



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

INGENIERÍA INDUSTRIAL

**MODELADO Y DISEÑO TÉRMICO DE
EQUIPOS ELECTRÓNICOS EN MEDIOS
AEROESPACIALES.**

Autor: **Alejandra de Rueda Vinós**

Director: Dr. Antonio García y de Garmendia.

Madrid
Mayo 2015

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN ACCESO ABIERTO (RESTRINGIDO) DE DOCUMENTACIÓN

1ª. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Alejandra de Rueda Vinós, como alumna de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS (COMILLAS), **DECLARA**

que es el titular de los derechos de propiedad intelectual, objeto de la presente cesión, en relación con la obra Modelado y diseño térmico de equipos electrónicos en medio aeroespaciales ¹, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual como titular único o cotitular de la obra.

En caso de ser cotitular, el autor (firmante) declara asimismo que cuenta con el consentimiento de los restantes titulares para hacer la presente cesión. En caso de previa cesión a terceros de derechos de explotación de la obra, el autor declara que tiene la oportuna autorización de dichos titulares de derechos a los fines de esta cesión o bien que retiene la facultad de ceder estos derechos en la forma prevista en la presente cesión y así lo acredita.

2ª. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad y hacer posible su utilización de *forma libre y gratuita* (*con las limitaciones que más adelante se detallan*) por todos los usuarios del repositorio y del portal e-ciencia, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución, de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra (a) del apartado siguiente.

3ª. Condiciones de la cesión.

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia, el repositorio institucional podrá:

(a) Transformarla para adaptarla a cualquier tecnología susceptible de incorporarla a internet; realizar adaptaciones para hacer posible la utilización de la obra en formatos electrónicos, así

¹ Especificar si es una tesis doctoral, proyecto fin de carrera, proyecto fin de Máster o cualquier otro trabajo que deba ser objeto de evaluación académica

como incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.

(b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato. .

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo abierto institucional, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.²

(d) Distribuir copias electrónicas de la obra a los usuarios en un soporte digital.³

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra que cede con carácter no exclusivo a la Universidad por medio de su registro en el Repositorio Institucional tiene derecho a:

a) A que la Universidad identifique claramente su nombre como el autor o propietario de los derechos del documento.

b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.

c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada. A tal fin deberá ponerse en contacto con el vicerrector/a de investigación (curiarte@rec.upcomillas.es).

d) Autorizar expresamente a COMILLAS para, en su caso, realizar los trámites necesarios para la obtención del ISBN.

d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

² En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría redactado en los siguientes términos:

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo institucional, accesible de modo restringido, en los términos previstos en el Reglamento del Repositorio Institucional

³ En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría eliminado.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- a) Deberes del repositorio Institucional:
 - La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
 - La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
 - La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- b) Derechos que se reserva el Repositorio institucional respecto de las obras en él registradas:

- retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 24 de Mayo de 2015

ACEPTA

Fdo.....



Proyecto realizado por el alumno/a:

Aleiandra de Rueda Vinós

Fdo.



Fecha: 21/ 05/ 2015

Autorizada la entrega del proyecto cuya información no es de carácter
confidencial

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Antonio García y de Garmendia

Fdo.:

VºBº del director:



Fecha: 21/ 05 / 2015

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

José Ignacio Linares Hurtado

Fdo.:

Fecha://



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

INGENIERÍA INDUSTRIAL

**MODELADO Y DISEÑO TÉRMICO DE
EQUIPOS ELECTRÓNICOS EN MEDIOS
AEROESPACIALES.**

Autor: **Alejandra de Rueda Vinós**

Director: Dr. Antonio García y de Garmendia.

Madrid
Mayo 2015

MODELADO Y DISEÑO TÉRMICO DE EQUIPOS ELECTRÓNICOS EN MEDIOS AEROSPACIALES.

Autor: De Rueda Vinós, Alejandra.

Director: García y de Garmendia, Dr. Antonio.

Entidad Colaboradora: Airbus Defence and Space.

RESUMEN DEL PROYECTO.

Este Proyecto está enmarcado en el ámbito de diseño y fabricación de software y equipos electrónicos para el espacio. Formando parte de satélites, lanzadores, infraestructuras orbitales o vehículos de transporte.

La entidad colaboradora de este proyecto es CRISA (Computadoras, Redes e Ingeniería, S.A.U), perteneciente a AIRBUS DEFENCE AND SPACE GROUP. Esta empresa desempeña un papel importante en la mayoría de las misiones científicas y de observación de la ESA (European Space Agency), desarrollando equipos electrónicos para las mismas.

A lo largo de este proyecto se han analizado tres casos de posibles soluciones para mejorar las prestaciones de estos equipos electrónicos tratando de mejorar la disipación de calor de los componentes, la transmisión de calor a través de las juntas o en el diseño de los mismos.

Durante el primer caso de estudio se analizó la utilización de un nuevo adhesivo que mejoraría las conductancias térmicas entre diversos componentes y el PCB o la placa base en la que estuviesen colocados, en este primer caso se tomó contacto con los software FEMAP y TMG propiedad de SIEMENS y MAYA respectivamente que acompañarían todo el proyecto. Con el Método de los Elementos Finitos (MEF) y mediante estudios en el laboratorio exigidos por el plan de validación, se realizó un modelo térmico del adhesivo montado junto con una serie de radiadores aislados y no aislados, obteniendo mediante correlación la conductancia de contacto, que era una incógnita que planteaba la necesidad del modelado en MEF.

Posteriormente, una vez terminado el plan de validación exigido por AIRBUS para estos componentes, y de haber obtenido mediante correlación la conductancia de contacto de $1500\text{W/m}^2\text{K}$ aproximadamente, lo que es aceptable para el tipo de adhesivo estudiado. Se aceptó el uso de este adhesivo en futuros proyectos.

Durante la realización de este modelo se vio la necesidad de crear una herramienta a medida para las correlaciones que se estaban realizando, la forma de comparar los modelos entre sí para adaptar las propiedades a las temperaturas dadas por el laboratorio, realimentando los modelos, así que, ante la dificultad de efectuar de forma

eficaz estas correlaciones se procedió a la realización de un programa en Python, un lenguaje de programación en código abierto, para ayudar con la tarea y poder realizar algunos informes sobre los cambios realizados y gráficas donde, visualmente, facilitar la comparativa. Se le denominó KELVIN.

Vistas la utilidad y facilidad de uso de KELVIN, este programa se fue ampliando según requería el caso 2. Ya que se puede ampliar todo lo que se desee añadiendo módulos con diferentes funciones.

El segundo caso de estudio ya no era un modelo en dos dimensiones como el utilizado para valorar el adhesivo sino que era un modelo tridimensional mucho más complejo. Se adaptó KELVIN de acuerdo a estas necesidades. El programa continuara siendo utilizado en el Departamento de Diseño Físico y Térmico de Airbus como herramienta de ayuda para el resto de diseñadores.

En este segundo caso de estudio se realizó otro modelo térmico para analizar si la utilización de una abrazadera mejoraría la conductancia de contacto de forma notable en los componentes de tipo transistor. Después de un estudio en el laboratorio y un modelo térmico, se realizó una valoración de su peso, el cual podría perjudicar en caso de ser excesivo a todo sistema, con respecto a sus ventajas de posible mejora de la conductancia de contacto.

El resultado de este estudio fue negativo, la abrazadera no suponía ninguna mejora en el montaje debido a que, el mismo, constaba de Cho-therm entre el transistor y el PCB, un material en el cual su conductancia de contacto no es estrictamente creciente respecto a su presión. Por lo cual aunque la abrazadera mejoraba la presión, las propiedades del Cho-Therm empeoraban.

A continuación se realizó un estudio de sensibilidad con diferentes configuraciones típicas utilizadas en PCB, con diversos espesores y uniones con el ambiente, para crear una herramienta de representación de fácil visualización que ayude al ingeniero a valorar la importancia de un modelado detallado y preciso frente a uno más general.

Se elaboraron una serie de gráficas donde se representaban los gradientes térmicos en el eje de abscisas frente a densidades de potencia típicas en el eje de ordenadas.

Es decir, conociendo la temperatura ambiente aproximada o crítica requerida por el proyecto, y la densidad de potencia dada por los diseñadores del sistema, el ingeniero es capaz de valorar si su modelo es crítico por la proximidad al rango límite de temperaturas dadas por el sistema global, o por el contrario se encuentra lejos de estas temperaturas críticas y el modelado puede ser más general y menos preciso.

Con ello es posible ahorrar gran cantidad de tiempo y dinero invertido en estos modelos.

Estas gráficas ya están siendo utilizadas para valorar el riesgo de varios proyectos.

Respecto a los objetivos generales planteados por el proyecto, se puede afirmar que se han adquirido los conceptos necesarios para la modelización física y en elementos finitos de equipos electrónicos, y las capacidades para realizar ensayos en el laboratorio y poder realimentarlos valorando su precisión y validez.

Durante este proyecto se demuestra que, el Método de los Elementos Finitos (MEF), es la forma más adecuada para realizar estos estudios, debido a la precisión requerida, el tamaño de los componentes, y la gran cantidad de nodos y elementos. Se puede afirmar también que no habría diferencia en sustituir FEMAP por IDEAS, ya que son muy similares, y en ambos se pueden exportar los modelos en un formato universal y reutilizarlos.

Por último, se ha llevado a cabo un análisis del presupuesto empleado para la realización del proyecto.

MODELADO Y DISEÑO TÉRMICO DE EQUIPOS ELECTRÓNICOS EN MEDIOS AEROSPACIALES.

Autor: De Rueda Vinós, Alejandra.

Director: García y de Garmendia, Dr. Antonio.

Entidad Colaboradora: Airbus Defence and Space.

RESUMEN DEL PROYECTO.

This Project is based in the field of software design and manufacturing for electronic equipment and components in space. The developments achieved in this project can be applied to satellites, launchers, orbital infrastructures or transport vehicles.

CRISA (Computadoras, Redes e Ingeniería, S.A.U), part of AIRBUS DEFENCE AND SPACE GROUP, is the collaborating entity. This department has an important role in the development of electronic equipment for ESA's (European Space Agency) scientific missions and observations.

Throughout this project, three possible solutions for improving electronic devices capabilities have been analyzed. Enhancing capabilities means reducing the components heat loss, heat transfer between joints or design inefficiencies.

During the first case study the use of a new adhesive, which would enhance thermal conductance between several components and the PCB (Printed Circuit Board) in which they were placed, was analyzed. In order to conduct the analysis FEMAP and TMG software, property of SIEMENS and MAYA respectively, were used and continued to be helpful along the project. Employing FEM (Finite Element Method) and laboratory experiments demanded by the validation plan, a thermal model for the adhesive was made. A series of isolated and non-isolated heaters were built and with FEM, by correlation, the contact conductance was obtained.

Once the validation plan demanded by AIRBUS ended for the components and having obtained (approximately) a contact conductance of $1500\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ (acceptable for the type of adhesive), the use of this adhesive was approved for future projects.

The building of a tailored tool was necessary to realize the first model described above trying to avoid excessive time consumption for the correlations. This tool was called KELVIN and was programmed in Python, an opened code programming language. KELVIN also helped better understand and compare the results with the use of more visual graphics and reports.

KELVIN's ease of use allowed it to be extended for the second case study. This case required a more complex model (a three dimensional one). After the tool was adapted to the case, it started being used by the rest of engineers in the Physics and Thermal Design department at AIRBUS.

For the second case study a thermal model was developed in order to check if the use of a holder would improve the contact conductance notably for TO type components. In addition to the model and the laboratory experiments the holder weight was evaluated to make sure it could not undermine (if too much weight) the rest of the system.

The result from the second case study was negative, the holder did not involve an enhancement for the assembly. The assembly had a Cho-therm between the TO and PCB. This material has a contact conductance that does not grow while the pressure is rising, in fact it worsens it. Therefore, although the holder increased the pressure, Cho-therm properties deteriorate.

The third case analysis consisted in a sensitivity study for the different PCB configurations, various thickness and environmental unions, so as to create an intuitive tool with easy visualization that helps the engineer evaluate the importance of a more detailed and precise model opposed to a more general one.

The analysis produced a series of graphics where thermal gradients were shown in the X-axis and power densities in the Y-axis. That is, knowing the ambient or critical temperature and the power density indicated by the system designers, the engineer can decide the accuracy and complexity of the model needed based on the proximity to a temperature range. This allows for a huge saving of time and money spend in these models.

In terms of the project objectives, the necessary knowledge to develop the models has been acquired and thus has warrant the analysis in every case.

It has been demonstrated that FEM method is the more suitable one for all the analysis carried during this project due to the preciseness required, components size and the great amount of nodes and elements included.

In relation to the software used it can be concluded that there would be no difference between FEMAS and IDEAS since both can export models in a universal format and be reused.

Lastly, an economic evaluation has been conducted for the entire project.



Índice de la memoria

Parte I	Memoria.....	1
Capítulo 1	El diseño térmico en medios aeroespaciales	5
1.1	ESTADO DEL ARTE.....	7
1.2	MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.....	8
1.3	OBJETIVOS.....	9
1.4	ALCANCE DEL PROYECTO	10
Capítulo 2	Conceptos teóricos.....	13
2.1	FUENTES DE CALOR.	13
2.2	TRASMISIÓN DE CALOR.....	14
2.3	TRANSFERENCIA DE CALOR TRANSITORIA.	16
2.4	TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO ESTACIONARIO.	17
2.5	RESISTENCIA DE CONTACTO.....	18
2.6	EQUIPOS ELECTRÓNICOS PARA AVIONES, MISILES, SATÉLITES Y NAVES ESPACIALES.	22
Capítulo 3	Herramientas y elementos finitos.....	25
3.1	SOFTWARE EMPLEADO.....	25
3.2	INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	26
3.3	APLICACIÓN PRÁCTICA.....	30
3.4	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PARA EVALUACIÓN EN TMG.....	30
Capítulo 4	Predicción de la fatiga térmica en componentes	33
4.1	GENERACIÓN DE FATIGA	33
4.2	DAÑOS ACUMULADOS DURANTE CICLOS TÉRMICOS Y VIBRACIONALES.....	36
4.3	PREDICCIÓN DE FATIGA EN ANÁLISIS TÉRMICOS.....	36
4.4	CICLOS RÁPIDOS Y LENTOS DE FATIGA.	37
4.5	ESTIMAR EL CICLO DE FATIGA TÉRMICO.....	38



4.6	OBTENCIÓN DEL PEOR CASO DE TEMPERATURA.....	39
Capítulo 5 Programa KELVIN.		41
5.1	FINALIDAD DEL PROGRAMA KELVIN.....	42
5.2	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA KELVIN.	47
5.3	EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DEL P. KELVIN.....	54
Capítulo 6 CASO 1: Calificación de adhesivo, montaje radiadores.65		
6.1	DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE	65
6.2	INTRODUCCIÓN TEÓRICA.	69
6.3	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS MEDICIONES OBTENIDAS EN EL LABORATORIO DEL MONTAJE.	69
6.3.2	Medidas de referencia para correlar con el modelo MEF	81
6.4	RESULTADOS TEÓRICOS.....	82
6.5	CONCLUSIONES	93
Capítulo 7 CASO 2: Abrazadera.		97
7.1	DESCRIPCIÓN DE LOS MONTAJES.....	98
7.2	RESULTADOS EXPERIMENTALES: PAREJAS DE TRANSISTORES.	100
7.3	CONCLUSIONES DE LA ACEPTACIÓN DE LA ABRAZADERA EN PROYECTOS.	117
Capítulo 8 CASO 3: Estudio PCB.....		119
8.1	MODELACIÓN TÉRMICA DE PCB.....	120
8.2	TRANSFERENCIA DE CALOR.....	123
8.3	CONFIGURACIONES ANALIZADAS.....	125
8.4	CONCLUSIONES	143
Capítulo 9 Conclusiones.....		145
9.1	DESARROLLO DEL PROYECTO	145
9.2	CONCLUSIONES GENERALES.....	146
9.3	POSIBLES DESARROLLOS FUTUROS	148
Capítulo 10 Valoración económica.....		151
10.1	VALORACIÓN ECONÓMICA.....	151
10.2	CONCLUSIÓN	155



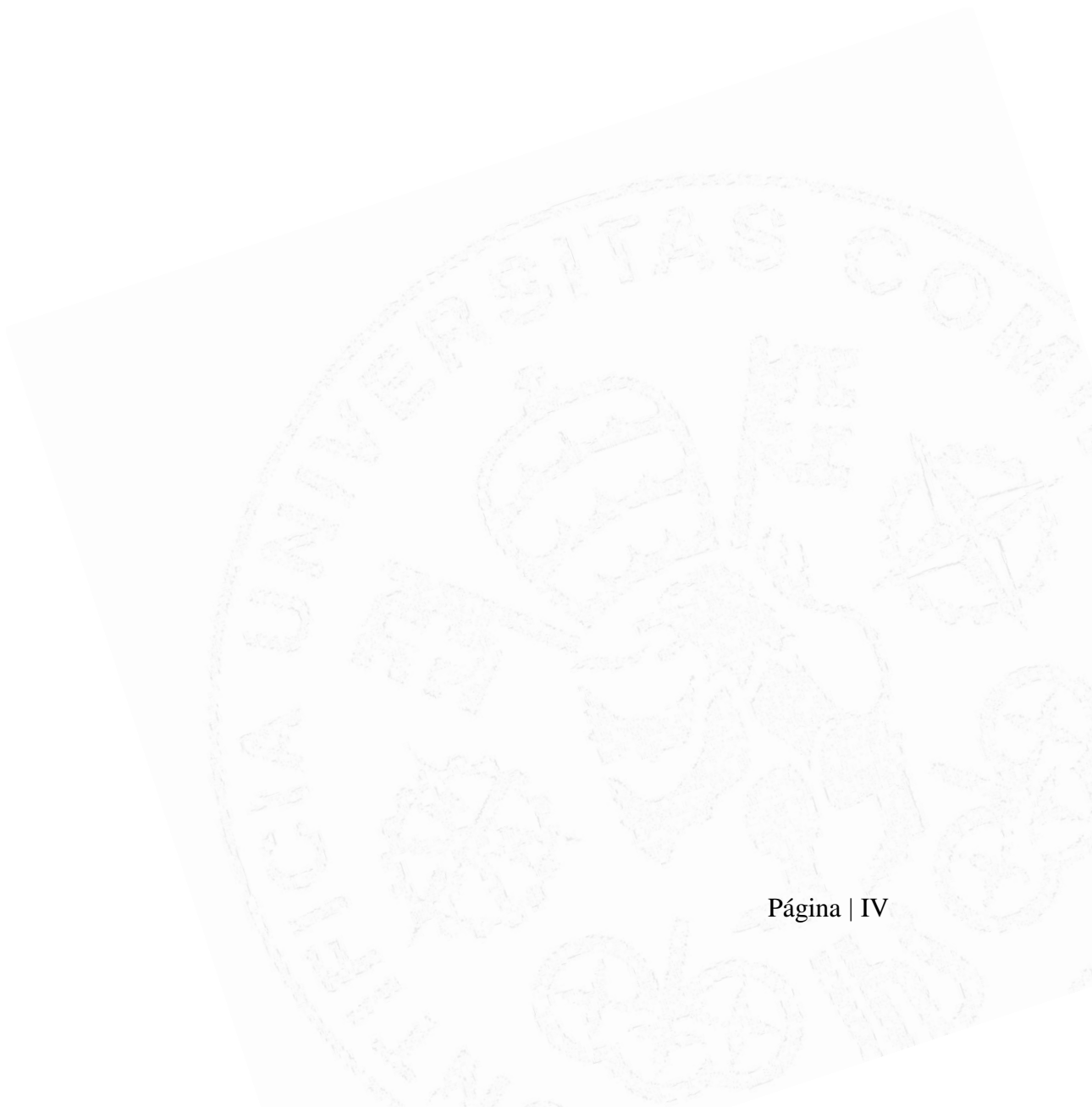
Capítulo 11 Bibliografía.....	157
11.1 NORMATIVA:.....	157
11.2 PUBLICACIONES:.....	159
Capítulo 12 Agradecimientos.....	161



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

ÍNDICE DE FIGURAS





Índice de figuras

Ilustración 1: Imágenes. Fuente: www.crisa.es	6
Ilustración 2: Comsats. Fuente: <i>Spacecraft Thermal Control Handbook</i>	8
Ilustración 3: Modelo FEM de un módulo usando FEMAP & TMG. Fuente: Presentación curso TMG Justo Sancho, 2012.	10
Ilustración 4: Terminología del margen térmico para programas de JPL/NASA. Fuente: Nasa.	11
Ilustración 5: Ecuación de Fourier.	14
Ilustración 6: Satélite en ambiente térmico. Fuente: <i>Spacecraft Thermal Control Handbook</i>	15
Ilustración 7: esquema resistencia de contacto entre bloques. Fuente: G.E. Section 502.5 Conduction in Solids-Steady State.	19
Ilustración 8: Caída de temperatura en la junta entre cuerpos. Fuente: F.Milanez.	19
Ilustración 9: Conducción del calor a través de los puntos de contacto. Fuente: F. Milanez	20
Ilustración 10: Ejemplo de efecto de la presión de contacto sobre la resistencia de contacto en acero inoxidable. Fuente: G.E. Section 502.5 Conduction in Solids –Steady State.	21
Ilustración 11: Salto en la interfase: Fuente: BOL. SOC. ESP. CERAM. VIDR. VOL. 23 - NUM. 2	22
Ilustración 12: FEMAP Versión 10.2. Fuente: FEMAP Versión 10.2	26
Ilustración 13: Descripción de nodos y elementos (Fuente: Presentación TMG Justo Sancho, 2012).	31
Ilustración 14: Componentes clavados por agujeros o pines. Fuente. Crisa.	34
Ilustración 15: Componentes en montaje superficial. Fuente: Crisa.	34



Ilustración 16: Perfil típico de ciclos termicos. Fuente: Spacecraft Thermal Control Handbook.....35

Ilustración 17: Figura típica de curvas de fatiga S-N.....37

Ilustración 18: Iluminación solar del satélite GEO. Fuente: Spacecraft Thermal Control Handbook.....39

Ilustración 19: Qt designer ejemplo de interfaz gráfica.....42

Ilustración 20: Ejemplo de obtención de temperaturas. Fuente: Elaboración propia43

Ilustración 21: Obtención de temperaturas mediante visualización de grupos de elementos. Fuente: Elaboración propia.....44

Ilustración 22: Ejemplo de análisis de variación de temperaturas en diferentes casos con Excel.45

Ilustración 23: Archivos generados por TMG. Fuente: Elaboración propia.....46

Ilustración 24: Pantalla principal de kelvin. Fuente: Elaboración propia.....47

Ilustración 25: Pantalla de inicio del programa48

Ilustración 26: Pestaña Multilayers.....49

Ilustración 27: pestaña elementos Fuente: Elaboración propia.....50

Ilustración 28: Pestaña casos. Fuente: Elaboración propia.....51

Ilustración 29: Pestaña temperaturas52

Ilustración 30: Pestaña Gráficas. Fuente: Elaboración propia.....53

Ilustración 31: Pestaña principal.....55

Ilustración 32: Pestaña elementos.....56

Ilustración 33: Introducir los casos57

Ilustración 34: Pestaña temperaturas después de seleccionar extraer temperaturas. Fuente: Elaboración propia.....58

Ilustración 35: Extracción de gráficas. Fuente: Elaboración propia.....59



Ilustración 36: Imagen de la generación de gráficas, después de guardar el informe. Fuente: Elaboración propia.60

Ilustración 37: La carpeta Plots contiene la gráficas. Fuente: Elaboración propia.60

Ilustración 38: Ejemplo 1. Graficas radiadores. Fuente: Programa Kelvin.61

Ilustración 39: Ejemplo 2. Graficas radiadores. Fuente: Programa Kelvin.61

Ilustración 40: Ejemplo 3. Graficas Abrazadera.62

Ilustración 41: Esquema inicial de montaje. Fuente: Crisa.66

Ilustración 42: Útil universal. Fuente: Crisa.67

Ilustración 43: PCB/ Placa base. Fuente: Elaboración propia.67

Ilustración 44: Elementos que componen el radiador. Fuente: Elaboración propia.68

Ilustración 45: Vista superior del montaje final. Fuente: Elaboración propia.68

Ilustración 46: Secuencia de actividades. Fuente: Elaboración propia.71

Ilustración 47: Colocación de los termopares en el montaje. Fuente: Crisa.71

Ilustración 48: Montaje final antes de ser introducido en la cámara de vacío. Fuente: Elaboración Propia.72

Ilustración 49: Gráfica de cómo deben ser los ciclos.73

Ilustración 50: Puntos monitorizados en la placa base. Fuente: Elaboración propia.74

Ilustración 51: Esquema de temperatura de estabilización y potencia de los radiadores antes del cambio.76

Ilustración 52 Muestra de resultados obtenidos durante los diferentes casos. Fuente: Elaboración propia.80

Ilustración 53: Temperaturas medidas en estado estacionario en el caso adicional1. Fuente: elaboración propia.82

Ilustración 54: Modelo Fem con elementos placa. Fuente: Elaboración propia.83

Ilustración 55: Posición termopares, Caso Caliente. Fuente: Elaboración propia.84



Ilustración 56: Separación por zonas con distintas conductancias. Fuente: Elaboración propia.84

