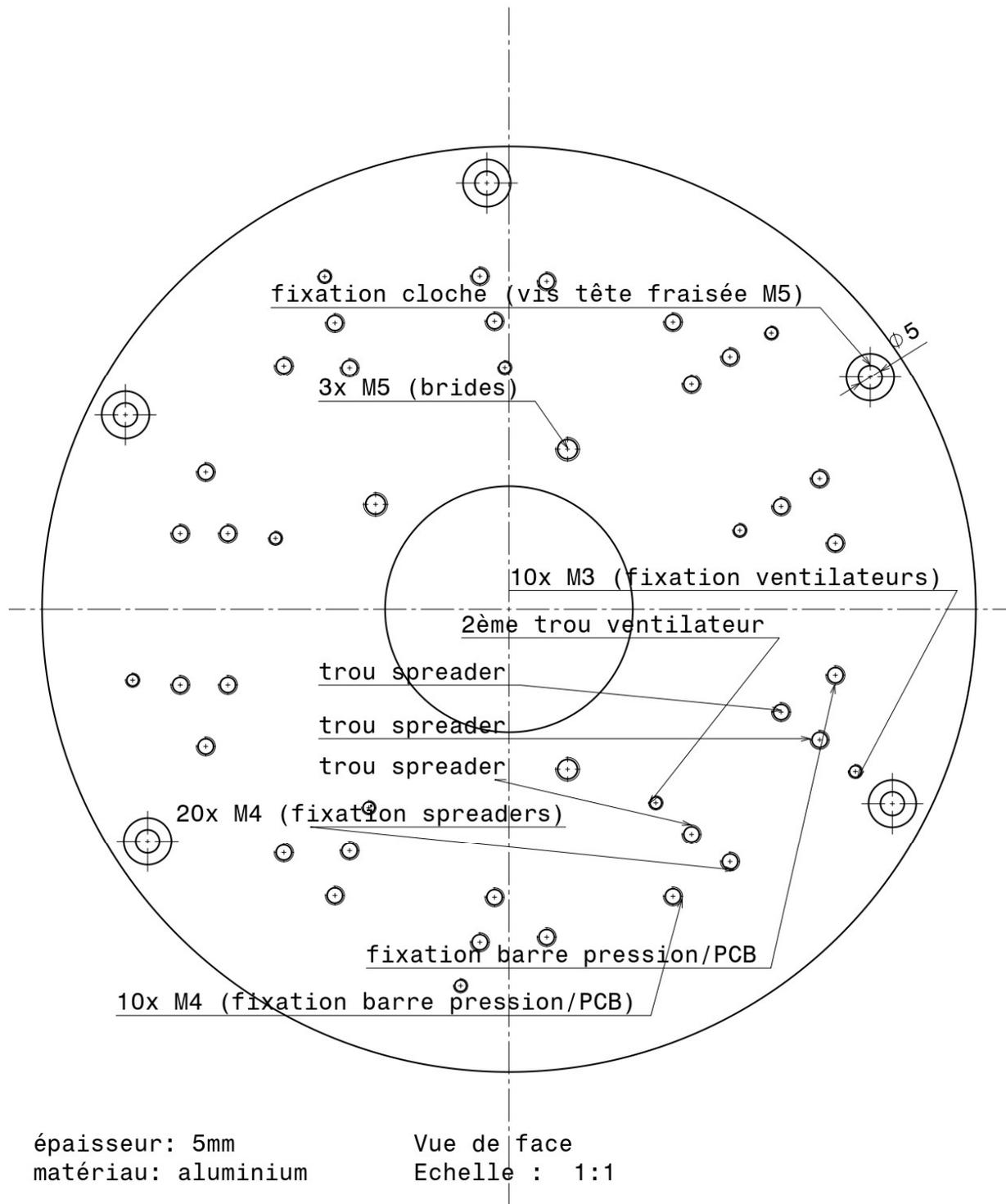


b. Croquis

Estructura metálica



Tapa

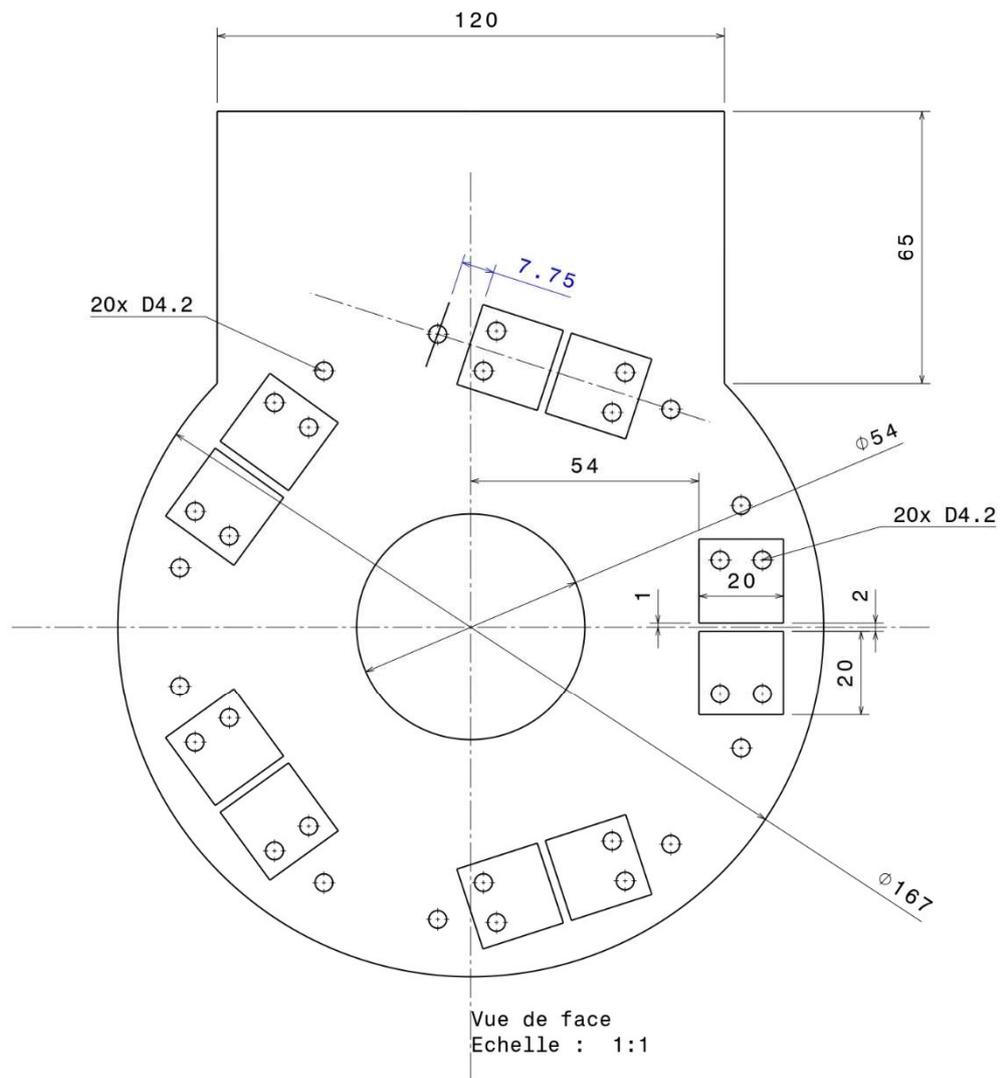


épaisseur: 5mm  
matériau: aluminium

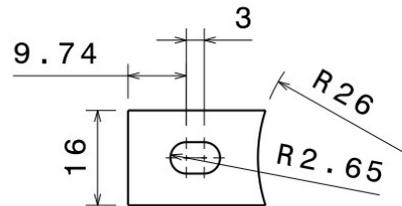
Vue de face  
Echelle : 1:1

Attention: les vis des spreaders et barre de Pression/PCB se montent du côté opposé à cette vue!

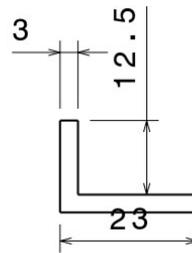
**PCB**



Bridas



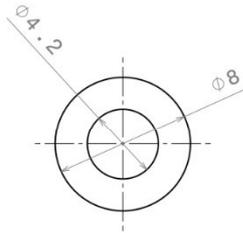
Vue de face  
Echelle : 1:1



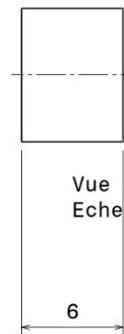
Vue de dessus  
Echelle : 1:1

Bride  
matériau:  
aluminim

**Espaciador inferior**



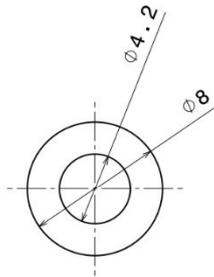