Ilustración 57:Ejemplo de gráfica de resultados obtenidos. Fuente: Programa KELVIN. 85

Ilustración 58: Ajuste Marco, CA,CB en termopares en PCB. Fuente: Programa KELVIN.86

Ilustración 59:Ajuste conductancia entre radiadores sin aislar y PCB. Fuente: Programa KEVIN.87

Ilustración 60:Caso Adicional 1.Pletina 0°C, y cámara 50°C. Fuente: Programa KELVIN.88

Ilustración 61:CA1 (pletina 0°C) comparando con CC (temps lab). Fuente: Programa KELVIN.....89

Ilustración 62.CASO A2 (pletina 60ºgrados) comparativa.....90

Ilustración 63:Casos cambiando temperatura pletina. (15°C y 13°C). Fuente: Programa KELVIN.....91

Ilustración 64: Resultado final del Caso adicional 1.93

Ilustración 65: Abrazadera. Fuente: Elaboración propia.98

Ilustración 66: Dos To254, situados uno sobre otro. Fuente: Crisa.....99

Ilustración 67: Transistores atornillados a la placa base. Fuente: Crisa.99

Ilustración 68: Abrazadera. Fuente: Elaboración propia.100

Ilustración 69: Abrazadera modelada sobre el transistor. Fuente: Elaboración propia. ..100

Ilustración 70: Posición de los termopares para registro de temperaturas. Fuente: Elaboración propia para Crisa.....101

Ilustración 71 : Montaje de torretas de sujeción. Fuente: Crisa.....102

Ilustración 72: Fotografías Setup test.104

Ilustración 73: Esquema de montaje torretas de transistores. Fuente: Elaboración propia.105



Ilustración 74: Imagen del modelo de una torreta. Fuente: Elaboración propia. 105

Ilustración 75: Modelo térmico de un transistor abierto. Fuente: Elaboración propia. ... 106

Ilustración 76: Temperatura en los termopares. Fuente: Elaboración propia. 106

Ilustración 77: Imagen de kelvin con las últimas tres iteraciones y sus temperaturas correspondientes. Fuente: Elaboración propia. 107

Ilustración 78: Curvas de aproximación a los valores requeridos. Fuente: Elaboración propia. 108

Ilustración 79: Resultados obtenidos del modelo para la aproximación de la conductancia de contacto. Fuente: Elaboración propia. 108

Ilustración 80: Esquema de montaje de Abrazadera con transistor. Fuente: Elaboración propia 109

Ilustración 81: Esquema modelo mecánico del Abrazadera. Fuente: Elaboración propia. 109

Ilustración 82: Modelo mecánico del abrazadera. Fuente: Elaboración propia. 111

Ilustración 83: Porcentaje aproximado de fuerza ejercida entre el tornillo y el final del voladizo. 112

Ilustración 84 : Imágenes del modelo térmico. Fuente: Elaboración propia. 112

Ilustración 85: Pruebas de transmisión de calor a través del Abrazadera. Fuente: Elaboración propia. 113

Ilustración 86: Resultados previos sin considerar Cho-therm. Fuente: Elaboración propia. 114

Ilustración 87: Conductancia del Cho-therm frente a presión ejercida. Valor óptimo @300-500psi (6739W/m²K). Fuente: www.chomerics.com 115

Ilustración 88: Suposición de valores aproximados de presión. Fuente: Elaboración propia. 116

Ilustración 89: Esquemas de resistencias en el interior de una unidad electrónica. Fuente: Crisa. 121



Ilustración 90: Espesor total de cobre frente a flujos de calor. Fuente: Imagen obtenida de Crisa. 124

Ilustración 91: Imagen del PCB. Fuente: elaboración propia, FEMAP..... 126

Ilustración 92: Configuración interna del PCB. Fuente: Elaboración propia, FEMAP... 127

Ilustración 93: Elementos unidos a punto no geométrico, supuesto a 60°C. Fuente: Elaboración propia, FEMAP..... 127

Ilustración 94: Componente simulado de 3x3 por TOP. Fuente: FEMAP. 128

Ilustración 95: Gráfica capas alternas poliamida-cobre. Fuente: Elaboración propia. 130

Ilustración 96: Capas alternas de poliamida-cobre, zona de interés. Fuente: elaboración propia. 131

Ilustración 97: Imagen del PCB. Fuente: Elaboración propia, FEMAP. 132

Ilustración 98: Configuración interna del PCB. Fuente: Elaboración propia, FEMAP... 132

Ilustración 99: Elementos unidos a punto no geométrico, supuesto a 60°C. Fuente: Elaboración propia FEMAP..... 132

Ilustración 100: Componente simulado de 10x10 por TOP. Fuente: FEMAP. 133

Ilustración 101: Ejemplo de mapa de temperaturas con una densidad de potencia de 1,56 W/m²°C. Fuente: Elaboración propia, FEMAP. 133

Ilustración 102: Capas de cobre la 2,6, 16y 20, con diferentes espesores de cobre para poliamida=300micras. Fuente: Elaboración Propia. 137

Ilustración 103: Capas de cobre la 2,6, 16y 20, con diferentes espesores de cobre para poliamida=150micras. Fuente: Elaboración Propia. 138

Ilustración 104: en la ilustración de la izquierda se muestra la unión con el ambiente de los estudios 1 y 2, y a la derecha la unión por un único lado estudio 3.Fuente: FEMAP. 138

Ilustración 105: ejemplo de mapa de temperaturas para densidad de potencia de 1W/m²°C. Fuente: Elaboración propia, FEMAP. 139

Ilustración 106: Capas de cobre la 2,6, 16y 20, con diferentes espesores de cobre para poliamida=3000micras. Fuente: Elaboración Propia. 142



Ilustración 107: Capas de cobre la 2,6, 16y 20, con diferentes espesores de cobre para poliamida=150micras. Fuente: Elaboración Propia..... 143



Índice de tablas

Tabla 1: Materiales y características de caso 1. Fuente: Elaboración propia. 70

Tabla 2: Potencias. Fuente: Elaboración propia. 74

Tabla 3: Datos caso frío. Fuente: Elaboración propia..... 78

Tabla 4: Datos caso caliente. Fuente: Elaboración propia. 79

Tabla 5: Datos caso adicional 1. Fuente: Elaboración propia..... 79

Tabla 6: Datos caso adicional 2. Fuente. Elaboración propia..... 79

Tabla 7: Momento de medición de alcance de estado estacionario. Fuente: Elaboración propia. 81

Tabla 8: Temperaturas medidas en estado estacionario en el caso caliente. Fuente: Elaboración propia. 81

Tabla 9: Datos finales obtenidos. Fuente: Elaboración propia. 92

Tabla 10: Datos. Fuente: Elaboración propia. 94

Tabla 11: Cálculo teórico de la resistencia térmica. Fuente: Elaboración propia..... 94

Tabla 12: cálculo de la resistencia térmica a partir de las temperaturas del modelo. Fuente: Elaboración propia. 95

Tabla 13: Tabla mediciones torretas de transistores. Elaboración propia. 103

Tabla 14: Resultados obtenidos y esperados. Fuente: Elaboración propia..... 107

Tabla 15: Mediciones desplazamiento.Fuente: Elaboración propia. 110

Tabla 16: Resultados fuerza resultante. Fuente: Elaboración propia..... 111

Tabla 17: Resultados y cálculo de Rth. fuente: Elaboración propia. 114

Tabla 18: Datos modelo térmico. Fuente: Elaboración propia. 114



Tabla 19: Conductancias obtenidas basadas en el comportamiento del Cho-term.....	116
Tabla 20: Resultados de la medición de pesos en sala. Fuente: Elaboración propia.....	117
Tabla 21: resultados analisis 1. Fuente: Elaboración propia.....	129
Tabla 22: Resultados análisis 2. Fuente: Elaboración propia.....	135
Tabla 23: Continuación tabla 22.....	136
Tabla 24: Resultados análisis 3. Fuente Elaboración propia.....	140
Tabla 25: continuación tabla 24.....	142
Tabla 26: Costes recursos humanos. Fuente: Elaboración propia.....	152
Tabla 27: Costes recursos informaticos. Fuente elaboración propia.....	153
Tabla 28: Costes recursos informaticos. Fuente elaboración propia.....	153
Tabla 29: Costes materiales y maquinaria. Fuente: Elaboración propia.....	155
Tabla 30: Costes materiales y maquinaria 2. Fuente: Elaboración propia.....	155



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

Parte I MEMORIA



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

Prólogo



Prólogo

Durante muchos años la industria electrónica se ha esforzado por mejorar la confiabilidad de los sistemas electrónicos reduciendo las temperaturas de operación y las temperaturas de las uniones de los componentes. Durante el mismo periodo de tiempo ha habido una fuerte tendencia también a reducir el tamaño y coste de estos montajes electrónicos.

Estos problemas han resultado en una tendencia a incrementar las densidades de potencia y a reducir considerablemente el volumen de los componentes, actualmente numerosos equipos electrónicos cuentan con sofisticados métodos de enfriamiento, con ventiladores especiales, líquidos de refrigeración, o métodos de enfriamiento termoeléctrico que logran temperaturas de unión por debajo de los 100°C.

El MIL-HDBK-217¹ muestra que las tasas de fracaso de cantidad de equipos electrónicos se doblan cuando hay un incremento de temperatura de 20°C en el punto caliente para componentes trabajando a aproximadamente el 50% de su potencia nominal. Los fabricantes de equipos electrónicos, por ello, han reducido el punto caliente mejorando las técnicas de enfriamiento, para incrementar la fiabilidad de estos sistemas.

Sin embargo, reducir las temperaturas del punto caliente y de las uniones no obtiene un descenso en la tasa de fallos tan grande como se esperaba, según parece, otras fuerzas y mecanismos de funcionamiento también influyen.

Exámenes en diferentes fallos de sistemas electrónicos durante varios años han mostrado que otros factores además de los incrementos de temperaturas causan fallos en estos sistemas. Algunos de estos factores son por no tener en cuenta que las temperaturas generan fuertes esfuerzos y tensiones en los componentes, que al cabo de varios ciclos resultan en un colapso del sistema.

¹ *Reability prediction of electronic equipment, Military handbook (2 de diciembre 1991).*



En este Proyecto se tratarán diversos estudios para intentar mejorar los rangos de temperatura de trabajo de algunos montajes particulares.

Se ha incluido un capítulo del método de elementos finitos para mostrar como este método puede ayudar a diseñar y analizar equipos electrónicos y de esta forma mejorar su fiabilidad en condiciones térmicas severas, será el método principal de este Proyecto para concluir los resultados.

También se incluirán diversos conceptos teóricos aplicados en el mismo.



Capítulo 1 EL DISEÑO TÉRMICO EN MEDIOS AEROESPACIALES

Este Proyecto está enmarcado en el ámbito de diseño y fabricación de software y equipos electrónicos para el espacio. Formando parte de satélites, lanzadores, infraestructuras orbitales o vehículos de transporte.

La entidad colaboradora de este proyecto es CRISA (Computadoras, Redes e Ingeniería, S.A.U), perteneciente a AIRBUS DEFENCE AND SPACE GROUP. Esta empresa desempeña un papel importante en la mayoría de las misiones científicas y de observación de la ESA (European Space Agency), desarrollando equipos electrónicos para las mismas.

Estos equipos pueden ser controladores de acondicionamiento y distribución de potencia, unidades de procesamiento de datos o unidades de control².

Los principales proyectos en los que ha participado CRISA son los Meteosat de Segunda Generación, Envisat, Rosseta, GOCE, GAIA, los vehículos ATV o el rover Curiosity de la NASA.

Actualmente la empresa participa en diversos proyectos para misiones futuras como, Astrosat 250 RIU o BepiColombo entre otros.

² “CRISA (Computadoras, Redes e Ingeniería, S.A.U)”. www.crisa.es

También, cabe destacar su participación en los lanzadores Ariane 5 y Vega, los cuales llevan integrados alguno de estos equipos electrónicos. Específicamente, CRISA ejerce una labor fundamental en el lanzador Ariane 5, siendo ésta la electrónica secuencial, una unidad de control y supervisión que actúa sobre la mayoría de los actuadores del lanzador, como electro-válvulas o dispositivos pirotécnicos.



Ilustración 1: Imágenes. Fuente: www.crisa.es

En la actualidad, dentro del entorno industrial, es imprescindible conocer el comportamiento físico de cualquier elemento perteneciente a un sistema.

Sin embargo, por motivos económicos, por complejidad, o por imposibilidad de acceso a las herramientas adecuadas entre otras dificultades, los ensayos cuentan con grandes limitaciones. Por esto, aparece la necesidad de acudir a herramientas de análisis y simulación que permitan conocer el comportamiento de un equipo antes de realizar cualquier prototipo para ensayar los posibles fallos. Esto permite un ahorro en costes y tiempo, evitando errores a priori.

El proyecto que se plantea está orientado a la creación de diferentes modelos matemáticos que reflejen fielmente los comportamientos físicos de los sistemas electrónicos, centrándose en un área específica de la ingeniería que en este caso es la ingeniería térmica y en un hardware específico que son los equipos electrónicos que se diseñan para ser integrados en satélites.

En este capítulo se tratarán los conceptos previos al proyecto. Como hemos llegado al mismo, los objetivos y las herramientas a utilizar.



1.1 ESTADO DEL ARTE

Las exigencias para un equipo electrónico incorporado en un cohete, satélite o lanzador son muy severas. Es importante tener un control exhaustivo de las temperaturas y las influencias de unos componentes sobre otros para evitar fallos en el sistema y con ello el fallo completo de la misión.

Son equipos caros y precisos, que generalmente no pueden ser reparados en el espacio, por lo que deben tener un margen fiable de funcionamiento.

Estos costes tan elevados de los equipos muchas veces son los que imposibilitan la realización de los ensayos, y nos pone ante la exigencia de diseñar la realidad con la precisión requerida.

Para ello se estudiara la manera de crear modelos basados en el Método de los Elementos Finitos.

En la actualidad existen diversos estudios previos que responden a cuestiones teóricas un buen ejemplo es “Cooling techniques for electronic equipment”³ de Dave S.Steinberg, en él se tratan números posibles fallos de los sistemas, usando metódicas formas de análisis, incluyendo capítulos donde se tratan las especificaciones técnicas para enfriamiento de los sistemas, montajes y técnicas de enfriamiento para componentes electrónicos, guías prácticas para convección natural y enfriamiento por radiación, ventilaciones forzadas de equipos, fallos debidos a diferencias en los coeficientes térmicos de expansión, y daños acumulados en ciclos térmicos o vibratorios. También hace referencia a la forma correcta de exponer los sistemas a ciclos térmicos para no dañar la vida útil de los componentes.

Por otro lado, el libro de David G.Gilmore “Spacecraft thermal control handbook”⁴, recorre gran parte del análisis térmico en equipos del espacio, pero no se centra específicamente en componentes concretos.

Previos a nuestro estudio hay incontables modelos térmicos de elementos finitos que respondes a diferentes casos, proponiendo numerosas soluciones térmicas, no obstante la justificación de la realización de este proyecto es la necesidad de un análisis a medida.

³ Bibliografía: Dave S. Steinberg, *Cooling Techniques for Electronic Equipment*, año 1991

⁴ Bibliografía: David G. Gilmore, *“Spacecraft Thermal Control Handbook”* año 2002.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La motivación para la realización de este Proyecto fue la necesidad de resolver varias incógnitas en la transmisión de calor dentro de los sistemas que fabrica CRISA.

La empresa realiza numerosos modelos térmicos para valorar las soluciones que presenta a sus clientes, no obstante estos modelos suelen ir asociados a montajes concretos, y no se dispone de tiempo, ni de fondos económicos para la realización de modelos genéricos que presenten nuevas soluciones, es por estos que este Proyecto va a presentar tres estudios globales sobre tres soluciones que pueden ayudar a mejorar o comprender mejor el funcionamiento de números sistemas y montajes de componentes electrónicos.

El proyecto está orientado a la respuesta de incógnitas térmicas en un área específica de la ingeniería que en este caso es la ingeniería térmica y en un hardware específico que son los equipos electrónicos que se diseñan para ser integrados en satélites.

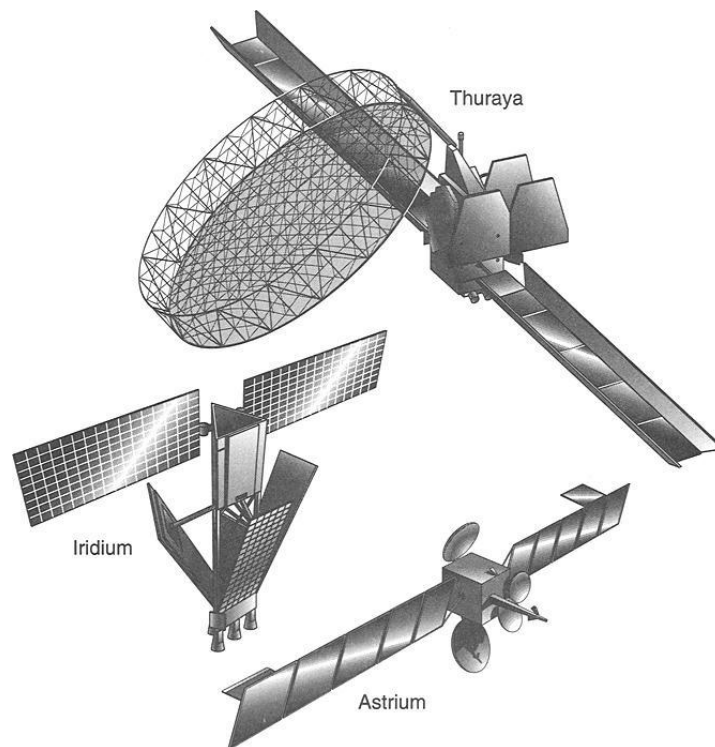


Ilustración 2: Comsats. Fuente: *Spacecraft Thermal Control Handbook*.



1.3 OBJETIVOS

Con las herramientas de análisis y simulación utilizadas se construirán modelos matemáticos que intentarán reflejar fielmente los comportamientos físicos del elemento o grupo de elementos representados. Prestando especial atención a las resistencias térmicas de las distintas uniones presentes en el entorno del proyecto.

Los objetivos son:

- ✓ Realizar modelos de elementos finitos de los elementos que forman parte de un equipo electrónico.

- ✓ Simular dichos modelos en unas condiciones que se puedan reproducir en laboratorio. La *Ilustración 3* muestra un ejemplo de un modelo MEF y sus temperaturas obtenidas mediante TMG.

- ✓ Tomar medidas en laboratorio para comparar predicción del modelo con medidas reales.

- ✓ Finalmente, con las medidas obtenidas realimentar los modelos realizando las modificaciones y ajustes necesarios hasta que la diferencia entre modelo y realidad tenga la aproximación que se precise.

A lo largo del modelado del equipo, los ensayos realizados en el laboratorio nos proporcionarán la afinidad y validación de los modelos de elementos finitos (FEM) tal y como se ha dicho en los objetivos. Así, de esta forma, se obtendrán los datos que se necesitan para confirmar las hipótesis iniciales del diseño y comprobar las respuestas de los modelos. En caso de que las hubiese, las pruebas de calificación y aceptación posteriores ayudarán a comprobar el diseño.

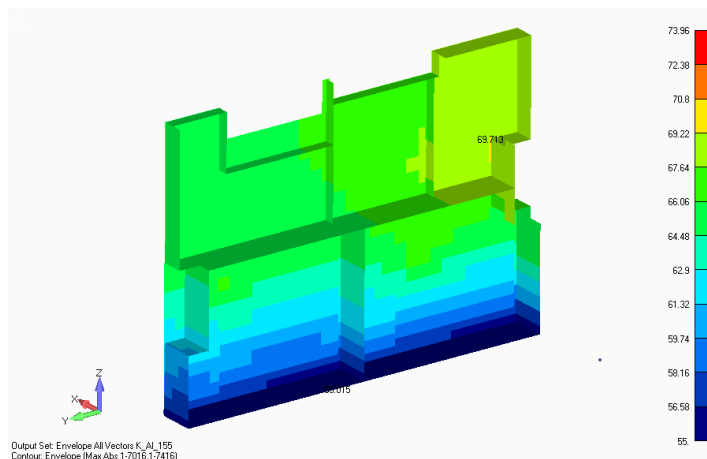


Ilustración 3: Modelo FEM de un módulo usando FEMAP & TMG. Fuente: Presentación curso TMG Justo Sancho, 2012.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto no cubre todo el proceso de vida que tiene un equipo electrónico, es decir, desde que es diseñado hasta su calificación y aceptación como equipo de vuelo, ya que en ese caso, estaríamos analizando un proyecto completo, objeto de la actividad habitual a la que se dedica la empresa CRISA (an AIRBUS Defense and Space company). Este proyecto completo implicaría el diseño en CAD del equipo, el análisis mecánico (modelos y simulación), el análisis térmico, la fabricación de prototipo, la calificación del mismo (ensayos en el laboratorio), la fabricación del equipo de vuelo, la calificación y la aceptación del equipo. Cada una de estas partes en las que se divide el proyecto total está regulada por diferentes departamentos y no es trabajo de una sola persona, por ello el alcance del Proyecto en cuestión, se limita al modelado térmico de diversas soluciones que corresponderían al análisis térmico de algún proyecto concreto, pero de forma genérica, proponiendo nuevas soluciones a problemas genéricos.

Particularmente se trata de tres modelos térmicos donde se modelaran componentes concretos con diferentes formas de montaje las máximas disipaciones de calor producidas ya sean en el PCB, rigidizador o componentes así como las temperaturas máximas alcanzadas, tras haber sometido el módulo a diferentes ciclos térmicos en el laboratorio.

Todo este estudio se realiza con el fin de conocer el comportamiento físico de los elementos que componen el módulo; es decir, mediante ensayos un equipo es sometido a diferentes cargas térmicas y tras los mismos se decidirá si el equipo es válido o no, en función de si todo ha ido correctamente como se esperaba. Por el contrario, si algo falla o se rompe, el equipo no será válido. Aquí es donde “juega su papel” el modelado y simulación del equipo. Gracias a la simulación se conocerá el comportamiento físico de cada uno de los elementos tanto si es válido como si no, así se podrán conocer datos como puede ser la temperatura máxima de un componente en un determinado momento.

En base a los resultados obtenidos el diseñador tiene una referencia mínima en la que apoyarse para realizar su próximo diseño., el diseñador conoce, con la disposición ensayada si el equipo resiste pero no conoce el límite máximo que es capaz de soportar esa tarjeta. Es por ello que paralelamente la empresa se dedica al estudio de módulos independientes con el fin de encontrar esos límites.

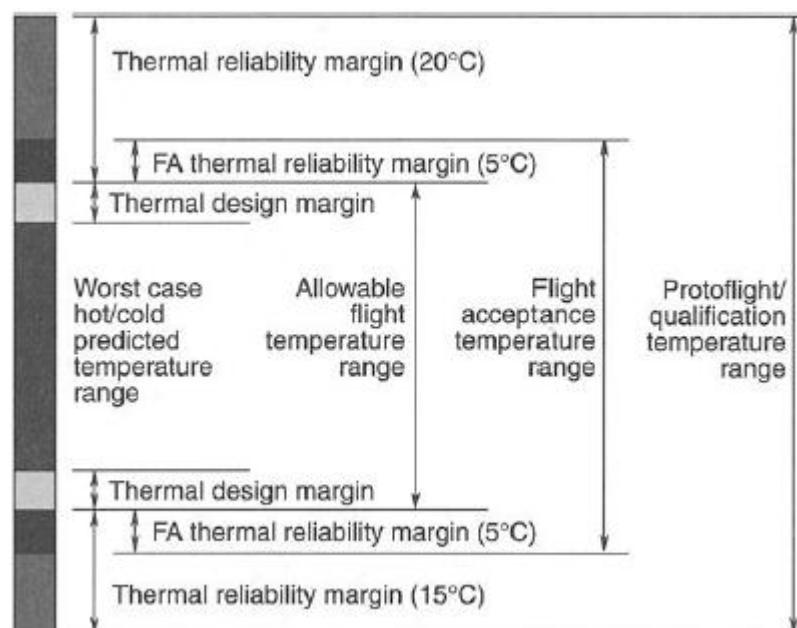


Ilustración 4: Terminología del margen térmico para programas de JPL/NASA. Fuente: Nasa.



La *Ilustración 4* muestra un ejemplo de márgenes admitidos para programas de la Nasa. Y sus rangos de aceptación.

A continuación se plantearan los conceptos teóricos en los cuales se ha basado este Proyecto para obtener las conclusiones.



Capítulo 2 CONCEPTOS TEÓRICOS

En este capítulo se tratarán diversos conceptos teóricos en los cuales estará basado el Proyecto. Estos conceptos incluyen los diferentes métodos de transmisión de calor, los estados en los que se producen transmisiones de calor, el concepto de resistencia de contacto y su importancia en el modelo, y algunas generalidades de equipos electrónicos, todo ello aplicado a sistemas de vuelo.

2.1 FUENTES DE CALOR.

Los equipos electrónicos dependen de los flujos y controles de electricidad para realizar innumerables funciones.

Como enuncian las leyes de Ohm ($V=I \cdot R$) y de Joule⁵, el aumento de la intensidad o de la resistencia del componente provoca un incremento de calor que es generado dentro del elemento. Este permanece generándose mientras circule corriente, según se acumula, la temperatura del componente comienza a crecer, a no ser que el calor encuentre una vía de salida hacia el exterior. Si esta vía no es lo suficientemente grande, la temperatura continuará incrementándose hasta la destrucción del componente.

⁵ Se conoce como efecto Joule al fenómeno irreversible por el cual si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo.



En la actualidad se busca una mayor potencia, con un menor tamaño de componente. Esto ha provocado un incremento en la temperatura, por una mayor concentración de la potencia dando lugar a un incremento de los fallos.

La temperatura debe ser controlada en cada elemento para garantizar un sistema electrónico fiable.

2.2 TRASMISIÓN DE CALOR.

Existen tres métodos básicos mediante los cuales el calor puede ser transmitido: conducción, convección, y radiación. Se verán cuáles afectan a los sistemas de vuelo y que ecuaciones se deben tener en cuenta para los análisis térmicos. Las leyes referidas a estos métodos son de vital importancia en el diseño y operación de un equipo electrónico.

2.2.1 CONDUCCIÓN:

Es la transferencia de energía cinética de una molécula a otra. En un sólido opaco es la única forma de transmisión de calor, donde los flujos de calor van de las áreas más calientes del cuerpo a las más frías. La conducción de calor también ocurre en líquidos y gases, pero normalmente la cantidad de calor transmitido es menor. Será la forma predominante de transmisión en este proyecto.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{kA}{x}(T_1 - T_2)$$

Ilustración 5: Ecuación de Fourier.

2.2.2 CONVECCIÓN:

Es la transferencia de calor mediante la mezcla de fluidos. Cuando esta mezcla se realiza por diferencia de densidades de los fluidos se denomina **convección natural**. Si se utilizan ventiladores, agitadores o algún otro factor externo se denomina **convección forzada**. Al suponer sistemas en vacío no será tenida en cuenta excepto en algún caso particular.

2.2.3 RADIACIÓN TÉRMICA:

Es la transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas. Son producidas por los cuerpos debido a su temperatura. Cuando esta energía choca contra otros cuerpos, la parte que es absorbida se convierte en calor.

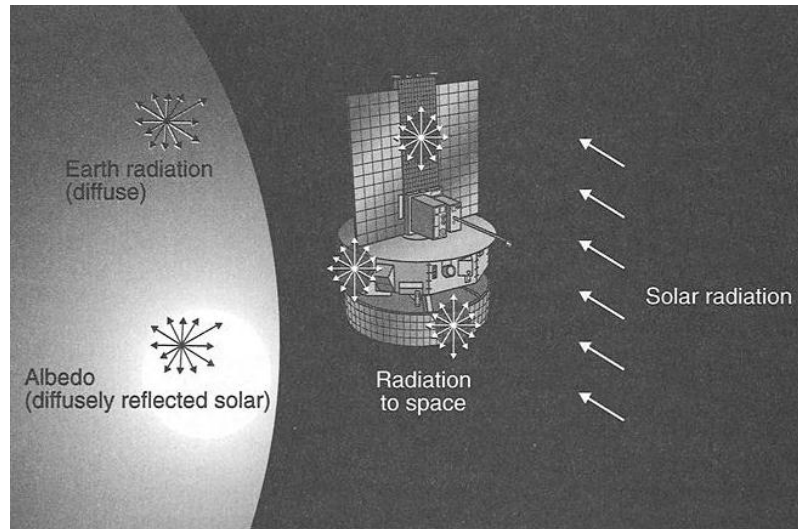


Ilustración 6: Satélite en ambiente térmico. Fuente: *Spacecraft Thermal Control Handbook*.

En la Ilustración 6, se muestran los diferentes tipos de radiación a los que está sometido un satélite.

- Radiación terrestre: la propia tierra emite radiación.
- Radiación difusa reflejada del sol: la tierra emite radiación debido al efecto del sol sobre ella.
- Radiación solar: El sol emite radiación propia.
- Radiación del satélite al espacio: Este tipo de radiación propia del satélite puede ayudar a disminuir las temperaturas de los componentes dentro del mismo.

La mayoría de los sistemas electrónicos usan estos tres métodos de transmisión de calor, pero generalmente uno de ellos predomina sobre el resto.



Se debe tener en cuenta que la radiación de componentes calientes a veces ayuda a la disipación de calor, dependiendo de su posición.

La fórmula que ilustra la radiación es $q = G \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot V_f \cdot A (T_1^4 - T_2^4)$ derivada de la ley de Boltzmann, esta establece que un cuerpo negro emite una radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total (W/m^2) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura.

$$E = \sigma \cdot T_e^4$$

Donde $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^4)$.

La potencia emisiva de una superficie real es menos que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dada por:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_e^4$$

Donde ε es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad con valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad es la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura. Esto depende marcadamente del material de superficie y de su acabado, de la longitud de onda y de la temperatura de la superficie. En los casos de estudio tenidos en cuenta en este proyecto, se utilizará una suposición de $\varepsilon = 0,9$ debido a que todos los sistemas de vuelo llevan una capa de barniz recubriendo todos los componentes con un buen acabado superficial.

2.3 TRANSFERENCIA DE CALOR TRANSITORIA.

Cuando la tasa de flujo de calor cambia dentro de un sistema electrónico, produce un cambio de temperatura en algún lugar de ese sistema. Del mismo modo, cuando hay un cambio de temperatura en el sistema, es debido a que ha habido un cambio de la tasa de flujo de calor en algún lugar de ese sistema. Estos cambios se denominan condiciones de transferencia de calor transitoria, porque el equilibrio del sistema es inestable.

Las condiciones de transferencia de calor transitoria se dan, por ejemplo, cuando enciendes por primera vez el sistema. La corriente eléctrica comienza a fluir y la temperatura a aumentar, resultando en un transitorio o en unas condiciones cambiantes.



También se darán condiciones transitorias cuando el sistema esté sometido a ciclos de temperaturas (ensayos). Esto es, considerando un sistema en una cámara ambiental donde la temperatura varía de forma lenta de -54°C a $+71^{\circ}\text{C}$. En este caso la temperatura exterior normalmente aumenta de forma más rápida que en el interior del sistema.

Un satélite en órbita experimenta cambios constantes de temperatura (transitorios), debido al cambio continuado del ángulo respecto al sol y la tierra. La intensidad de la radiación solar puede ser constante, pero el calor absorbido a lo largo de la superficie será variable porque el ángulo de incidencia solar con la misma está cambiando.

Algunas veces es necesario usar un sistema de enfriado auxiliar durante un periodo de tiempo corto, hasta que el sistema normal es capaz de hacerlo. Consideremos el caso de un misil⁶ cargado bajo el ala de un avión. Un sistema de enfriado auxiliar debería estar disponible mientras que el motor del avión se pone en marcha y realizan los protocolos y chequeos. El misil esta normalmente enfriado por el aire durante el vuelo cautivo y en la fase de vuelo libre. Ningún aire de refrigeración llega durante el despegue y el aterrizaje debido al extra de peso y coste que supondría. Por ello se tienen que diseñar de forma que no acumulen demasiado calor. Algunas veces se usan fluidos que cambien de estado para refrigerar estos sistemas, debido a que en el cambio de estado se absorbe muchísima energía.

La mayoría de los casos tratados en este Proyecto serán tratados en estado estacionario, el cual, se explica a continuación.

2.4 TRANSFERENCIA DE CALOR EN ESTADO ESTACIONARIO.

En el caso de que un sistema electrónico sea puesto en marcha y mantenido en funcionamiento durante un periodo muy largo de tiempo, con unos requisitos de energía constantes. Las temperaturas de los componentes electrónicos y las estructuras donde van montados (PCBs), normalmente se mantendrán constantes. Pequeñas fluctuaciones en el voltaje, pequeños cambios en las propiedades físicas de los componentes o leves variaciones en las condiciones del ambiente exterior pueden tener pequeños efectos en las temperaturas del sistema electrónico.

⁶ Caso incluido en Cooling techniques for electronic equipment, Dave S.Steinberg.



A efectos prácticos, sin embargo, el calor obtenido (o la energía disipada), es igual al calor perdido, así que el sistema ha alcanzado equilibrio térmico. El calor interno ha encontrado un camino desde la fuente de calor hasta el último disipador de calor. Normalmente las tres formas de transmisión de calor: conducción, convección y radiación, se han visto envueltas. Cuando el equilibrio térmico ha sido alcanzado, el índice de calor transferido por cada uno de estos métodos se mantiene constante.

Las condiciones de estado estacionario se pueden alcanzar en pocos minutos para componentes pequeños como diodos y transistores, o pueden tardar incluso días para componentes más grandes.

La mayoría de las correlaciones de este Proyecto se han realizado una vez obtenido el estado estacionario, rechazando las variaciones extremas de los estados transitorios.

2.5 RESISTENCIA DE CONTACTO.

Una propiedad muy importante para los estudios térmicos de este proyecto es la resistencia de contacto, inversa a la conductancia de contacto, será una de las incógnitas clave a estudiar en los modelos.

Se define a continuación suponiendo el contacto de dos bloques de metal.

Si las superficies de dos bloques de metal secos se sitúan en contacto, queda una considerable resistencia al flujo de calor de un bloque a otro, a no ser que las superficies estén vinculadas por soldadura u otro tipo de unión. Esta resistencia térmica se la denomina resistencia de contacto, es una función dependiente del área de contacto, y la presencia de líquidos, sólidos, o vacío en el espacio entre las dos superficies, la presencia de capas de óxido también afecta. El área de contacto entre superficies es una función dependiente de las propiedades físicas de los materiales de contacto, las condiciones de superficie y acabos, planitud, y de la presión de contacto.

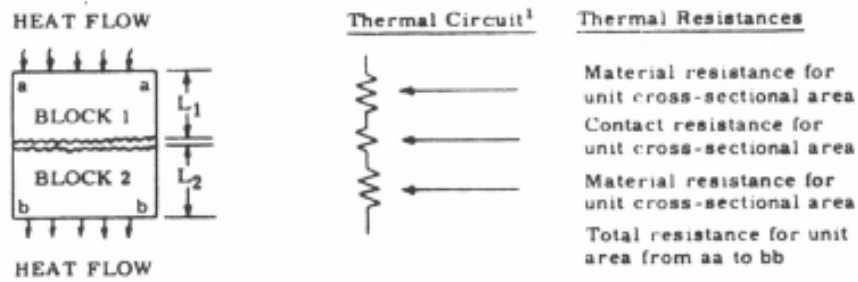


Ilustración 7: esquema resistencia de contacto entre bloques. Fuente: G.E. Section 502.5 Conduction in Solids-Steady State.

Como se aprecia en la **Ilustración 7**, la resistencia de contacto se presenta además de las resistencias independientes de los materiales. La resistencia de contacto puede ser mayor en comparación con la resistencia térmica de los materiales. Y rara vez despreciable frente a la resistencia térmica de los mismos.

La resistencia de contacto en vacío o en una presión de gas intersticial muy baja es considerablemente mayor que en presencia de aire u otros fluidos. Es por eso que es muy importante tenerla en cuenta en este proyecto.

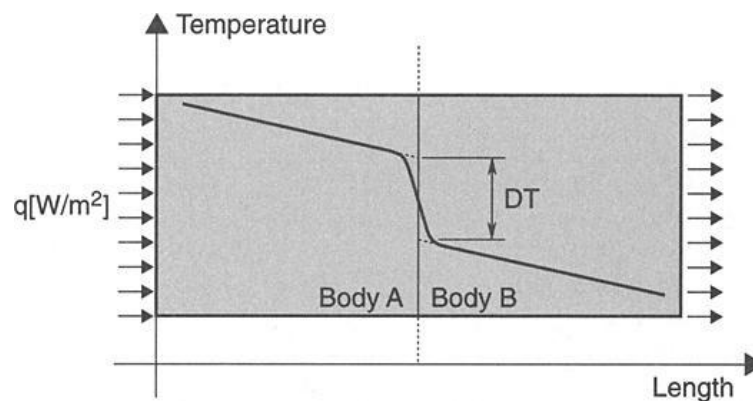


Ilustración 8: Caída de temperatura en la junta entre cuerpos. Fuente: F.Milanez

En la **Ilustración 8** se aprecia la resistencia al flujo de calor entre dos cuerpos en contacto como un incremento de temperatura.

2.5.1 DEFORMACIONES O FALTA DE PLANITUD.

Las superficies curvas, o con falta de planitud afectan en mayor medida a la resistencia de contacto que la rugosidad de la superficie. El grado de rugosidad considerado es para superficies planas.

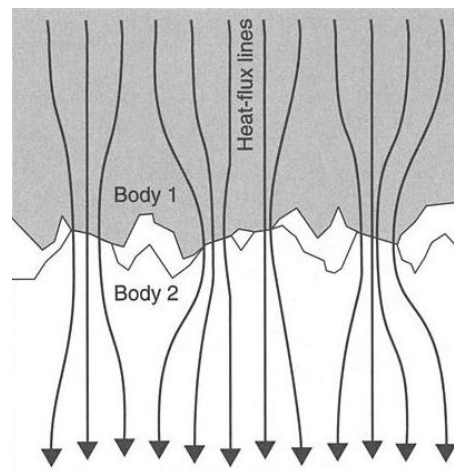


Ilustración 9: Conducción del calor a través de los puntos de contacto. Fuente: F. Milanez

En la **Ilustración 9**, se aprecia el efecto de la rugosidad sobre el flujo de calor, y como el área de contacto es menor debido a la misma.

2.5.2 RECUPERACIÓN ELÁSTICA.

Si la presión de contacto es suficiente para producir deformación plástica, a lo que seguirá una reducción de la presión que incrementara la resistencia de contacto, pero esa resistencia no será menos que la que habría adquirido si no hubiese deformación plástica.

2.5.3 EFECTOS DE LA PRESIÓN DE CONTACTO.

La resistencia de contacto depende de la presión de contacto. Para conocer en qué medida existen gráficas en función del material. Se puede ver un ejemplo en la **Ilustración 10**.

Curve	Material ⁴	Finish	Roughness Rms (μ in.) Block		Fluid in Gap	Temp (°F)	Condition	Ref. No.
			1	2				
a	Stainless Steel 304	Ground	42-60	43-48	Air	75	Clean, 10 ⁻⁴ mm Hg abs	45
b	Stainless Steel 304	Ground	15-15	10-10	Air	84	Clean, 10 ⁻⁴ mm Hg abs	45

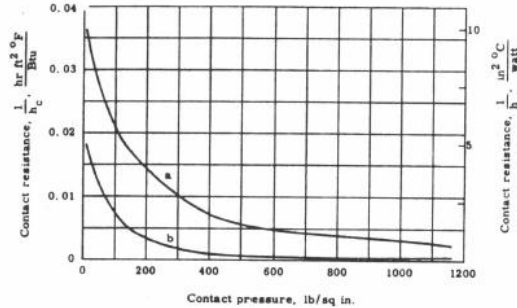


Ilustración 10: Ejemplo de efecto de la presión de contacto sobre la resistencia de contacto en acero inoxidable. Fuente: G.E. Section 502.5 Conduction in Solids –Steady State.

2.5.4 LA CONDUCTANCIA TÉRMICA.

La conductancia térmica, C, se define como el cociente entre el flujo de calor, Q, por unidad de área, A, y el salto térmico en la interfase, Δ T, calculado extrapolando la distribución lineal de temperatura en las dos probetas hasta la interfase, como se muestra en la Ilustración 11: Salto en la interfase: Fuente: BOL. SOC. ESP. CERAM. VIDR. VOL. 23 - NUM. 2 Ilustración 11:

$$C = \left(\frac{Q}{A} \right)_{interfase} = \frac{1}{R}$$

Siendo R la resistencia térmica de contacto.

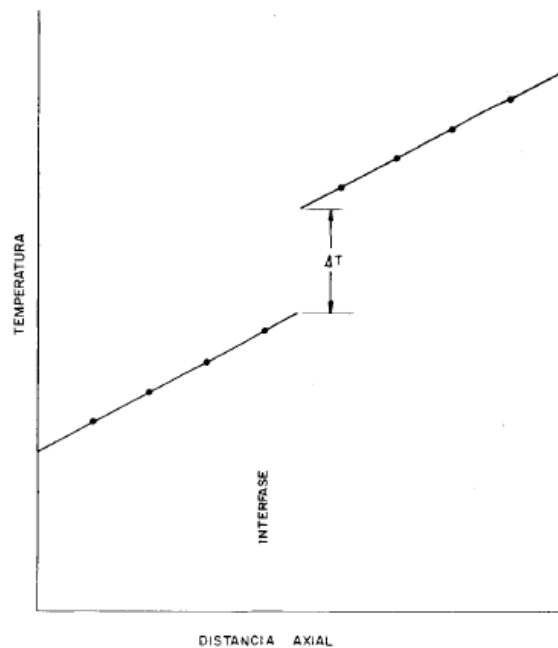


Ilustración 11: Salto en la interfase: Fuente: BOL. SOC. ESP. CERAM. VIDR. VOL. 23 - NUM. 2

2.6 EQUIPOS ELECTRÓNICOS PARA AVIONES, MISILES, SATÉLITES Y NAVES ESPACIALES.

Por requerimientos de espacio y resistencia los sistemas electrónicos suelen estar integrados en cajas. Esto dificulta la refrigeración de los componentes. Muchas de estas cajas son refrigeradas mediante convección forzada con el aire procedente del compresor del motor. Este aire está a una alta temperatura y presión, se pasa a través de la turbina de enfriamiento, y se seca con un separador de agua antes de usarlo. Este aire entra a veces por la parte trasera de la caja o por los adyacentes a los conectores, cargando pequeñas partículas de agua que se acumulan en el PCB, por lo que puede provocar fallos eléctricos en el sistema. Por ello, muchas especificaciones no permiten que la refrigeración por aire exterior en contacto directo con los componentes o circuitos.

La refrigeración por conducción se usa generalmente para enfriar equipo electrónico en el espacio. En las condiciones de vacío del espacio, los planos y las superficies suaves se deben utilizar con altas presiones de contacto para minimizar el incremento de temperatura entre superficies. En estas condiciones el aire no está considerado buen conductor de calor, su presencia aumentará marcadamente la resistencia de contacto en



las superficies o puntos de contacto. A veces se usan fluidos térmicos para reducir las resistencias de contacto en las condiciones de vacío del espacio, rellenando los pequeños huecos intersticiales con estos fluidos se evita el aire.

La refrigeración por aire se puede seguir utilizando en las condiciones de vacío del espacio, si se cuenta con cajas presurizadas. Un ventilador interno puede utilizarse para recircular el aire interior y refrigerar. Presurizar las cajas puede suponer un incremento de su espesor para resistir los esfuerzos con lo que supone un aumento del coste de la misma.

No se puede usar convección natural en satélites o naves porque requiere un campo gravitatorio para que la mezcla entre fluidos por diferentes densidades pueda producirse. En satélites y naves, los efectos de la gravedad son neutralizados por velocidad y características de caída libre. Por ello solo pueden considerarse como métodos de refrigeración en el espacio la conducción, radiación o convección forzada (en cajas presurizadas).

A continuación se tratará el método de análisis empleado en los modelos, las herramientas utilizadas, y algunas hipótesis aceptadas.





Capítulo 3 HERRAMIENTAS Y ELEMENTOS

FINITOS.

En este capítulo se introducirá el método empleado para los análisis, método de los elementos finitos (MEF) aplicado al programa utilizado, se comenzará por una breve explicación de en qué consiste el programa utilizado y a continuación las consideraciones a tener en cuenta para el correcto análisis de los modelos.

3.1 SOFTWARE EMPLEADO

El software empleado para el análisis y simulación de los diferentes modelos de elementos finitos son FEMAP y TMG.

TMG Thermal es un Software de cálculo térmico de elementos finitos, propiedad de Maya, que comercializa Siemens junto a sus Software de pre y post proceso, estos programas son: I-deas, FEMAP y NX. En el proyecto se utilizara FEMAP.

TMG utiliza elementos 1D que simplifican la resolución de problemas donde la conducción de calor es predominante en 1 dirección y elementos 3D que permiten hacer análisis térmicos detallados donde la conducción es una de las formas de transmisión de calor principales.

La manera de operar con TMG es utilizando agrupaciones de elementos, es decir, grupos. Tanto para definir acoplamientos como para definir cargas y condiciones de contorno.

Para la geometría del diseño podríamos utilizar algún software *CAD 2D* o *3D* como es el *PROE* y posteriormente importarlo a FEMAP para realizar el mallado, pero la dificultad que supone preparar la geometría para procesar dicho mallado en FEMAP, nos lleva a realizar toda la parte de modelización con FEMAP.



Ilustración 12: FEMAP Versión 10.2. Fuente: FEMAP Versión 10.2

3.2 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

Ingenieros y diseñadores utilizan en la actualidad una gran variedad de herramientas para el análisis de parámetros térmicos y estructurales, para una gran cantidad de montajes electrónicos.

Estos montajes electrónicos están a menudo requeridos para trabajar en altas condiciones de fiabilidad en entornos térmicos severos y de altas vibraciones, para ello es importante utilizar herramientas con un alto nivel de precisión.

Existen tres métodos populares de análisis disponibles para un ingeniero o diseñador experimentado, estos son: cálculos manuales, Método de las diferencias Finitas, y el Método de los elementos Finitos (MEF).



El cálculo manual puede ser efectivo para soluciones rápidas y aproximadas a problemas simples. También es usado para comprobaciones lógicas en cálculos largos y complejos por ordenador, búsqueda de errores en los parámetros introducidos y verificación de soluciones...

En este Proyecto se utilizarán cálculos manuales para pequeñas comprobaciones y se verán reflejados en tablas de Excel generalmente.

Pero no son eficaces para obtener resultados en problemas largos y complejos.

El Método de Diferencias Finitas es un método potente y eficaz. Este método se utiliza para resolución de problemas térmicos en sistemas electrónicos, en dos o tres dimensiones mediante simulaciones del modelo en estado estacionario o transitorio.

El modelo estará típicamente construido por nodos interconectados con resistencias representando el flujo de calor del sistema.

Las soluciones transitorias obtenidas de problemas complejos dan temperaturas, tiempos, calor, resistencias y capacidades de áreas o elementos en función de temperatura, tiempo, calor, resistencias u otras capacidades de otras áreas o elementos. Las soluciones son obtenidas mediante ordenadores con gran capacidad, porque estos modelos típicamente tienen cientos de nodos. El gran problema de este método es la cantidad de cálculos manuales necesarios para la preparación del modelo, y la alta probabilidad de errores en la introducción de los datos iniciales para el cálculo en el ordenador. Por tanto, no será tenido en cuenta en este Proyecto.

MEF, Método de los Elementos Finitos muy popular para el diseño y la evaluación de estructuras y sistemas complejos, en rangos de pequeñísimos componentes a grandes aviones o puentes. Este método es capaz de modelar virtualmente cualquier estructura, fluido o campo magnético, siendo capaz de analizarlo, evaluarlo o examinarlo. Los elementos mecánicos están representados mediante una malla discreta de nodos que están interconectados mediante varios tipos de elementos estructurales.

El análisis debe generar un modelo que represente la estructura real a modelar.

Una de las mayores ventajas de MEF para modelar equipos electrónicos es que un modelo puede ser utilizado para análisis y evaluación, térmica y estructural.

Esto reduce considerablemente el tiempo requerido, e incrementa drásticamente la productividad del departamento de diseño mecánico.



3.2.1 Consideraciones a seguir en un análisis por elementos finitos.

Es importante entender la estructura que se va a modelar, las trayectorias del flujo de calor, y las cargas del sistema. (Si se considera la radiación entre determinadas partes, si las tapas incrementan la resistencia...)

Consideraciones a tener en cuenta:

1. Entender los parámetros físicos y propiedades del programa MEF que vamos a usar. En este caso FEMAP&TMG
2. Visualizar la forma general de del sistema estructural y las distorsiones que pueden resultar de aplicar las cargas y restricciones
3. Determinar a priori, (si es posible), donde estarán las áreas críticas y donde deseamos la información.
4. Seleccionar las condiciones de contorno que representan correctamente la estructura y que son consistentes con el medio.
5. Examinar los diferentes tipos de elementos disponibles y seleccionar el sólido, armazón, viga, o placa que mejor representenla estructura a evaluar.
6. Entender la capacidad del programa y el ordenador, y generar una densidad de malla que sea capaz de conseguir de forma eficaz los resultados deseados.
7. Tener cuidado en representar las cargas y las condiciones de contorno que sean representativas de la geometría y las condiciones físicas.
8. Entender los flujos de calor y a que afectan las cargas en el sistema, (de donde vienen y a donde van).
9. Usar simetrías, si se puede para reducir considerablemente el tamaño del modelo.
10. Evitar utilizar cargas aplicadas a un nodo concreto, porque puede generar singularidades. Como estresar el nivel más allá del valor real.
11. La geometría del modelo debe aproximarse a la forma de la estructura real, incluyendo el uso de filetes y radios si es necesario.
12. Los nodos deben estar posicionados en áreas anticipadas de carga, de soporte y demás datos, como fuerzas, desplazamientos, y tensión.
13. Una malla gruesa (menos nodos) se puede usar en áreas donde la información no es crítica. Y una malla más fina (con más nodos), debe ser usada donde requerimos la información. La transición entre ambas debe ser gradual.
14. Un desplazamiento preciso y la información de la frecuencia de resonancia se pueden obtener generalmente con una malla gruesa, pero



un buen cálculo de tensiones generalmente requiere una malla más fina.