Vue de face  
Echelle : 4:1



Vue de gauche  
Echelle : 4:1

Entretoise inférieure (aluminium)  
(Entre barre de pression et PCB)

Espaciador superior



Vue de face  
Echelle : 4:1

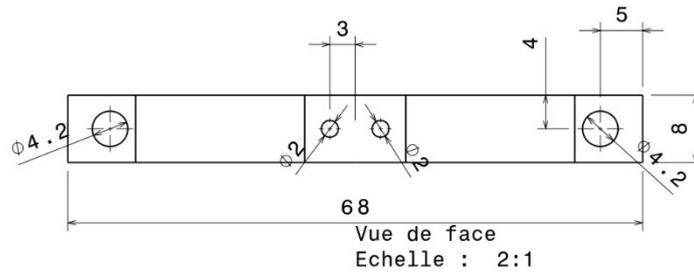


Vue de gauche  
Echelle : 4:1

Entretoise Supérieure (aluminium)  
(Entre PCB et Chapeau)

La cote de 6.2 doit être précise à 0.1 près

### Barra de presión



Barre de pression (matériau PCB) épaisseur: 1.5mm

Les trous du milieu sont placés ici pour fixer les pièces d'appui sous les GaN. Ces pièces n'étant pas définies, il faudra voir en fonction de ce qui est choisi pour réaliser ces perçages

ANEXO IV