15. Tratar de evitar combinaciones de elementos con significativamente características/propiedades estructurales diferentes. (cosas que pueden deformarse y girar frente a otras que se pliegan.)
16. Si hay disponibles elementos curvos deben usarse para zonas curvas, en caso de que no, se utilizara un mallado fino en la zona.
17. Entender las propiedades y las limitaciones de los programas MEF para análisis. Por si se debe hacer alguna corrección en los resultados.

En este Proyecto se tendrán en cuenta estas consideraciones para los tres casos de estudio realizados, además de algunas hipótesis concretas en algunos de los mismos.

3.2.2 Singularidades

Las singularidades son anomalías que pueden producir graves errores en MEF con el cálculo de tensiones y temperaturas, especialmente si hay elementos estructurales muy pequeños que requieran una malla muy fina. Esto suele ocurrir en modelos PCB MEF porque incluyen soldaduras, pistas de cables eléctricos, y agujeros en la placa. El modelo MEF puede tener más de 1000 pequeños componentes, esto puede llevar a inhabilitar el modelo por tener unos valores tan pequeños que provocan la división entre cero, provocando que los cálculos de tensiones y temperaturas sean mucho más elevados que la realidad.

Las singularidades se pueden encontrar en puntos que son fuentes de calor, una carga puntual, un cambio abrupto en condiciones de contorno, o una esquina afilada en la estructura. Cuando una carga puntual es aplicada, el área teórica en el que está apoyada en cero, por lo cual la tensión en ese punto sería infinita.

Los elementos de MEF en los alrededores mostraran unos niveles artificiales de tensión, dependiendo del modelo y del tamaño de malla.

En alguno de los casos de estudio se ha prestado especial atención a superficies de espesores muy pequeños en las cuales al introducir potencias introducen una temperatura imposible que se debe descartar en el modelo.



3.3 APLICACIÓN PRÁCTICA.

El método de elementos finitos, consiste en dividir un sistema continuo (con infinitos grados de libertad) en conjuntos más pequeños denominados elementos, los cuales estarán formados y unidos entre sí por unos puntos que llamaremos nodos. Los nodos son los vértices que definen los bordes del elemento. Tienen un valor de temperatura interpolado o extrapolado con los elementos contiguos y no son puntos de cálculo. De este modo se conseguirá transformar el sistema continuo inicial en un sistema discreto con un número finito de grados de libertad.

Para resolver un sistema continuo es necesario resolver a menudo complejas ecuaciones diferenciales, ya que éste es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales. Por el contrario, en el sistema discreto únicamente se tiene que calcular el comportamiento de los elementos, el cual está definido por un sistema de ecuaciones, que puede ser lineal o no.

3.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PARA EVALUACIÓN EN TMG.

El primer paso a seguir para resolver de análisis térmico es importar o definir la geometría que vamos a estudiar, una vez definida se creará una malla computacional, esto es, la cantidad de nodos que va a disponer la malla o el tamaño de los elementos. A continuación, se procederá a la definición de propiedades y materiales. Una vez se tiene la malla, las propiedades y los materiales solo queda definir los acoplamientos, las cargas, las condiciones de contorno y ya se podrá resolver el problema.

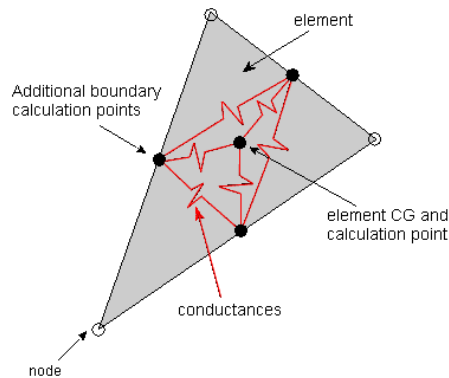


Ilustración 13: Descripción de nodos y elementos (Fuente: Presentación TMG Justo Sancho, 2012).

Para proceder a resolver el problema se construirá el MEF, se seleccionará el tamaño de elemento según el grado de precisión con el que queramos obtener temperaturas, aplicaremos la potencia disipada y los contactos que se tengan que definir, la geometría a mallar se dividirá según las áreas de contacto. En caso de considerar radiación tener en cuenta si es un espacio cerrado o semicerrado. En esta fase, el software utilizado solucionará el problema planteado, resolviendo el sistema de ecuaciones que se genera para el sistema de forma iterativa.

Una vez se simula el modelo, se reproducirá con las mismas condiciones en el laboratorio, se tomarán medidas con la cámara térmica, mediante sensores, o con termopares para comparar la predicción del modelo con medidas reales y con estas medidas se realimentarán los modelos realizando las modificaciones y ajustes necesarios, hasta que la diferencia entre el modelo y la realidad tenga la precisión que se requiera.

Tanto el modelado como los procesos de estudio de los casos en el laboratorio son análisis independientes, la experiencia demostrará que es más fácil realizar el modelo posteriormente a las medidas del laboratorio ya que eliminará varias iteraciones.

A continuación se explicará brevemente como afectan los estudios a los modelos realizados en su vida útil, y como los modelos pueden evitar algunos de los ciclos a los que están sometidos para mejorar así la duración de los componentes.





Capítulo 4 PREDICCIÓN DE LA FATIGA TÉRMICA EN COMPONENTES

Como se ha visto anteriormente el presente proyecto está enfocado al diseño y la modelización térmica de equipos electrónicos. Se estudiara el entorno térmico de los componentes montados sobre tarjetas de circuito impreso (PCBs) en diferentes condiciones de contorno.

Los modelos serán simulados bajo condiciones más exigentes que el entorno al que se verá sometido el equipo de vuelo durante su misión. Para realizar la validación de los mismos se hará uso de las especificaciones de la Agencia Espacial Europea (ESA).

4.1 GENERACIÓN DE FATIGA

Los sistemas electrónicos fabricados a día de hoy contienen una alta cantidad de componentes electrónicos sofisticados con diferentes tamaños y formas, estos están soldados al PCB mediante un montaje en superficie (soldados) o por agujeros y pines (clavados). Estos componentes son de plástico, cerámicas, y otros materiales con numerosos cables o sin ninguno de ellos.

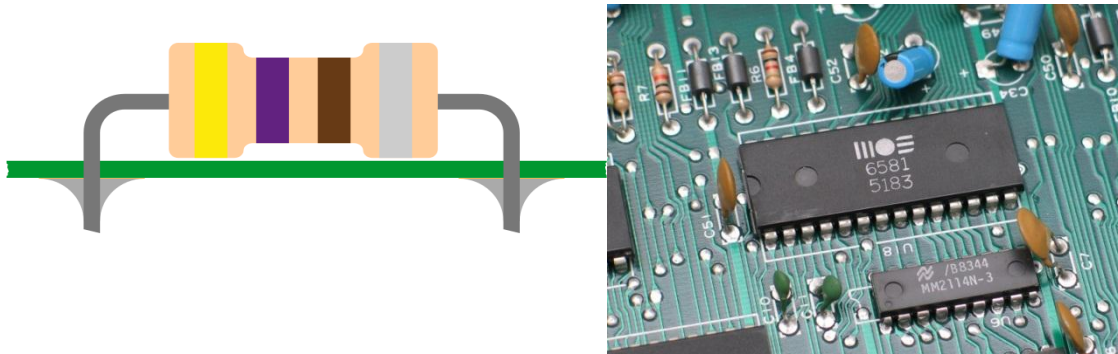


Ilustración 14: Componentes clavados por agujeros o pines. Fuente. Crisa.

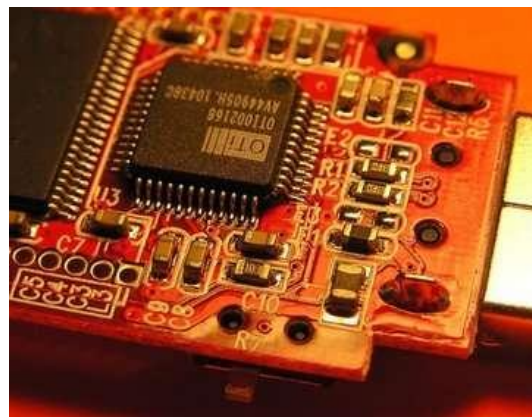


Ilustración 15: Componentes en montaje superficial. Fuente: Crisa.

Los componentes y montajes son fabricados a lo largo de todo el mundo, con un objetivo común; producir un producto altamente fiable con un equilibrio coste-eficiencia.

El mal funcionamiento de algún componente puede simplemente ser un coste económico, o llegar incluso a costar vidas por pertenecer a un sistema importante dentro de un avión, tren o barco.

Para implementar la fiabilidad de estos componentes, se han creado diferentes métodos y técnicas de control. Este estudio se centrará en los “BAKE AND SHAKE methods”. Estos ensayos han demostrado incrementar sustancialmente la fiabilidad de los sistemas electrónicos, sometiendo los mismos a ciclos térmicos y de vibraciones antes de enviar

los sistemas a los consumidores. Estos análisis formaran parte de la parte experimental de este Proyecto. Especialmente del primer caso de estudio.

Estos tipos de ensayos se implantaban con éxito en programas militares y actualmente se usan cada vez más para comercializar equipos electrónicos.

La filosofía del método “SHAKE AND BAKE” es muy sencilla. Consiste en someter el sistema electrónico a ciclos de temperatura y vibraciones suficientemente severos para exponer debilidades y defectos latentes, pero no demasiado severos para destruir las partes en buen funcionamiento. Las partes defectuosas son remplazadas o reparadas para que el receptor del producto adquiera las condiciones y requisitos pedidos.

Todos los sistemas deben verse sometidos a estas series de ensayos llamados ESS (environmental stress screening).

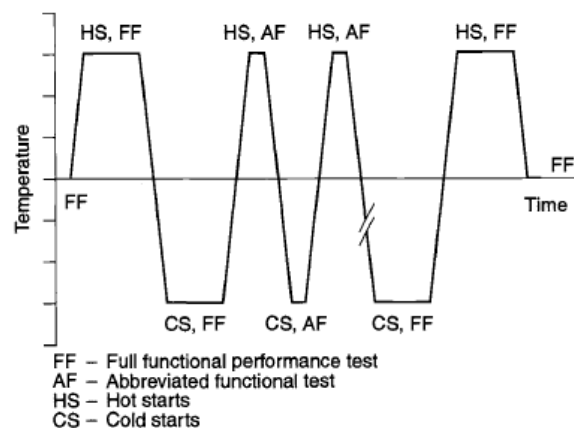


Ilustración 16: Perfil típico de ciclos térmicos. Fuente: *Spacecraft Thermal Control Handbook*.

El gran problema de estos ensayos es como determinar la magnitud y la severidad de los ciclos a aplicar, para que esos defectos latentes salgan a la luz pero no se sobre estresen el resto de componente, y se vea reducida la vida útil del sistema.

Estos cálculos se pueden realizar una vez se haya comprendido cómo reaccionan los componentes a estos ciclos, y entendiendo el concepto de daño acumulado.



4.2 DAÑOS ACUMULADOS DURANTE CICLOS TÉRMICOS Y VIBRACIONALES.

Es imposible no reducir en algo la vida útil de los componentes al realizar estos ensayos. Una buena regla para predecir un ESS es que debe usar un 10% de vida útil y como máximo un 15%. Se debe tener en cuenta que según se van haciendo reparaciones no se puede seguir realizando el ensayo al mismo nivel o gastaría toda su vida útil al detectar varios fallos, por ello en numerosas ocasiones se reducen las condiciones de los ensayo al 75%, 50% después de realizar las reparaciones, para reducir el daño acumulado en las repeticiones de los ESS.

4.3 PREDICCIÓN DE FATIGA EN ANÁLISIS TÉRMICOS.

La forma común de realizar ensayos de “SHAKE AND BAKE” es encender la fuente de tensión para realizar el ensayo de la función y después apagarlo cuando ha sido completado. Estos ciclos de encendido y apagado introducen alternativas funciones de estrés. Cada ciclo de estrés experimentado por el sistema electrónico usará una pequeña parte de su vida total.

Cuando han sido experimentados suficientes ciclos de estrés, la vida útil ha sido usada, y aparecerán fallos en elementos como soldaduras, agujeros de la placa, y cable resultando en fallo del sistema.

Los materiales pueden romperse cuando están sujetos a ensayos de estrés aunque sean considerablemente más bajos que su tensión de rotura, el fallo puede aparecer en grietas microscópicas que se pueden convertir en grietas visibles, que luego pueden desarrollarse en rupturas bajo aplicación de cargas.

La aparición de grietas microscópicas no significa que el fallo vaya a ocurrir, a veces, paran de crecer, o crecen tan lentamente que el fallo no ocurre.

El problema de los cambios térmicos es que pueden ocurrir fuera de estos ensayos, en lugares de almacenamiento debido a los cambios de temperatura entre la noche y el día por ejemplo. Sin ningún tipo de operación eléctrica los componentes deben poder soportar esos cambios acumulados.

La experiencia en campos militares dice que, los fallos típicos ocurridos en equipos electrónicos son debidos en un 80% a problemas de ciclos térmicos y en un 20% debidos a ciclos vibraciones.⁷

4.4 CICLOS RÁPIDOS Y LENTOS DE FATIGA.

Las propiedades de fatiga para innumerables metales y plásticos se pueden encontrar en diferentes referencias⁸. Estas propiedades son normalmente obtenidas mediante ciclos de estrés controlados, usando máquinas de precisión y probetas pulidas que están testadas para fallas a partir de un rango de estrés.

Los puntos obtenidos se ponen en una gráfica con el nivel de estrés en la vertical, y el número de ciclos al que han fallado en la horizontal. Una línea recta determina la mejor media de propiedades de fatiga para el espécimen que ha sido testado. **Ilustración 17.**

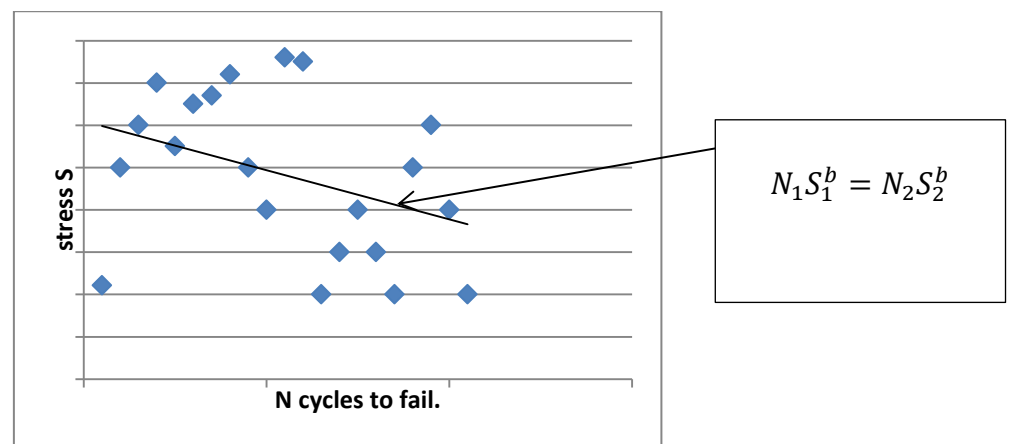


Ilustración 17 Figura típica de curvas de fatiga S-N.

⁷ Dave S. Steinberg, *Preventing Thermal Cycling and vibration Failures in Electronic equipment*, Presented at the 9th Annual IEEE Dayton Chapter Symposium, Noviembre 30, 1988.

⁸ MIL-HDBK-5B, *Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle structures*.



La fatiga puede ser estimada por la pendiente de la gráfica, a partir de la siguiente relación:

$$N_1 S_1^b = N_2 S_2^b$$

Dónde:

N= Número de ciclos de estrés hasta producir fallo.

S= nivel de estrés al que aparece el fallo.

b= exponente de fatiga relacionado con la recta de la gráfica.

El exponente b muestra las propiedades de fatiga de cada material, siendo útil para predecir la fatiga de otros miembros del sistema del mismo material, expuestos a las mismas condiciones.

La pendiente de la curva de fatiga refleja la condición de las zonas críticas como agujeros, muescas, o cambios afilados a lo largo de la sección, que se definen como zonas de concentración de estrés.

Estos factores de concentración de estrés no son tenidos en cuenta antes de los 5000 o más ciclos. Tampoco son tenidos en cuenta en materiales muy dúctiles, porque pueden aliviar la tensión ellos mismos con deformación plástica.

Muchos otros tipos de curvas sirven para mostrar las propiedades de otros materiales para aplicaciones especiales.

4.5 ESTIMAR EL CICLO DE FATIGA TÉRMICO.

Le experiencia en ensayos ha enseñado que los montajes en superficie o a través de agujero usualmente no se rompen cuando están siendo forzados a doblarse hacia adelante y hacia atrás en el entorno de ciclos térmicos. Aunque la tensión de flexión sea superior a la tensión máxima, la ecuación de tensión de flexión es lineal, por lo cual, que la tensión supere el rendimiento máximo ligeramente no suele tener un efecto grave.

Se utilizan factores de forma, basados en la sección central de la geometría del alambre, para establecer el estrés real del mismo. Además, el número de ciclos de estrés es menos de 5000, lo que no provoca la ruptura completa, a no ser que haya cortes severos o rasguños previos.

Cuando el ciclo térmico arrastra los cables en el doblar, los cables transfieren los esfuerzos en forma de momentos de vuelco.

Cuando los cables eléctricos están anclados directamente en tensión por el método componentes clavados (los pines sobresalen por debajo de la superficie) o SMT (montados en superficie), el resultado del análisis o ensayo resulta en que la soldadura falla, o el cable, dependiendo de la geometría de la estructura. Un cable en tensión puede fallar en el ensayo si se sobrepasa la tensión última de esfuerzo del mismo. Del mismo modo, si no hay suficiente soldadura alrededor del cable es la soldadura la que falla. En conclusión, si un cable está en tensión puede fallar tanto por la soldadura como por el límite de tensión del propio cable.

4.6 OBTENCIÓN DEL PEOR CASO DE TEMPERATURA.

Los sistemas electrónicos experimentan un transitorio de transferencia de calor cuando el sistema se enciende por primera vez, o cuando el sistema de refrigeración está apagado pero el sistema permanece en funcionamiento.

Los vehículos espaciales experimentan estos transitorios de transferencia de calor, porque cambian la orientación respecto al sol, provocando que la incidencia de los rayos sea distinta.

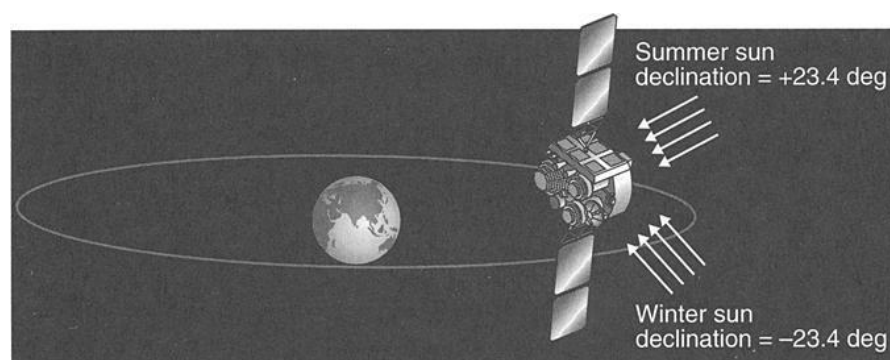


Ilustración 18: Iluminación solar del satélite GEO. Fuente: Spacecraft Thermal Control Handbook.



Cuando un cuerpo se calienta, la temperatura aumentará mientras la fuente de calor permanezca y el calor no sea disipado por ningún lugar. La temperatura del cuerpo continuará aumentando hasta que el ratio de calor de la fuente aplicada sea igual al ratio de escape de calor, si el cuerpo está aislado perfectamente, todo el calor aplicado hará que suba la temperatura de forma lineal.

La temperatura que alcanzará respecto al tiempo puede ser determinada por la siguiente ecuación:

$$\Delta t = \frac{Q}{WC_p} = \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{sec}}$$

Dónde:

Q= calor introducido.

W=peso

C_p=calor específico

Esta ecuación se utiliza para encontrar la temperatura de peor caso en un sistema simple, como se ha explicado anteriormente esta se supone en la situación de que no se disipase calor hacia el exterior, ni por radiación, conducción o convección.

A continuación se explicará el funcionamiento de un programa generado en Python que ayudara en el análisis de los resultados, facilitando la forma de iterar y correlar los modelos, en un principio se utilizaron programas como Excel, y al ver la imposibilidad de manejar numerosos datos al mismo tiempo se optó por la realización de este programa para obtener de forma visual un informe, con gráficas que facilitaban la comparación de modelos entre sí y la comparativa con temperaturas determinadas por el laboratorio.



Capítulo 5 PROGRAMA KELVIN.

Debido a la naturaleza del proyecto, se necesita la capacidad de comparar distintos modelos entre sí, de forma rápida y sencilla. El programa utilizado FEMAP, junto con TMG, no permite acceder a los datos de forma fácil para comparar distintos modelos entre sí y facilitar con ello la iteración y la correlación con los datos obtenidos en el laboratorio.

Para ello se utilizaron las siguientes herramientas:

- **Python** es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis que favorezca un código legible. Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Es un lenguaje interpretado, usa tipado dinámico y es multiplataforma. Es administrado por la Python Software Foundation. Posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License,¹ que es compatible con la Licencia pública general de GNU a partir de la versión 2.1.1. Y es la que se utilizará para generar el programa.
- **Qt Designer** es una herramienta de Qt para diseñar y construir interfaces gráficas para usuarios (*ilustración19*). Permite diseñar todos los componentes de una interfaz, utilizando elementos sencillos y un sistema coger-arrastrar para colocarlos en la posición requerida. Tiene la capacidad de enseñar el resultado final de tu interfaz antes de introducir ningún tipo de código, lo que facilita mucho su uso. Con ello se realizó la interfaz gráfica del programa. Los diseñadores de Qt generalmente utilizan XML .ui archivos para guardar los diseños sin que genere ningún código por su cuenta, No obstante Qt incluye la utilidad uic que genera un código en C++ de la interfaz creada,Qt.

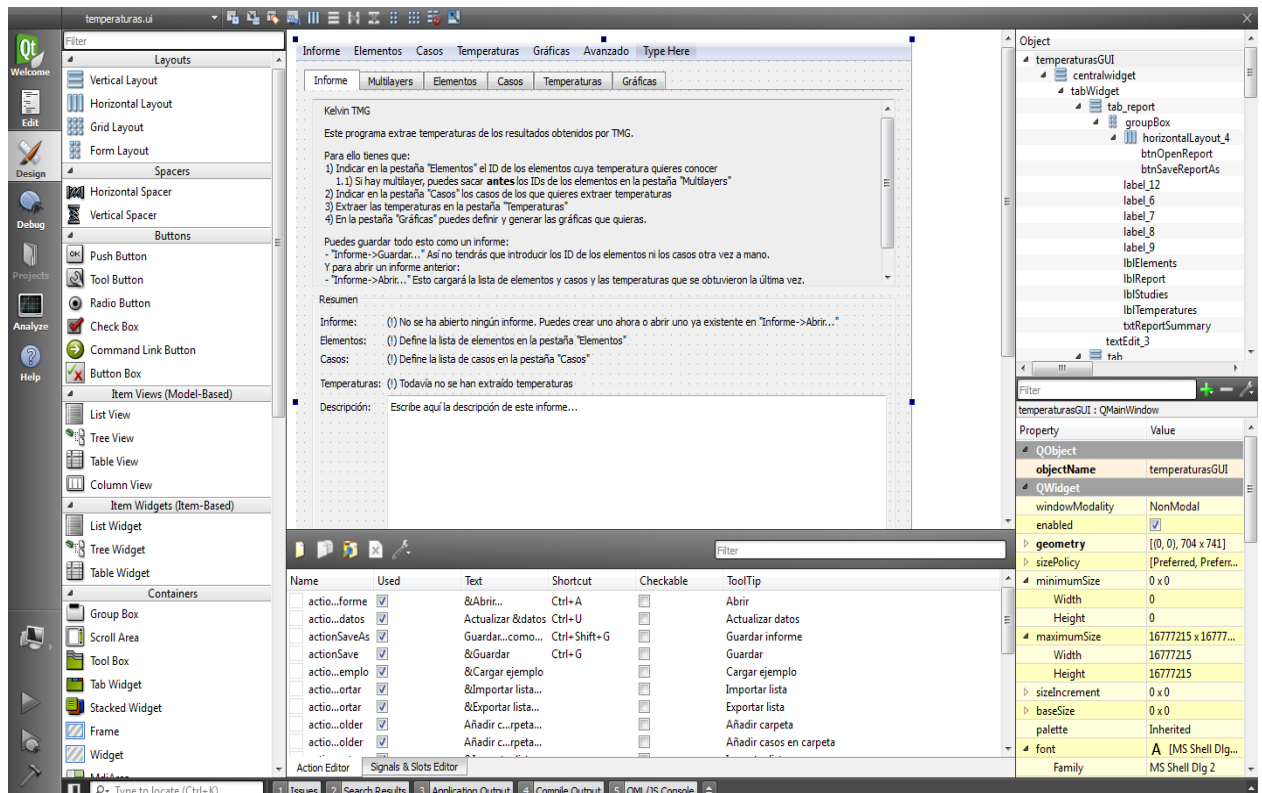


Ilustración 19: Qt designer ejemplo de interfaz gráfica.

Con estas herramientas se programó KELVIN. El programa que se utilizará para la obtención de temperaturas y realización de gráficas.

5.1 FINALIDAD DEL PROGRAMA KELVIN

El objetivo de la creación del programa, como ya se ha explicado anteriormente, es principalmente conseguir comparar modelos entre sí, o con temperaturas de referencia de forma rápida y sencilla.

El programa es capaz de generar y exportar gráficas para realizar correlaciones de forma rápida y visual.

El programa Kelvin, resuelve las necesidades obtenidas en los primeros modelos.

Al comenzar este Proyecto, la forma de trabajo se basaba en la obtención de temperaturas a través de la pantalla, es decir, como muestra la *ilustración 20*, en la

imagen inferior de la misma se aprecia que el programa marca el valor numérico de la temperatura en cada elemento.

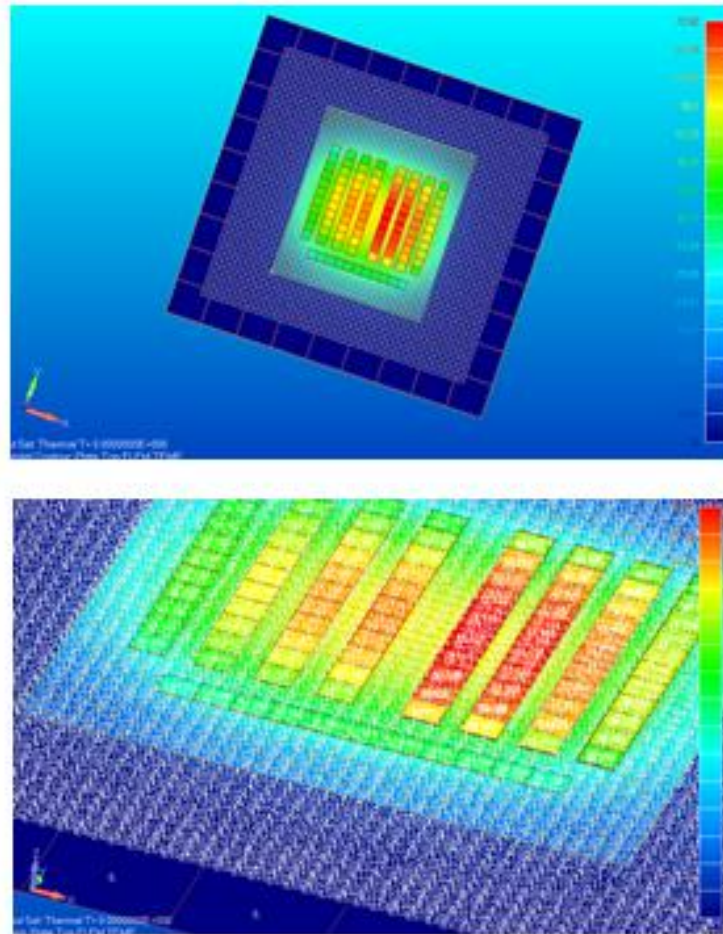


Ilustración 20: Ejemplo de obtención de temperaturas. Fuente: Elaboración propia

Para obtener mejor visibilidad, se planteó la opción de crear grupos con una serie de elementos de interés (como si fuesen termopares), para obtener la temperatura más fácilmente, como muestra la *ilustración 21*.

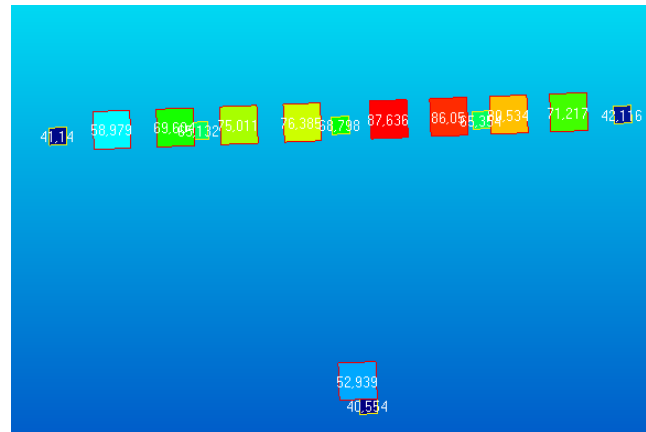


Ilustración 21: Obtención de temperaturas mediante visualización de grupos de elementos. Fuente: Elaboración propia.

La obtención de temperaturas mediante visualización de grupos específicos de elementos simplificaba y ayudaba a comparar las temperaturas obtenidas cambiando ciertos parámetros. Para analizar mejor los resultados se complementó con Excel. Ilustración 22.



Channel	Shroud	TRP	Vacuum	2	5	3	7	4	67	10	6	11	8	1	12	13	14	16		
Elemento				70950	23997	24008	70958	24019	24030	70966	24041	24074	70974	24052	24063	71016	24085	70372		
TemperaturaLAB	-0,2315	56,4	0,0000045	31,1	43,7	57,5	48	61,8	80,9	56,4	72,4	77	55,7	62,8	61,2	30,9	40,4	30,1		
Pletina, marco 150 C70			CC_PS_M150_C70	40,90	50,37	56,43	55,81	59,35	59,77	57,11	64,44	64,00	56,16	61,10	55,74	43,37	44,75	34,71		
			Diferencia de temp. Con Lab	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑		6,00
			ABS Diferencia de temp. Con Lab	13	1	1	8	2	21	1	8	15	0	2	5	13	4	5	6	4,03
Pletina y marco 150 C80			CC_PS_M150_C80	44,04	51,81	56,51	55,52	58,61	58,66	55,94	63,51	63,48	55,97	61,49	57,44	46,83	46,43	37,84		
			Diferencia de temp. Con Lab	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑		7,05
			ABS Diferencia de temp. Con Lab	13	2	1	8	3	22	0	3	14	0	1	4	16	6	8	7	4,96
Pletina y marco 150 C90			CC_PS_M150_C90	36,81	45,38	50,66	43,78	53,04	53,22	50,51	58,05	57,85	50,14	55,50	50,87	39,66	40,30	31,19		
			Diferencia de temp. Con Lab	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↑		6,61
			ABS Diferencia de temp. Con Lab	6	4	7	2	9	28	6	14	15	6	7	10	9	0	1	9	3,93
Pletina y marco 100 c80			CC_PS_M100_C80	44,04	51,81	56,51	55,52	58,61	58,66	55,94	63,51	63,48	55,97	61,49	57,44	46,83	46,43	37,84		
			Diferencia de temp. Con Lab	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑		7,05
			ABS Diferencia de temp. Con Lab	13	2	1	8	3	22	0	3	14	0	1	4	16	6	8	7	4,96
Pletina y marco 150 C80			CC_PS_M150_C80	44,04	51,81	56,51	55,52	58,61	58,66	55,94	63,51	63,48	55,97	61,49	57,44	46,83	46,43	37,84		
			Diferencia de temp. Con Lab	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑		7,05
			ABS Diferencia de temp. Con Lab	13	2	1	8	3	22	0	3	14	0	1	4	16	6	8	7	4,96
Pletina y marco 200 C80			CC_PS_M200_C80	34,30	44,79	51,18	50,53	54,14	54,61	51,93	59,30	58,79	50,83	55,74	50,10	37,99	39,67	29,52		
			Diferencia de temp. Con Lab	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓		5,85
			ABS Diferencia de temp. Con Lab	4	5	6	3	8	26	4	13	18	5	7	11	7	1	1	8	3,64
Pletina y marco 200 CA70 CB25			CC_PS_M200_CA70_CB25	44,30	57,15	68,33	68,89	74,25	76,24	73,82	79,98	77,86	68,90	71,45	61,74	47,82	49,39	36,66		
			Diferencia de temp. Con Lab	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑		5,39
			ABS Diferencia de temp. Con Lab	13	7	11	21	12	5	17	8	1	13	9	1	17	9	7	10	5,39
Pletina y marco 150 CA70 CB25			CC_PS_M150_CA70_CB25	49,95	61,77	72,24	72,66	77,77	79,57	77,14	83,36	81,46	72,72	75,50	66,45	53,27	53,48	41,39		
			Diferencia de temp. Con Lab	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑		5,33
			ABS Diferencia de temp. Con Lab	13	12	15	25	16	1	21	11	4	17	13	3	22	13	11	14	5,33
Pletina500 y marco 200 CA70 CB25			CC_PS500_M200_PA70_PB25	42,14	55,01	66,23	66,79	72,16	74,16	71,74	77,90	75,77	66,78	63,33	59,60	45,64	47,19	34,43		
			Diferencia de temp. Con Lab	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↑		5,40
			ABS Diferencia de temp. Con Lab	11	5	9	19	10	7	15	3	1	11	7	2	15	7	4	9	4,93
Pletina500 y marco 200 CA80 CB30			CC_PS500_M200_CA80_CB30	39,97	52,23	62,91	63,33	68,50	70,31	67,85	74,16	72,23	63,95	66,18	56,92	43,33	44,70	32,57		
			Diferencia de temp. Con Lab	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↑		5,23
			ABS Diferencia de temp. Con Lab	3	5	5	15	7	11	11	2	5	8	3	4	12	4	2	7	4,28
Pletina500 y marco 250 CA80 CB30			CC_PS500_M250_CA80_CB30	36,12	49,16	60,39	60,92	66,27	68,23	65,78	72,05	69,96	60,91	63,56	53,79	39,63	42,12	29,53		
			Diferencia de temp. Con Lab	↑	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓		5,27
			ABS Diferencia de temp. Con Lab	3	1	3	13	4	13	9	0	7	3	1	7	9	2	1	5	4,02

Ilustración 22: Ejemplo de análisis de variación de temperaturas en diferentes casos con Excel.



La comparación de modelos se complicaba con cada iteración, así que se procedió a analizar la forma en que generan resultados FEMAP&TMG.

cadgrp.dat	02/12/2014 12:57	Archivo DAT	120 KB
GTEMPF	02/12/2014 12:58	Archivo	206 KB
INPF	02/12/2014 12:57	Archivo	757 KB
Model Solid Temperature.png	02/12/2014 12:58	Imagen PNG	14 KB
MODLCF	02/12/2014 12:58	Archivo	2.262 KB
MODLF	02/12/2014 12:57	Archivo	1.946 KB
MSGF	02/12/2014 12:58	Archivo	4 KB
REPF	02/12/2014 12:58	Archivo	1.324 KB
TEMPF	02/12/2014 12:58	Archivo	586 KB
Thermal Solution Convergence.png	02/12/2014 12:58	Imagen PNG	17 KB
tmg49.dat	02/12/2014 12:58	Archivo DAT	285 KB
tmggeom.dat	02/12/2014 12:58	Archivo DAT	5.772 KB
tmgmdl.dat	02/12/2014 12:57	Archivo DAT	1.167 KB
tmgmsg.dat	02/12/2014 12:58	Archivo DAT	4 KB
tmgrslt.dat	02/12/2014 12:58	Archivo DAT	2.323 KB
tmgtempe.unv	02/12/2014 12:58	Archivo UNV	203 KB
tmgtempn.unv	02/12/2014 12:58	Archivo UNV	160 KB
VUFF	02/12/2014 12:57	Archivo	1.016 KB

Ilustración 23: Archivos generados por TMG. Fuente: Elaboración propia.

TMG crea numerosos archivos, de los cuales no todos son legibles, entre ellos esta TEMPF, un archivo de texto que contiene todas las temperaturas de los elementos de todo el modelo. Por lo cual se pensó en la realización de un script en Python para poner en gráficas esa información. Llegados a este punto, se pensó en crear una herramienta que ayudase a diseñadores térmicos y que tuviese una interfaz gráfica fácil de usar para personas que no tengan conocimientos de programación.

Así que solo habría que crear un programa sencillo que leyese estas temperaturas y las comparase con temperaturas de referencia, o con otros modelos. Esto se consiguió con KELVIN.

El programa debía ser una herramienta de fácil uso y algo flexible para poder leer resultados de modelos que no tenían relación entre sí, es decir que sirviese para los diferentes casos que se realizarán a lo largo del proyecto. Y a poder ser con una interfaz gráfica para que pudiese ser usado en un futuro por personas sin conocimientos de programación.

El resultado fue un programa con diferentes pestañas, que genera un informe con las temperaturas de los elementos de interés, y con flexibilidad para la creación de gráficas con esos resultados.

Con Qt se creó la siguiente interfaz gráfica:

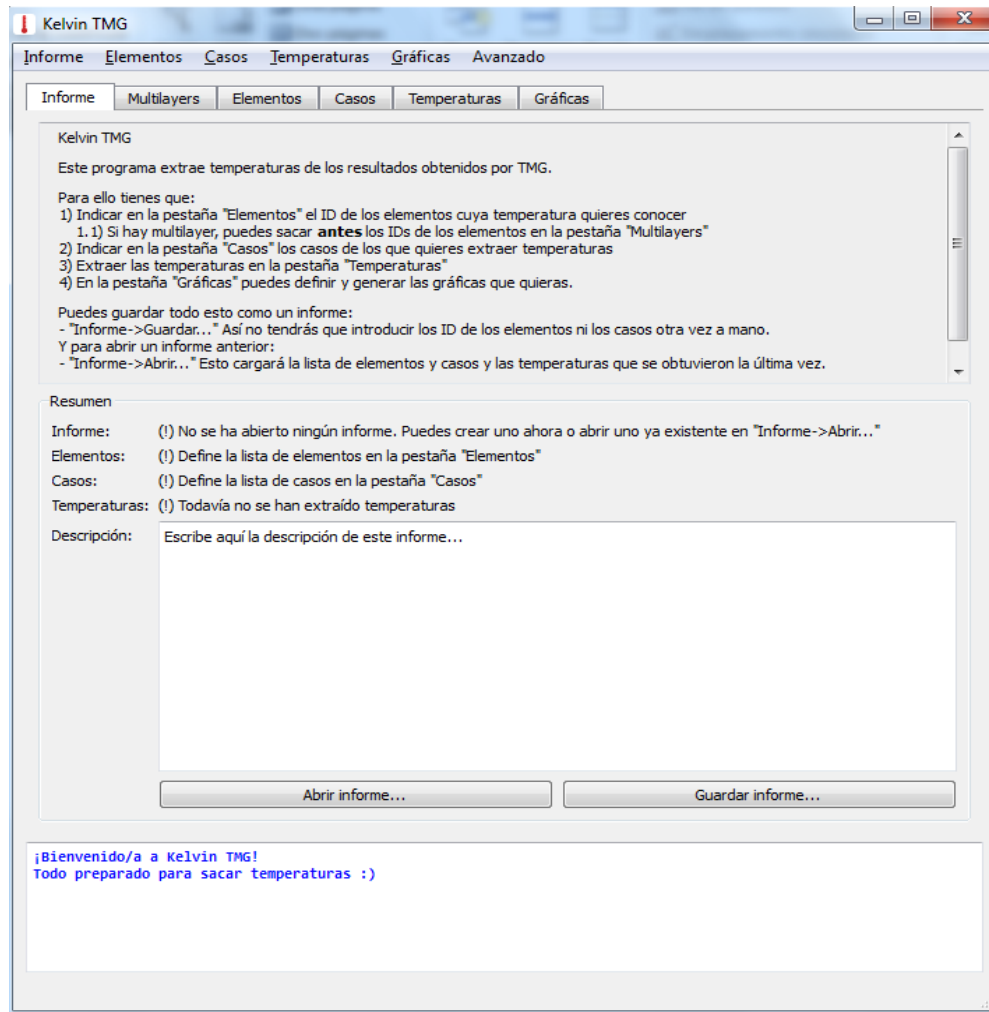


Ilustración 24: Pantalla principal de kelvin. Fuente: Elaboración propia.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA KELVIN.

El programa consta de una interfaz gráfica con seis pestañas con diferentes características, serán explicadas a continuación.

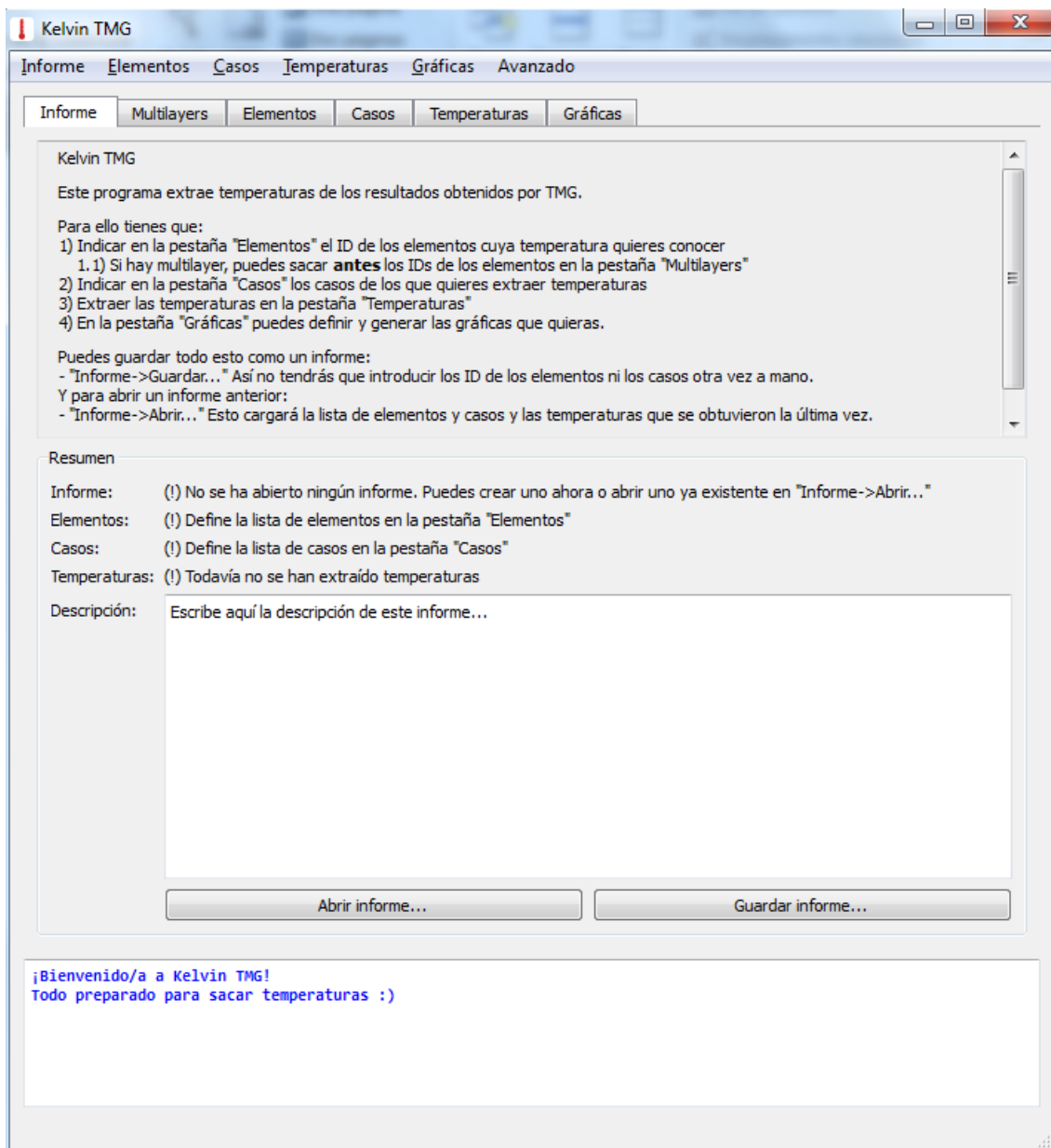


Ilustración 25: Pantalla de inicio del programa

La **ilustración 25** muestra la pantalla principal al arrancar el programa, en ella se aprecia una primera fila de botones típica de Windows con algunas características adicionales como guardar, guardar como, abrir un informe existente, o características avanzadas de las preferencias de las presentaciones de las gráficas

Y una segunda fila de pestañas donde se irán recorriendo las diferentes pestañas del programa para obtener el informe con la comparativa de temperaturas y las gráficas necesarias.



En esta primera pestaña se explica un poco el funcionamiento y se permite meter una breve descripción del informe a realizar.

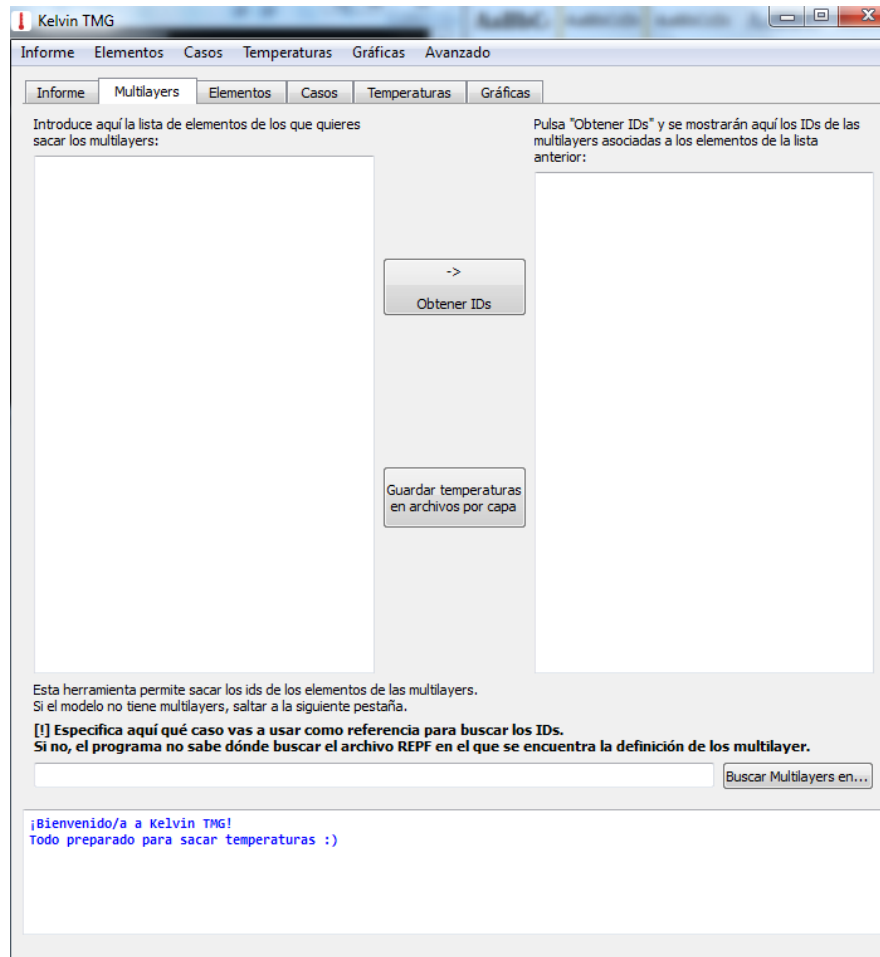


Ilustración 26: Pestaña Multilayers

Esta segunda pestaña *ilustración 26*, se utilizará solo para casos con multilayers. Una opción de generación de la geometría del modelo, en la cual se crean capas adicionales, muy utilizada para casos de PCBs formados por capas intercaladas de poliamida y cobre, en ella se obtienen los IDs⁹ de las multilayers, asociadas a los elementos que las forman. Esta herramienta facilita la obtención de los IDs de forma rápida y sencilla desde el

⁹ ID: Numeración dada por FEMAP & TMG a todos los elementos que componen un modelo.



archivo e texto generado por el programa para la posterior obtención de las temperaturas en cada capa del PCB.

En ella simplemente se introducen los elementos que forman las multicapas y se obtienen los Ids correspondientes dependiendo del número de capas introducido.

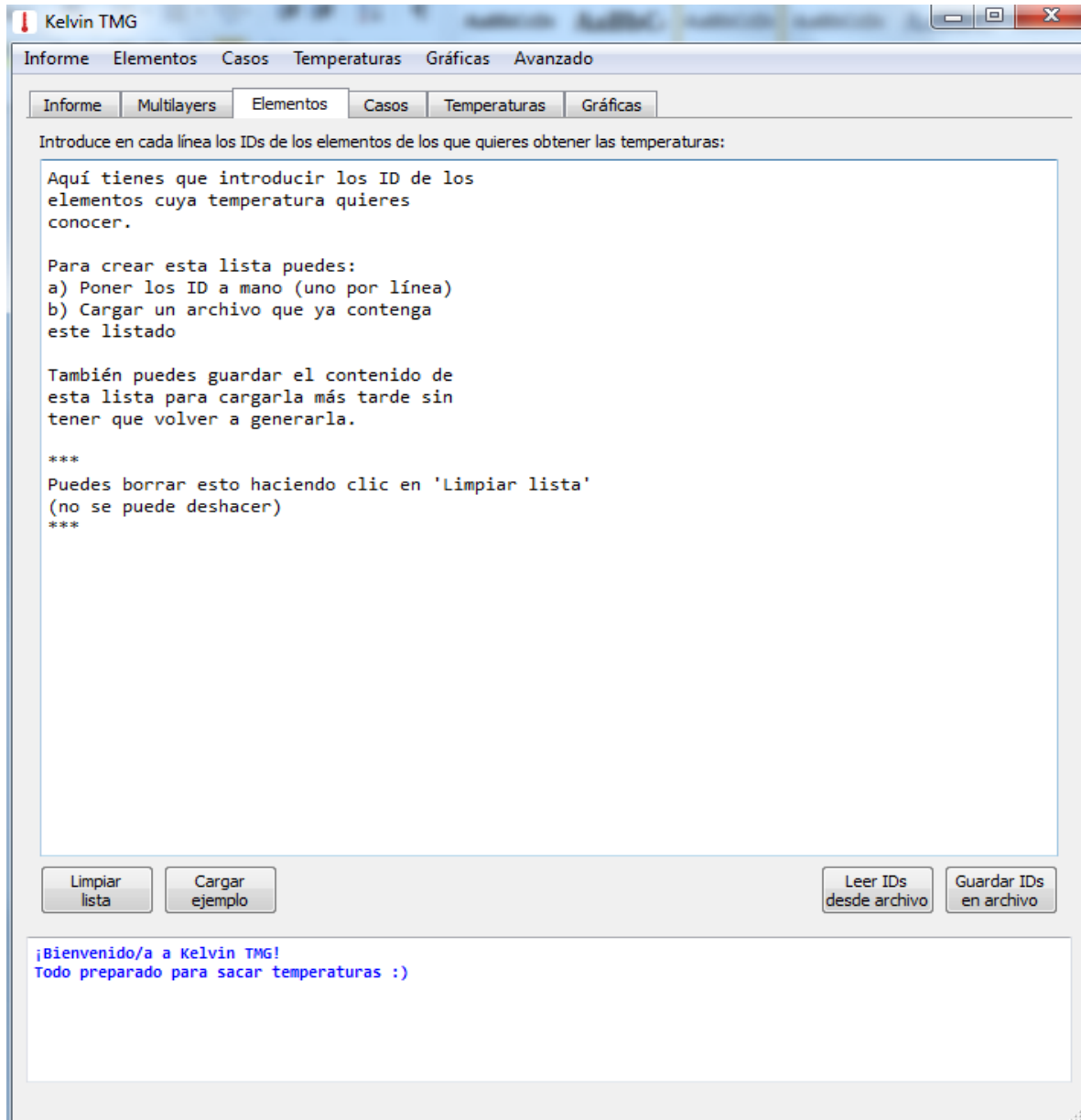


Ilustración 27: pestaña elementos Fuente: Elaboración propia.

La *ilustración 27* muestra la pestaña más importante de todas, la de los elementos, en ella introduces la lista de elementos de los cuales quieres sacar la temperatura, como bien explica, puede hacerse a mano, cargando un archivo de texto donde se tengan guardados,



o en el caso de que haya usado multicapas se puede copiar y pegar directamente los IDs obtenidos de la pestaña anterior.

En los casos estudiados más adelante se han elegido una serie de elementos para representar los termopares, y serán los que nos interesará comparar.

En esta pestaña también se puede incluir la referencia obtenida en el laboratorio para representarla en la gráfica como se enseñará en un ejemplo más adelante.

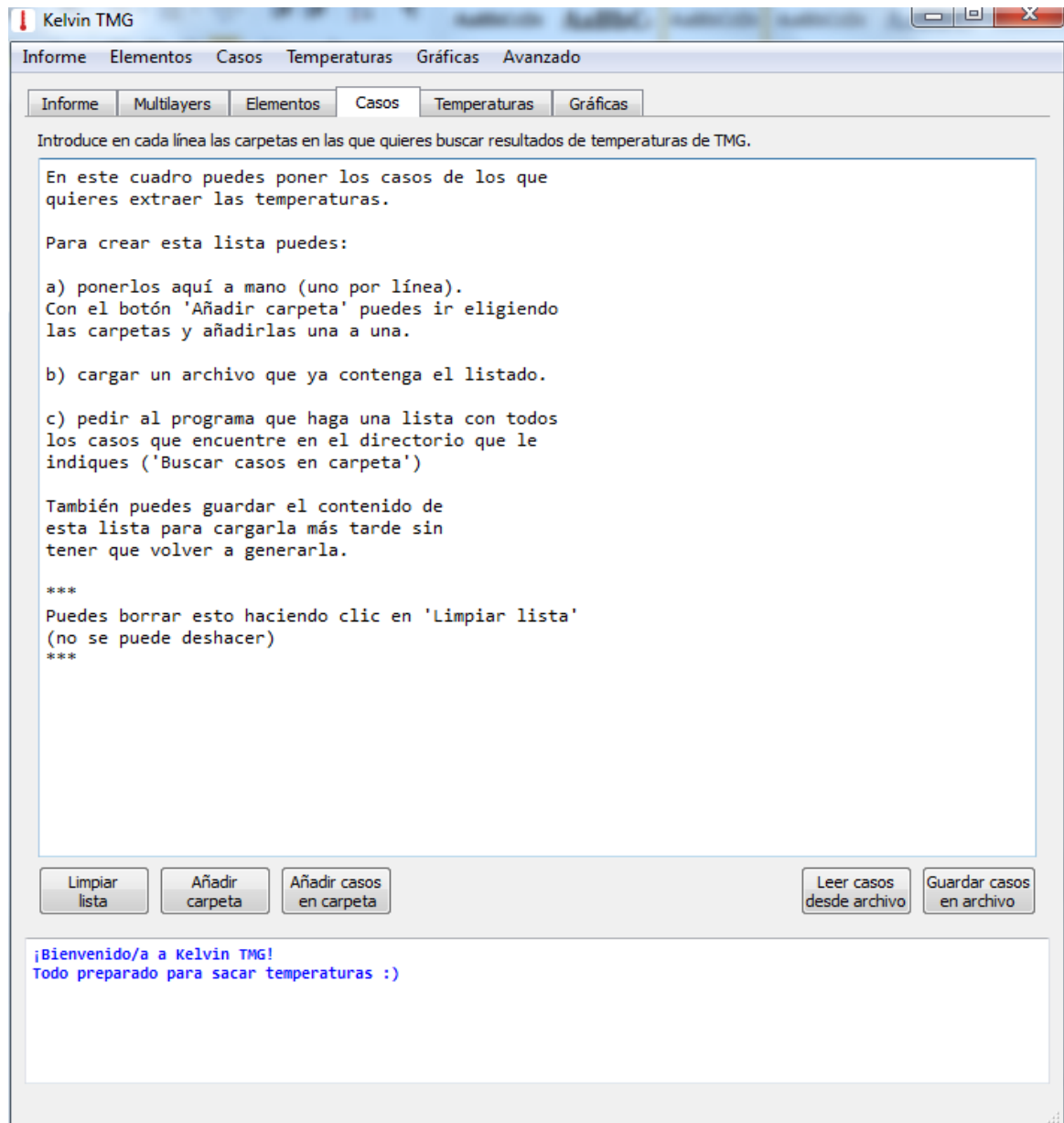


Ilustración 28: Pestaña casos. Fuente: Elaboración propia.



En la pestaña casos *ilustración 28*, se introducirán los casos entre los cuales quieres comparar las temperaturas, se podrán elegir pinchando en “leer casos desde archivo” introduciendo la ruta donde se hayan corrido/ejecutado los casos. O introduciendo un listado de un archivo de texto.

Como en pestañas anteriores puedes guardar la información para sacar diferentes gráficas más adelante.

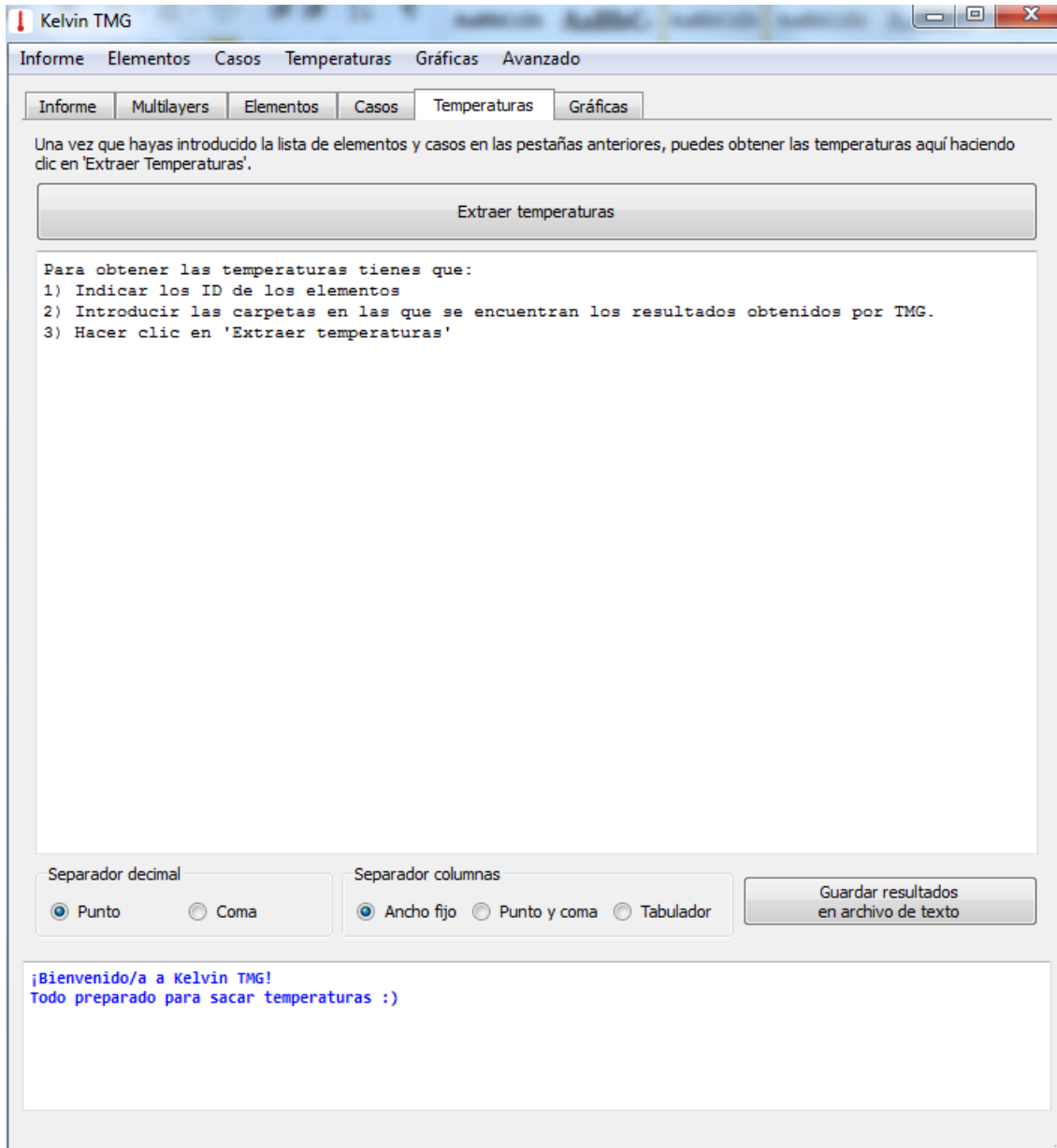


Ilustración 29: Pestaña temperaturas



La pestaña temperaturas *ilustración 29*, se extraerán las temperaturas de los IDs introducidos anteriormente de las carpetas seleccionadas en Casos, esta pestaña te permite modificar la forma de visualización cambiando la tabulación, y el separador decimal para facilitar la extracción. También permite guardar los resultados obtenidos para posteriores análisis. Es decir, permite copiarlo y pegarlo en Excel sin problemas de tabulación.

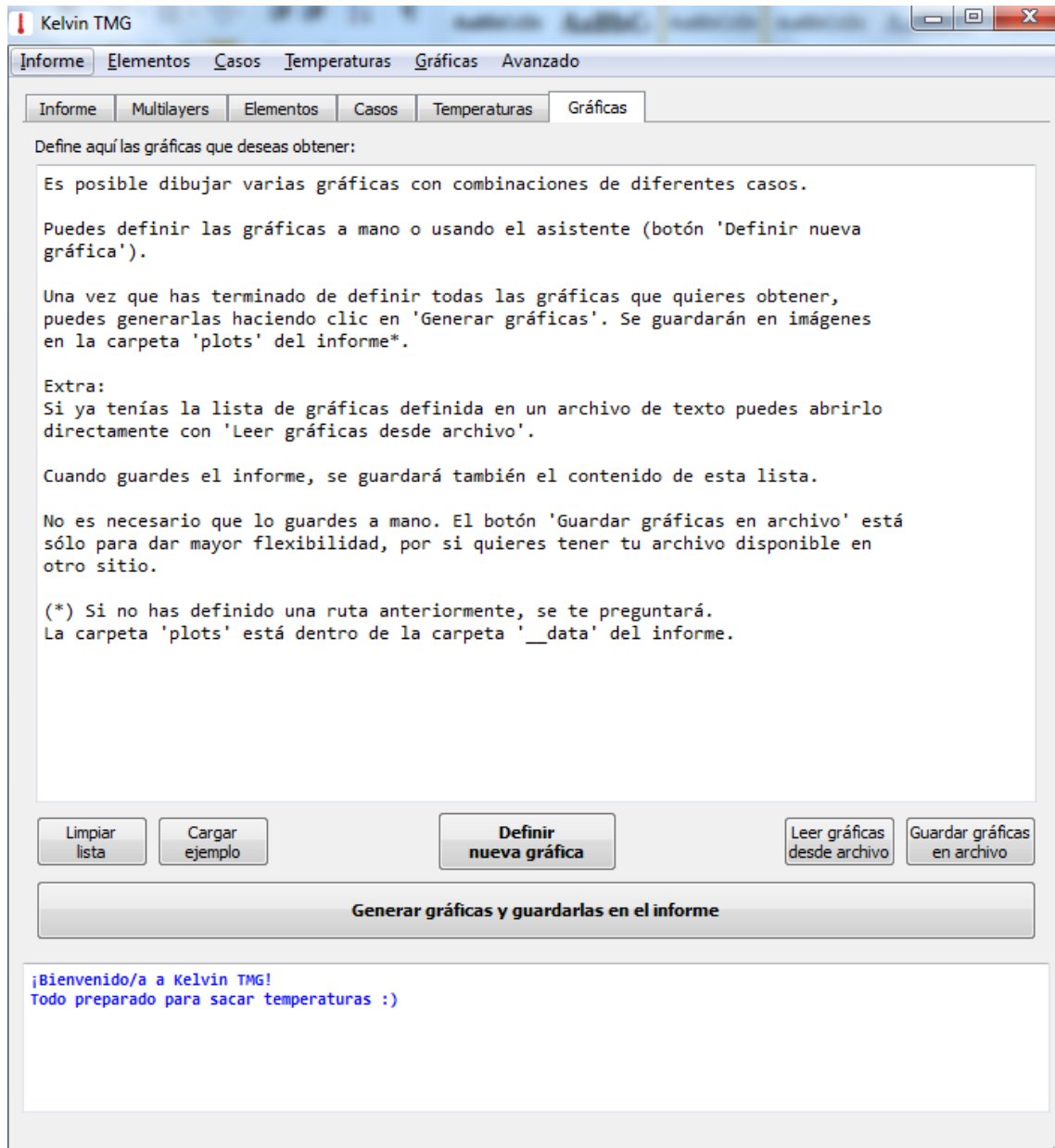


Ilustración 30: Pestaña Gráficas. Fuente: Elaboración propia.



Por último esta pestaña *ilustración 30*, te permite obtener las gráficas necesarias para comparar los resultados y facilitar la iteración.

En esta pestaña como en anteriores puedes abrir un archivo que estuviese previamente o crear a mano las diferentes combinaciones de graficas que se deseen.

También se pueden utilizar filtros para el nombre, es decir, en los casos realizados en el proyecto se han indicado características del modelo en el nombre del archivo, por ello es fácil filtrar de forma que se comparen unas características concretas, se verá más claro en el ejemplo realizado a continuación.

5.3 EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DEL P. KELVIN

Se realizara un ejemplo del funcionamiento del programa, de esta forma se pretende clarificar su uso.

En este ejemplo no se han considerado las multilayers, por ser específicas únicamente para las capas del PCB. El ejemplo estará basado en el CASO 1 de este Proyecto, que se explicara en profundidad en el siguiente capítulo.

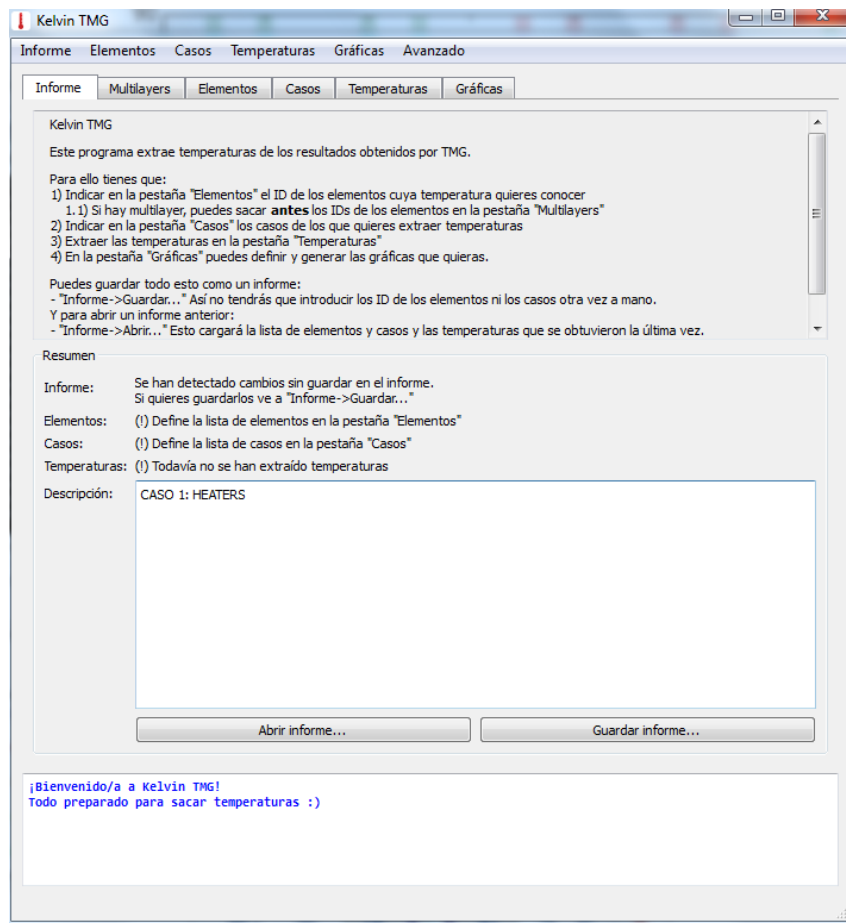


Ilustración 31: Pestaña principal

En esta imagen *ilustración 31* simplemente se ha introducido como descripción el nombre del informe.

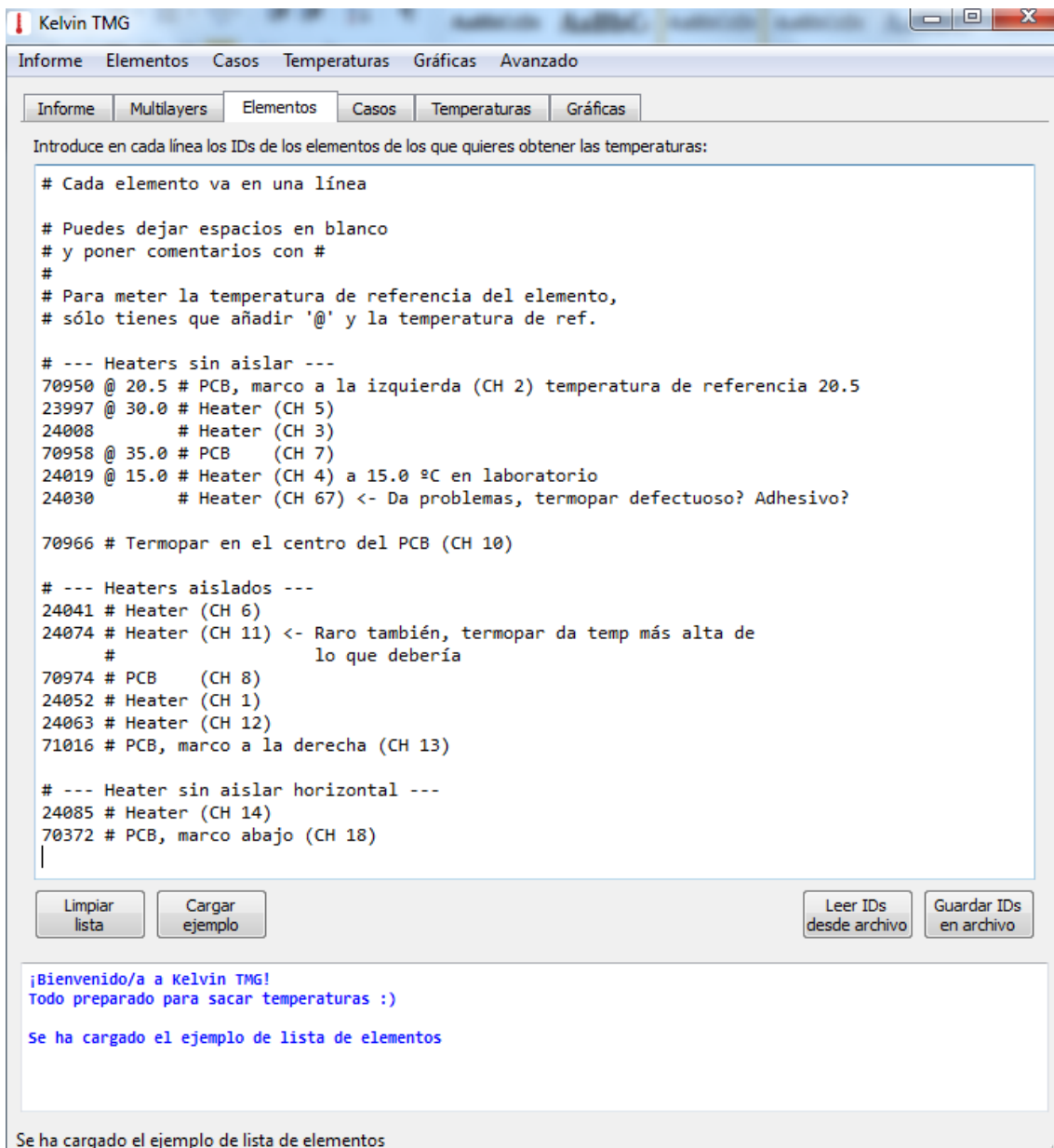


Ilustración 32: Pestaña elementos

Como se ha explicado anteriormente, en este ejemplo no se tienen multicapas por lo cual se ha dejado en blanco la pestaña de las mismas.

En la *ilustración 32* se han introducido los IDs de los elementos de los cuales se requieren las temperaturas, estos IDs se han obtenido del modelo en FEMAP.

Mediante “#” se pueden poner comentarios para facilitar el estudio de las gráficas y temperaturas extraídas sabiendo que es cada ID. Por otro lado “@” antes de un numero



indica la referencia obtenida en el laboratorio, o una referencia que se desea introducir para comparar los resultados.

Esta referencia podrá incluirse o no según se requiera, y posteriormente podrá indicarse si se presenta en la gráfica o no.

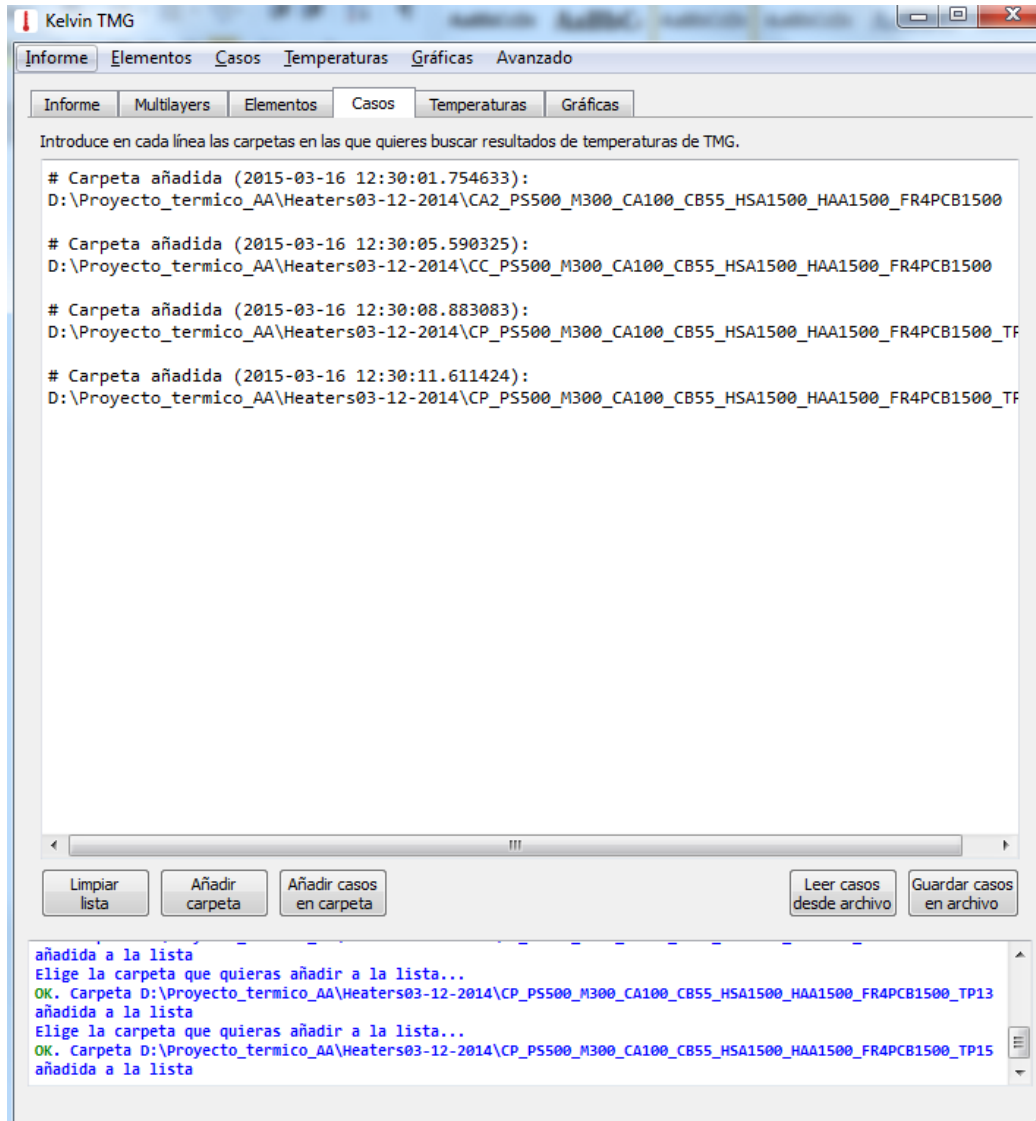


Ilustración 33: Introducir los casos

La *ilustración 33* muestra la pestaña casos, en ella se han introducido las direcciones a las carpetas donde están los casos de interés mediante el botón añadir carpeta y recorriendo el directorio de carpetas hasta llegar al caso requerido.

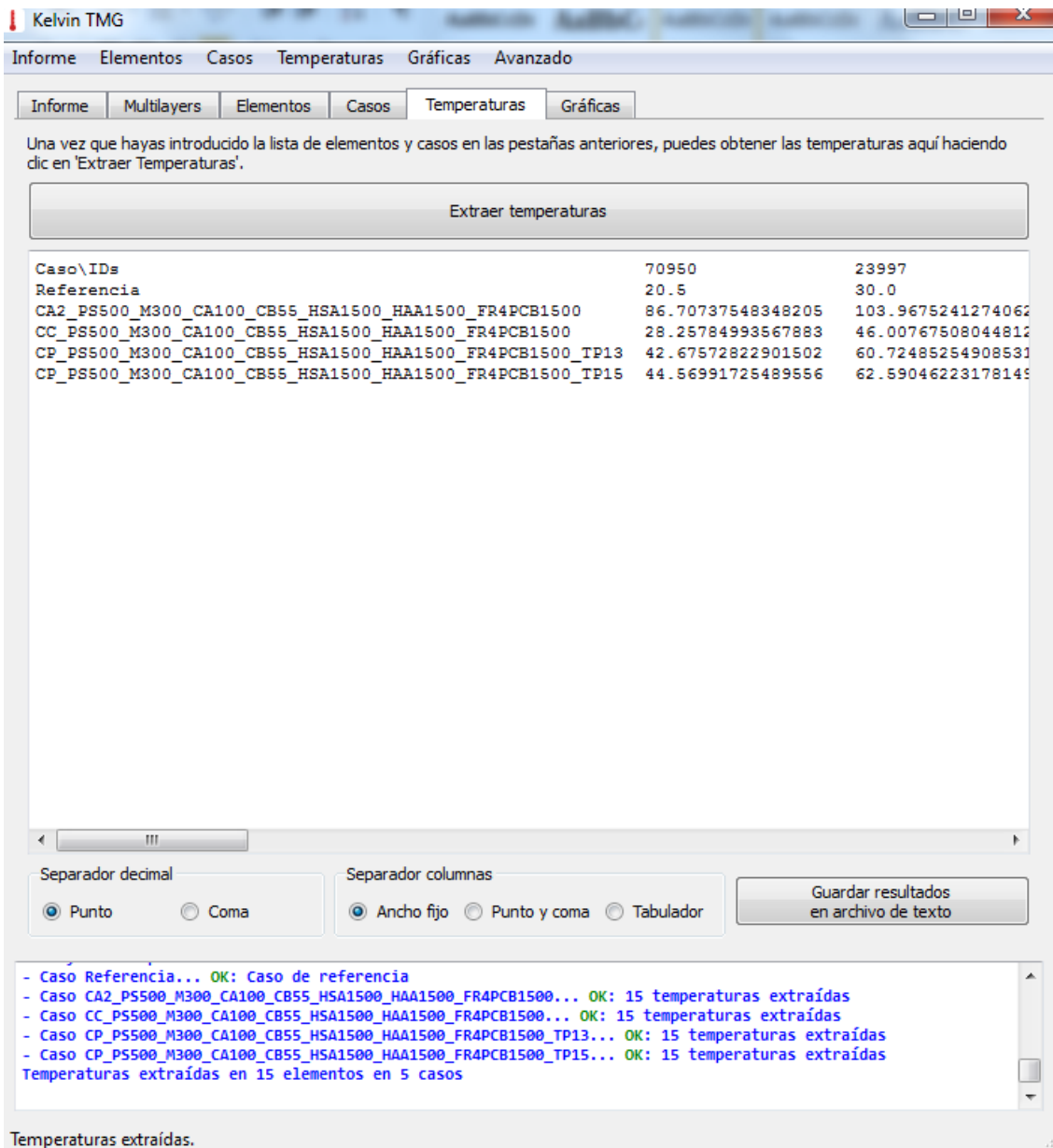


Ilustración 34: Pestaña temperaturas después de seleccionar extraer temperaturas. Fuente: Elaboración propia.

En la *ilustración 34* se muestran las temperaturas obtenidas después de haber seleccionado extraer temperaturas, se debe leer por columnas, la primera columna indica casos y la referencia tomada del laboratorio, las siguientes muestran los IDs, y las temperaturas obtenidas en cada uno de los casos. Desplazando la barra hacia la derecha se mostrarían todos los IDs requeridos en la pestaña elementos.

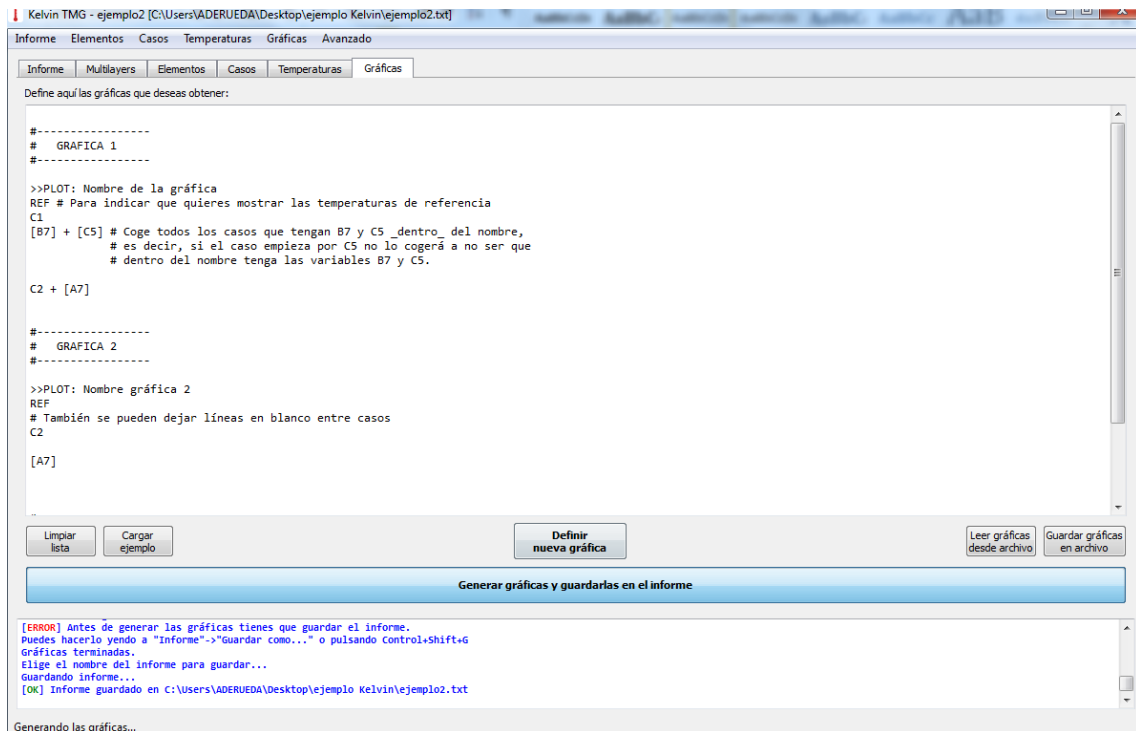


Ilustración 35: Extracción de gráficas. Fuente: Elaboración propia.

En esta imagen **ilustración 35**, se observa la forma de utilizar filtros para seleccionar gráficas, se pueden hacer las combinaciones que interesen y solicitar más de una gráfica al mismo tiempo.

Se debe tener en cuenta que se debe guardar el informe en una ubicación antes de darle al botón “Generar gráficas y guardarlas en el informe”, si no se guarda previamente saltará el error en rojo que se aprecia en el cuadro inferior que indica el punto en el que está ejecutando el programa, también saltará una ventana emergente.

Una vez guardado **ilustración 33**, se aprecia en el cuadrado inferior que todo está OK, se generaran las gráficas y estas se guardaran dentro de la ubicación del informe en una carpeta llamada Plots. **Ilustración 34**.

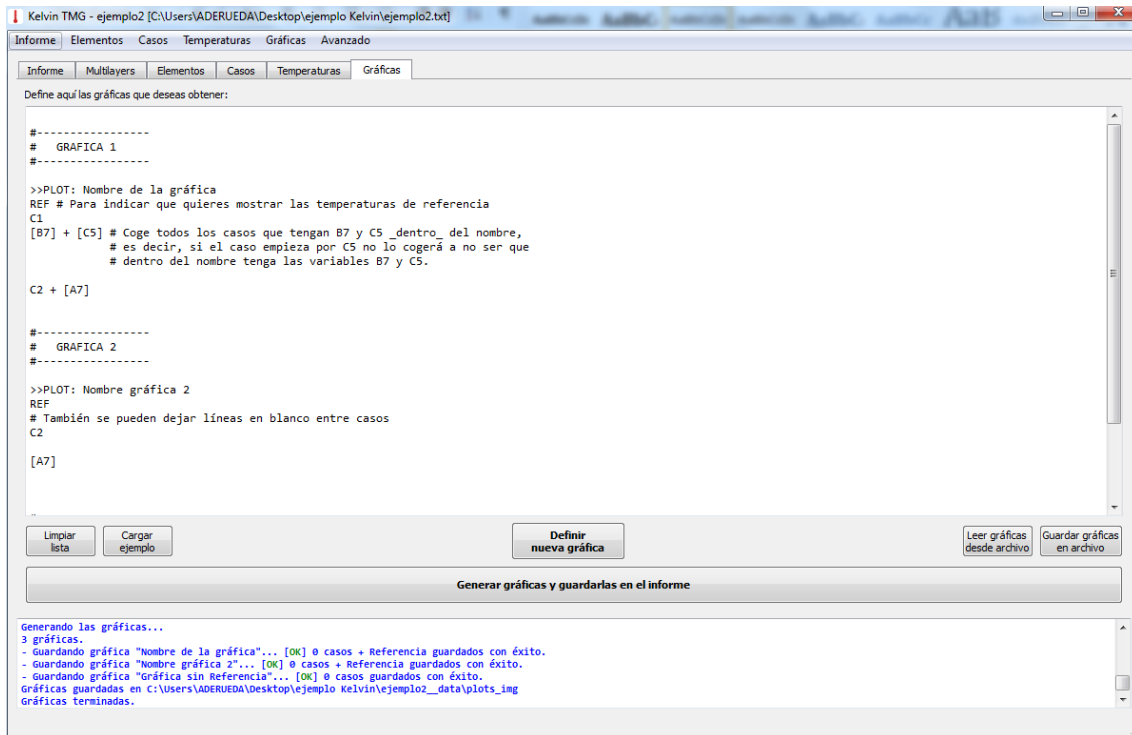


Ilustración 36: Imagen de la generación de gráficas, después de guardar el informe. Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
plots_img	16/03/2015 12:33	Carpeta de archivos	
description	16/03/2015 12:33	Archivo	1 KB
elements	16/03/2015 12:33	Archivo	1 KB
elements.k	16/03/2015 12:33	Archivo K	1 KB
informe.txt	16/03/2015 12:33	Documento de tex...	7 KB
plots	16/03/2015 12:33	Archivo	1 KB
studies	16/03/2015 12:33	Archivo	1 KB
studies.k	16/03/2015 12:33	Archivo K	2 KB
temperatures	16/03/2015 12:33	Archivo	3 KB

Ilustración 37: La carpeta Plots contiene la gráficas. Fuente: Elaboración propia.

El resultado de las gráficas queda como se aprecia en las siguientes ilustraciones, en ellas se puede apreciar que se ha elegido como eje de abscisas el número de termopares o el de Id según se desee, en el eje de ordenadas siempre se mostraran las temperaturas en los elementos de interés.

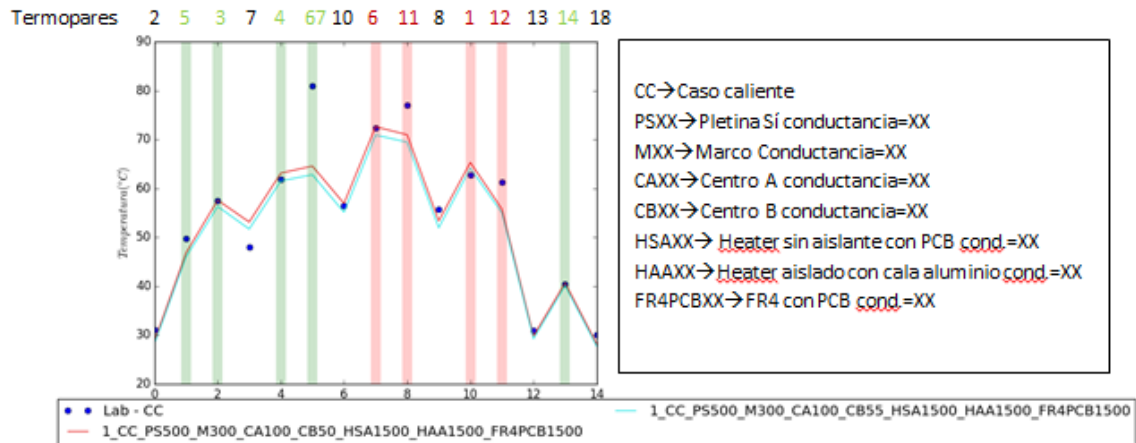


Ilustración 38: Ejemplo 1. Graficas radiadores. Fuente: Programa Kelvin.

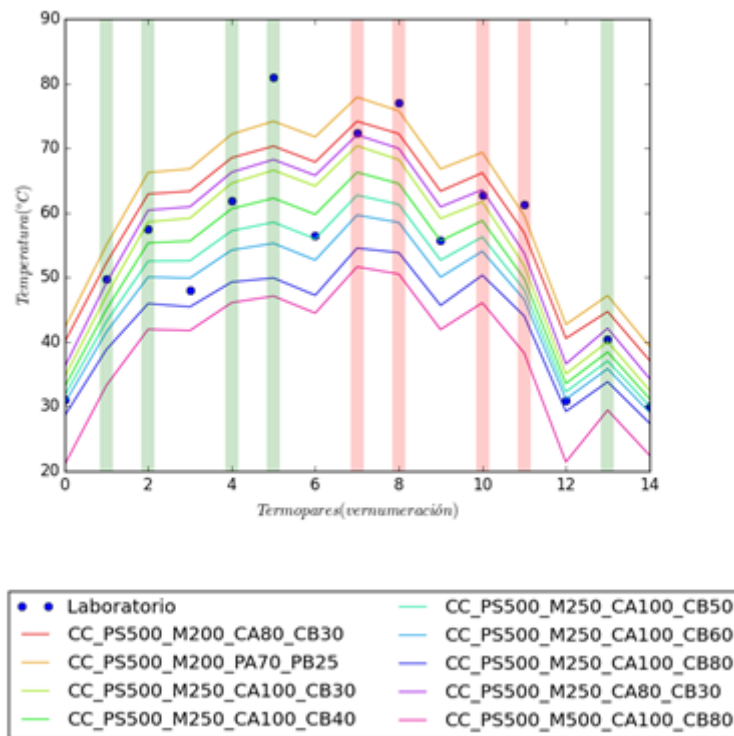


Ilustración 39: Ejemplo 2. Graficas radiadores. Fuente: Programa Kelvin.

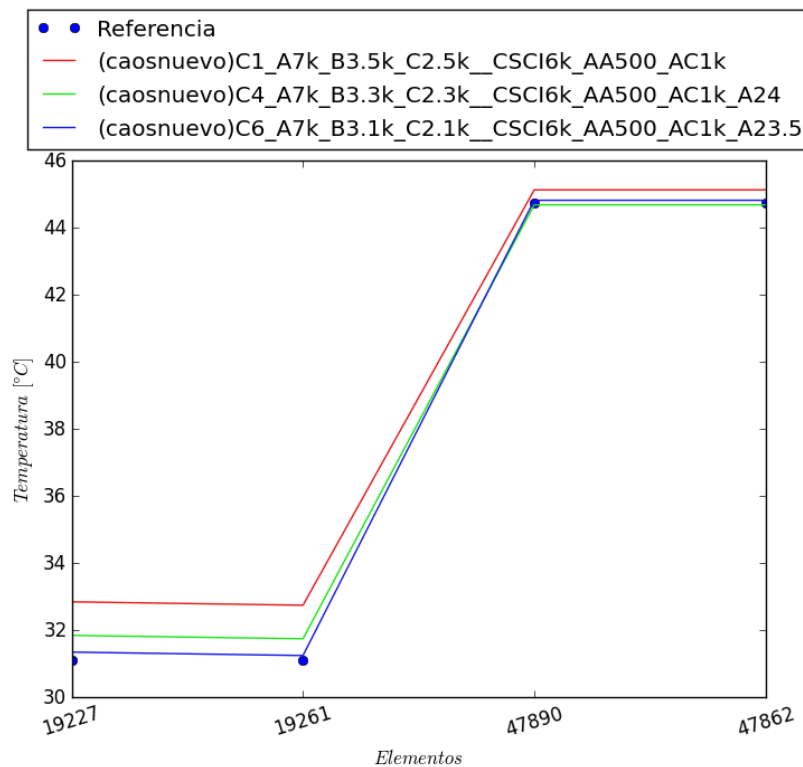


Ilustración 40: Ejemplo 3. Gráficas Abrazadera.

Con estas gráficas se obtiene una forma rápida y sencilla de visualización y comprobación de resultados, es mucho más sencillo iterar de esta manera viendo de forma clara como afecta a la temperatura cada modificación realizada en el modelo, y si ha sido posible acercarse a los valores de referencia requeridos.

Esta herramienta se podría implementar para diversos casos concretos dependiendo de las necesidades de cada uno, es decir, se pueden añadir más valores de referencia, hacer aproximaciones a curvas o mostrar una imagen y sobre ella los resultados.

A partir de este capítulo comienzan los estudios térmicos, serán tres casos a medida, en los cuales se buscaran diversas soluciones a diversos problemas.

En el primer caso se estudiará la validación de un adhesivo para ver si se acepta su uso en vuelo mejorando así las características de disipación de calor de los componentes, en el segundo caso se analizará la aceptación de una pieza para mejorar los anclajes y las disipaciones de calor de los componentes, y por último se hará un estudio de sensibilidad con montajes típicos de PCBs para la obtención de gráficas que valoren de forma rápida y sencilla la necesidad de realizar un modelo en profundidad para aceptar los criterios



requeridos por el proyecto o por el contrario se podrá realizar un modelo con simplificaciones ya que está muy alejado de los valores límites de aceptación del proyecto.

Con estos estudios se irán obteniendo las capacidades y conocimientos del software utilizado, iniciando los estudios con elementos placa en 2D y posteriormente con elementos sólidos en 3D más completos y que aportan mayor información.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI)

CAPÍTULO 5



Capítulo 6 CASO 1: CALIFICACIÓN DE ADHESIVO, MONTAJE RADIADORES.

En este primer caso de estudio, se procederá al análisis del comportamiento de un adhesivo, para la calificación del mismo en elementos de vuelo para un determinado proyecto.

Para ello, se debe analizar tanto el adhesivo como el proceso de unión seguido para su colocación, es decir, el montaje final que se detallará más adelante. Se procederá a validarlo en un rango determinado de temperaturas, no obstante, esta validación podrá extrapolarse a otros proyectos con rangos de temperaturas de operación similares.

El objetivo particular que justifica la realización de un modelo térmico, es el desconocimiento de la conductancia de contacto del adhesivo en cuestión, por la imposibilidad de medir la presión de contacto ejercida durante el montaje.

Para ello, se realizará una correlación entre los resultados experimentales obtenidos, y un modelo teórico realizado por el método de los elementos finitos en FEMAP&TMG.

6.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

Se debe tener en cuenta que durante el montaje se decidió cambiar ligeramente algunos parámetros iniciales, debido a que la temperatura estudiada en un primer momento como caso caliente era de 60 grados en la pared, la cual se elevaba a gran velocidad, saliéndose de los márgenes requeridos, y es por ello que se decidió hacer un caso considerado como Frío a -50°C la pared y otro a 0°C como caso caliente, en vez de a 60°C, dejando este como casos adicionales con temperatura pared 50°C.

En un primer momento se propuso el siguiente montaje para la validación del adhesivo:

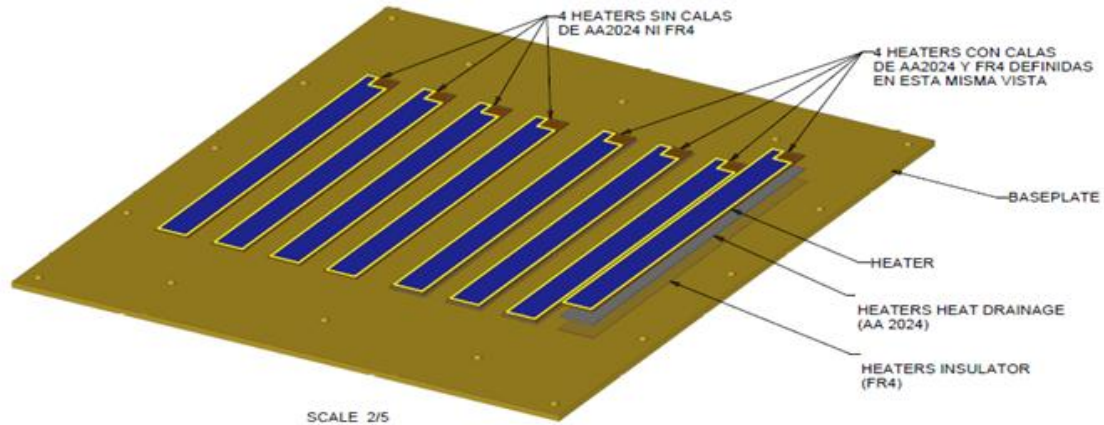


Ilustración 41: Esquema inicial de montaje. Fuente: Crisa.

Este montaje consta de:

- Un útil que no se muestra en la Ilustración 41 necesario para la unión con la cámara térmica de vacío, de forma rectangular y con diversos orificios para poder colocar tornillos en diferentes posiciones y anclar los diversos tipos de PCB según sea requerido. No es específico para este modelo, sino universal. De aluminio AA 6086 T6.

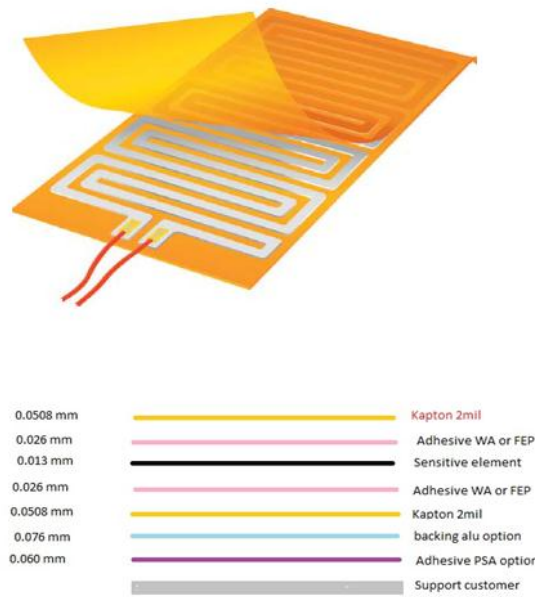


Ilustración 44: Elementos que componen el radiador. Fuente: Elaboración propia.

En un principio se consideraron ocho radiadores divididos en dos grupos de cuatro cada uno, con dos montajes distintos, como se puede apreciar en la Ilustración 41. No obstante, durante el montaje debido a la suposición de un posible fallo en uno de los canales por no estar pegado correctamente, se decidió añadir un nuevo radiador en la parte inferior quedando de la siguiente manera:

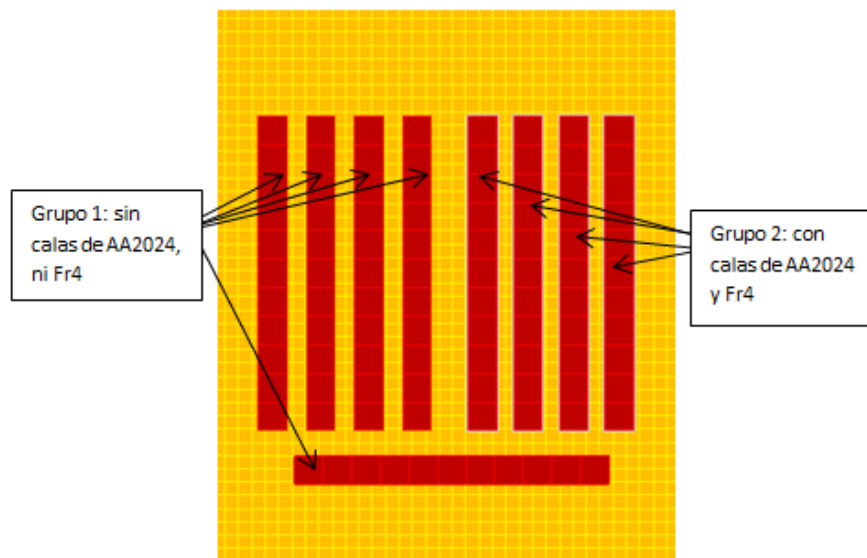


Ilustración 45: Vista superior del montaje final. Fuente: Elaboración propia.



De esta forma en el montaje final se consideraron nueve radiadores, cinco de ellos no aislados sin calas de aluminio, ni Fr4 y cuatro más aislados con calas y Fr4.

6.2 INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

Se requiere un conocimiento muy preciso de la transmisión de calor entre el radiador, y el resto de componentes que conforman el montaje para determinar el gradiente térmico entre ellos y poder determinar la vida útil de operación para la calificación y aceptación del montaje.

En este presente Caso, se presenta una forma de medir la conductancia térmica de los dos tipos de montaje que disponemos (con calas y Fr4, y sin nada), tomando como variables la presión de contacto, la atmosfera de trabajo, la conductancia térmica del material y la temperatura.

En base a lo que ha sido explicado anteriormente en el capítulo dos de este proyecto, sobre teoría de transmisión de calor y conductancia térmica, se explican a continuación los pasos a seguir para realizar el análisis de este adhesivo.

Se partirá primero de los resultados experimentales obtenidos y a continuación de los del modelo.

6.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS MEDICIONES OBTENIDAS EN EL LABORATORIO DEL MONTAJE.

Para la calificación de cualquier montaje de vuelo se debe tener siempre presente el plan de validación redactado para el mismo.



6.3.1 PLAN DE VALIDACIÓN PARA LA ACEPTACIÓN DEL ADHESIVO EN ELEMENTOS DE VUELO.

Este plan de validación, incluye todo lo necesario para llevar a cabo los análisis y pruebas necesarias en el laboratorio.

6.3.1.1 Materiales y procesos.

Anteriormente se ha visto el montaje elegido para el plan de validación, este consta de los siguientes materiales con las características mostradas a continuación:

COMPONENTE	MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA K [W/mK]	DENSIDAD DE MASA ρ [Kg/m ³]	CALOR ESPECÍFICO Cp[J/KgK]	ESPESOR Elementos placa E [m]
Pletina	AA 6082 T6	121	2700	880	0,012
Útil	AA 6082 T6	121	2700	880	0,008
Placa base	AA 6082 T6	121	2700	880	0,0044
Cala	AA 2024 T4	150	2750	890	0,0002
Fr4	FR4	0.2	2200	600	0,0002
Radiador	KAPTON	0.12	1420	1090	2,5E-5

Tabla 1: Materiales y características de caso 1. Fuente: Elaboración propia.

6.3.1.2 Ensayo en ambiente e inspecciones intermedias.

Secuencia de actividades para validar el uso, entre ellas se realizan diversas mediciones para comprobar que no hay rupturas ni desajustes.

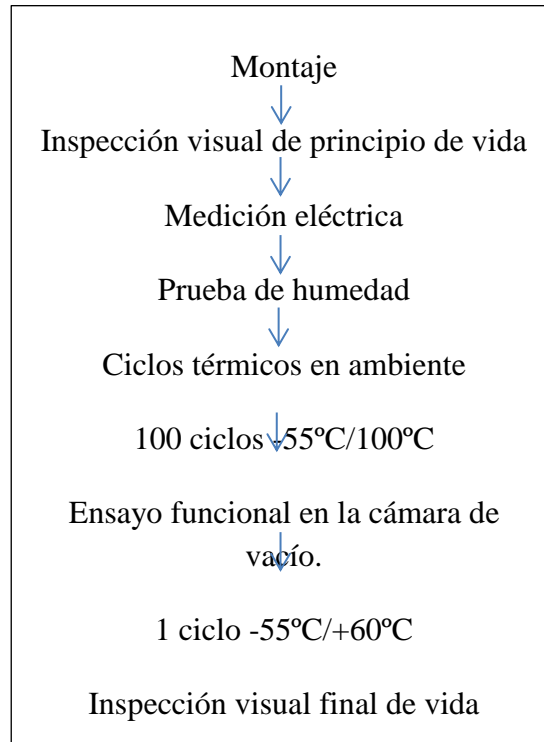


Ilustración 46: Secuencia de actividades. Fuente: Elaboración propia.

a) Montaje y colocación de los termopares.

Se procederá a colocar los radiadores como se muestra en la Ilustración 47, junto con los termopares representados con el número de su canal y su posición.

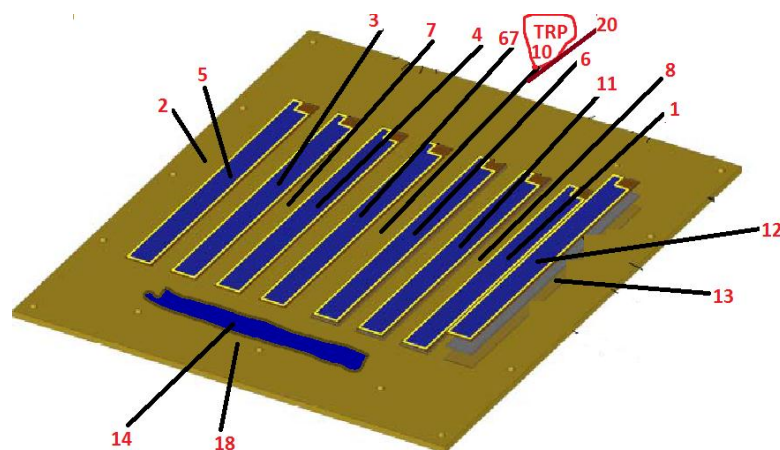


Ilustración 47: Colocación de los termopares en el montaje. Fuente: Crisa.

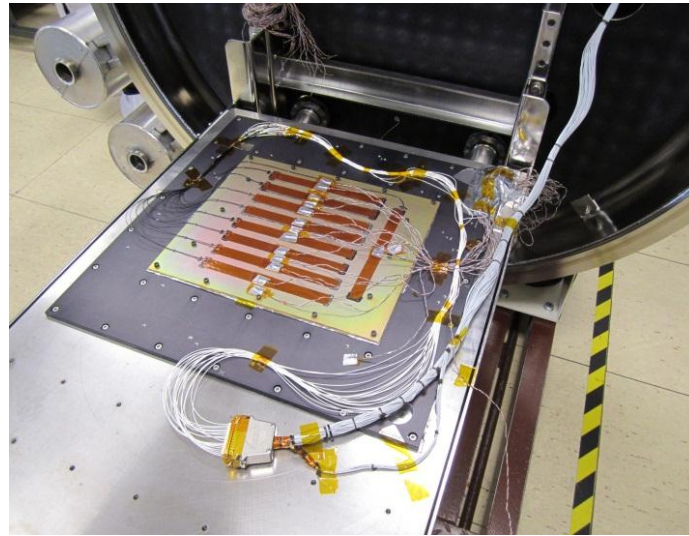


Ilustración 48: Montaje final antes de ser introducido en la cámara de vacío. Fuente: Elaboración Propia.

b) Inspección visual al inicio de vida.

En este paso se realizará una inspección visual en el principio de vida antes de introducir el espécimen en la cámara, debido a que, todas las piezas del ensayo deben ser examinadas para confirmar su continuidad en apariencia, ausencia de grietas, golpes, burbujas o decoloración, funcionalidad de los cables de unión, rotura de cables, o abombamiento de los radiadores, lo que puede producir un mal contacto y peor transferencia de calor.

c) Medidas eléctricas en el inicio de vida.

La medición eléctrica de la resistencia entre los radiadores y el terminal se hará en el principio de vida (BOL) para poder compararla con la medición al final de vida (EOL) viendo así la degradación de rendimiento.

d) Prueba de humedad

La configuración del montaje será sometido a una prueba de humedad simulando las condiciones reales durante 7 días.

Las condiciones del ensayo serán:

Temperatura: 50°C

Humedad: 95%RH

e) Ciclos térmicos en ambiente

Las muestras estarán expuestas a 100 ciclos térmicos de temperaturas comprendidas entre un rango de -55°C a 100°C usando una velocidad en rampa de $10^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ con un límite a esa temperatura extrema de 15 minutos.

Cada 10 ciclos, los radiadores se conectaran a la potencia nominal ($1,04\text{W}/\text{cm}^2$) a T_{amb} durante 15 minutos.

El rango de temperatura y el número de ciclos está acordado previamente siendo de cada ciclo de aproximadamente una hora.

La temperatura será monitorizada en el termopar centro de la placa base de aluminio para verificar que se sigue el perfil de temperaturas requerido.

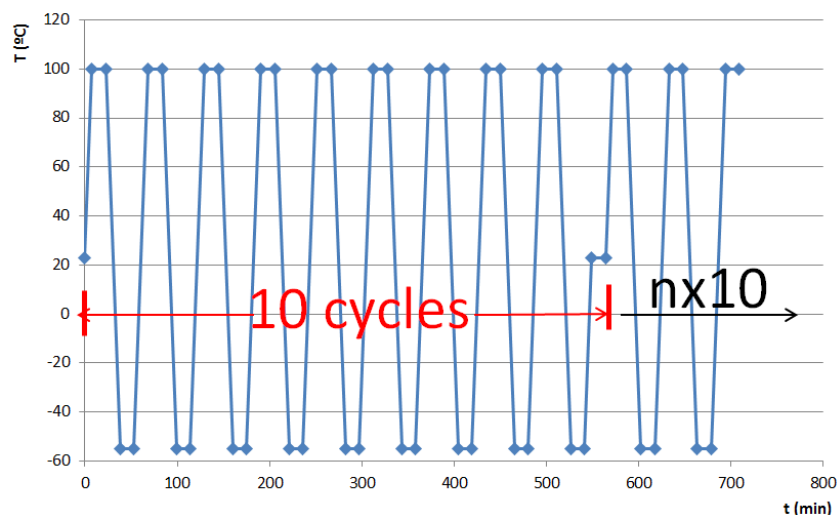


Ilustración 49: Gráfica de cómo deben ser los ciclos.

Además las temperaturas serán registradas en al menos 14 termopares, nueve sobre la mitad de la superficie de los radiadores, y cinco sobre la placa base de aluminio para comprobar el gradiente de temperatura entre los radiadores y la placa base.

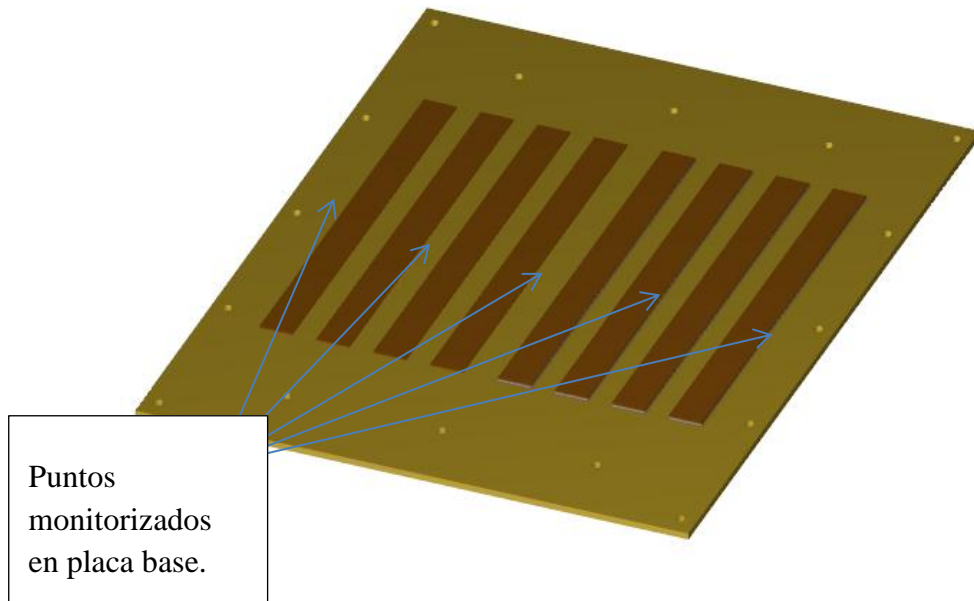


Ilustración 50: Puntos monitorizados en la placa base. Fuente: Elaboración propia.

f) Ensayo funcional en vacío

El ensayo será realizado teniendo en cuenta las potencias dadas por el plan de validación, serán las siguientes:

	V	I	Potencia	Densidad de potencia S(efectiva)=42,57cm ²
Nom	47,5V	8,77A	44,25W	1,04W/cm ²
Nomx1,5	58,0V	10,77A	66,37W	1,56 W/cm ²
Nomx2	67,1V	12,45A	88,5W	2,08W/cm ²

Tabla 2: Potencias. Fuente: Elaboración propia.

Se consideraran dos casos según la temperatura de estabilización, caso frío y caso caliente. La presión será ($P < 10^{-5}$ mbar).



- a. Caso frío (-50°C),
- 5 veces:
 - i. Encender a 1.04 W/cm^2 , 10 minutos.
 - ii. Apagar, 10 minutos.
 - 5 veces:
 - i. Encender a $1.04 \times 1.5 = 1.56 \text{ W/cm}^2$, 10 minutos.
 - ii. apagar, 10 minutos.
 - 5 veces:
 - i. Encender a $1.04 \times 2 = 2.08 \text{ W/cm}^2$, 10 minutos.
 - ii. Apagar, 10 minutos.
- b. Caso caliente (60°C), (Se decidió cambiar la temperatura de la estabilización del caso caliente a 0°C durante su realización).
- 5 veces:
 - i. Encender a 1.04 W/cm^2 , 10 minutos.
 - ii. Apagar, 10 minutos.
 - 5 veces:
 - i. Encender a $1.04 \times 1.5 = 1.56 \text{ W/cm}^2$, 10 minutos.
 - ii. apagar, 10 minutos.
 - 5 veces:
 - i. Encender a $1.04 \times 2 = 2.08 \text{ W/cm}^2$, 10 minutos.
 - ii. Apagar, 10 minutos.

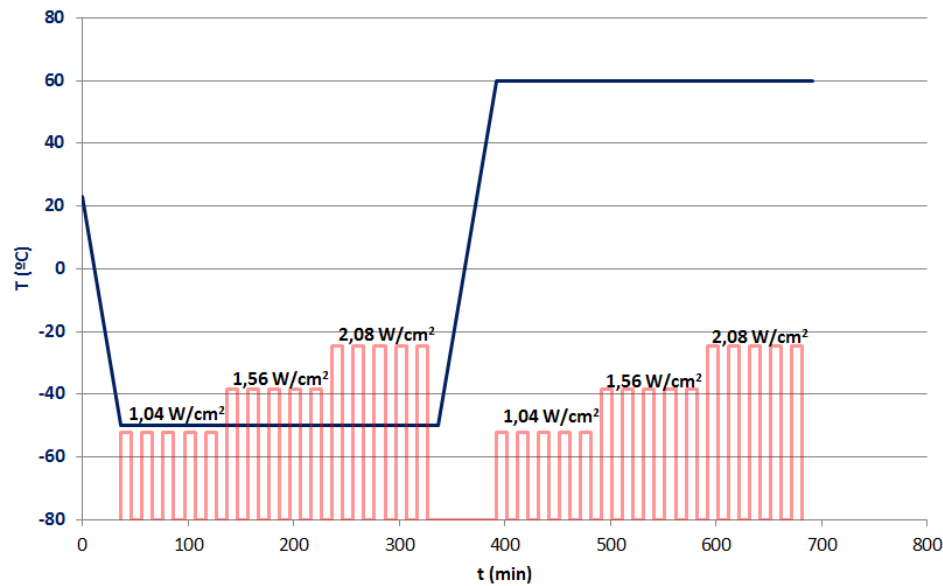


Ilustración 51: Esquema de temperatura de estabilización y potencia de los radiadores antes del cambio.

Se decidió bajar la temperatura del caso caliente debido a la rápida subida de la temperatura de los termopares y el riesgo de quemarlos.

g) Inspección visual al final de vida.

Al final de los ciclos las piezas deben ser inspeccionadas visualmente, para comprobar que esta todo como requería el montaje y no ha habido desperfectos durante los ciclos poniendo en duda los resultados obtenidos.

Una vez obtenidos los datos de la cámara de vacío, conociendo la temperatura ambiente y las diferentes conductancias de las uniones podemos mediante un modelo despejar la conductancia del adhesivo en este caso Sigra flex correlando el modelo creado en FEMAP con los datos del laboratorio. Para esta correlación se ha utilizado el programa Kelvin explicado en el capítulo anterior.

6.3.1.3 Resultados obtenidos.

Además de los casos caliente y frío requeridos por el plan de validación se realizaron dos casos más, el caso Adicional 1 para comprobar cuanto afectaba la radiación, poniendo la pletina (superficie de la cámara donde va apoyado el útil) a 0°C , y la pared de la cámara a 50°C . Y el caso adicional 2 comprobando cuánto tarda en alcanzar la temperatura de 100°C , partiendo de la pletina a 60°C y la pared a 50°C .



CASO FRÍO		03/11/2014	Encendido	Hora inicio	Hora fin
T pared=-50°C	Potencia=1,04W/cm ² T placa base= -47°C	1		15:09	15:19
		2		15:29	15:39
		3		15:49	15:59
		4		16:10	16:20
		5		16:30	16:40
	Potencia=1,56W/cm ² T placa base= -75°C	1		18:04	18:14
		2		18:24	18:34
		3		18:44	18:54
		4		19:04	19:14
		5		19:24	19:34
	Potencia=1,56W/cm ² T placa base= -80°C	1		19:45	19:55
		2		20:05	20:15
		3		20:25	20:35
		4		20:45	20:55



		5	21:05	21:15
--	--	---	-------	-------

Tabla 3: Datos caso frío. Fuente: Elaboración propia.

CASO CALIENTE	04/11/2014	Encendido	Hora inicio	Hora fin
T pared=0°C	Potencia=1,04W/cm ² T placa base= 0°C	1	8:23	9:41
		2	9:53	10:03
		3	10:13	10:23
		4	10:33	10:43
		5	10:53	11:03
	Potencia=1,56W/cm ² T placa base= -20°C	1	11:44	11:54
		2	12:04	12:14
		3	12:24	12:34
		4	12:44	12:54
		5	13:04	13:14
	Potencia=1,56W/cm ² T placa base=-60°C	1	13:35	13:40
		2	13:52	13:58



		3	14:09	14:16
		4	14:25	14:32
		5	14:41	14:48

Tabla 4: Datos caso caliente. Fuente: Elaboración propia.

CASO ADICIONAL 1	04/11/2014	Encendido	Hora inicio	Hora fin
T pared= 50°C		1	16:50	18:05
T pletina= 0°C				

Tabla 5: Datos caso adicional 1. Fuente: Elaboración propia.

CASO ADICIONAL 2	04/11/2014	Encendido	Hora inicio	Hora fin
T pared= 50°C	Desde 60°C a 100°C en canal 67 2'38"			
T pletina= 60°C				

Tabla 6: Datos caso adicional 2. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta una muestra de los ciclos realizados en una gráfica, marcando como puntos de interés los que serán utilizados posteriormente para correlar el modelo.

F68016 MTG PCDU Heaters (eSIG n° 1508)

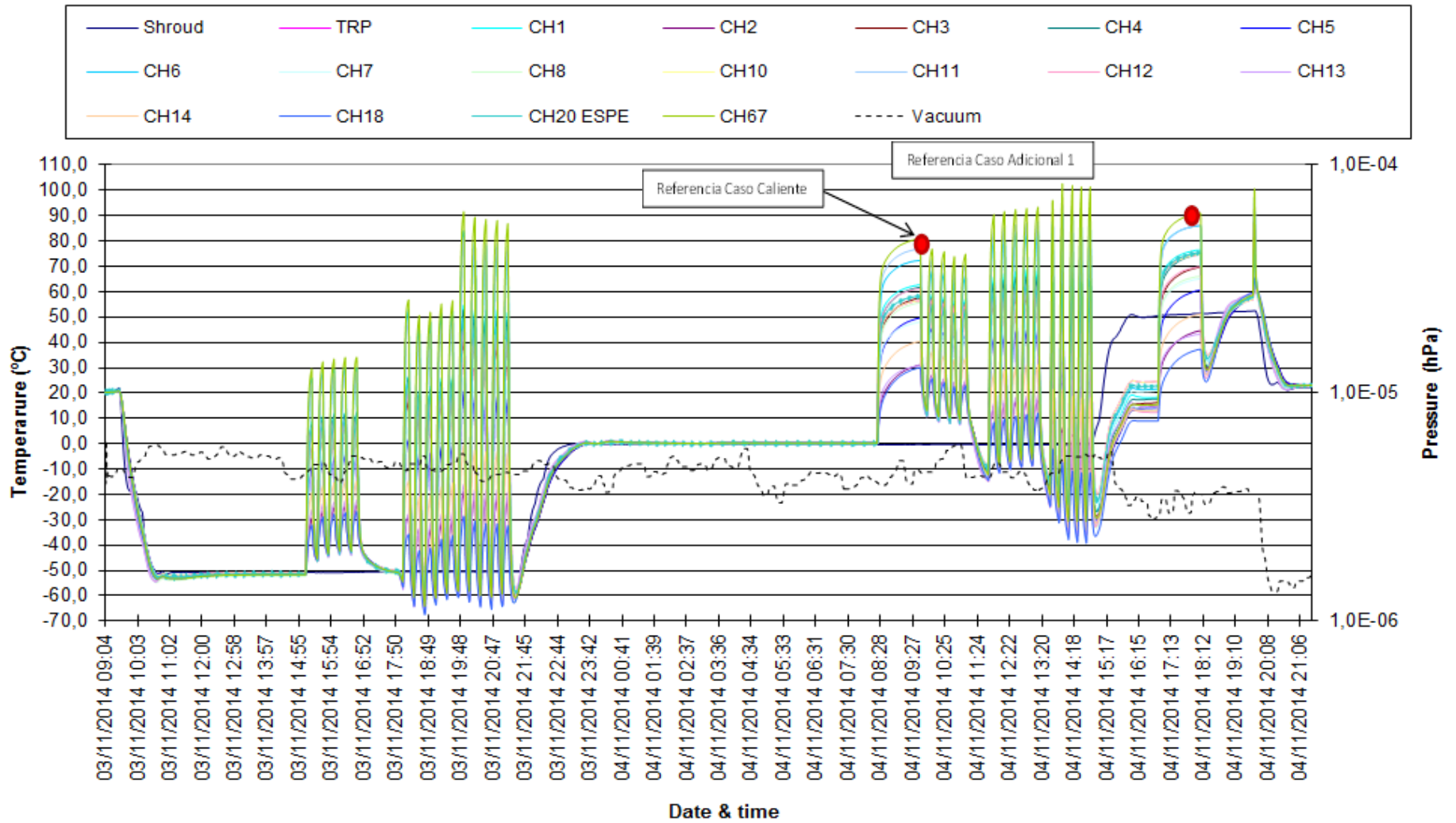


Ilustración 52 Muestra de resultados obtenidos durante los diferentes casos. Fuente: Elaboración propia.



6.3.2 MEDIDAS DE REFERENCIA PARA CORRELAR CON EL MODELO MEF.

Las temperaturas obtenidas en los puntos seleccionados en la ilustración 12, son las temperaturas de estabilización de los casos caliente y adicional 1, con ellas se comenzará la correlación del modelo MEF.

Se toman las medidas de:

Caso caliente	4-11-14 9:41	04/11/14	9:41:13
Caso adicional 1	4-11-14 18:06	04/11/14	18:06:01

Tabla 7: Momento de medición de alcance de estado estacionario. Fuente: Elaboración propia.

Caso caliente																		
Channel	Shroud	TRP	Vacuum	2	5	3	7	4	67	10	6	1	8	1	12	13	14	18
Temp. LAB	0,29 15	56 ,4	4,5E -06	31 ,1	49 ,7	57 ,5	4 8	61 ,8	80 ,9	56 ,4	72 ,4	7 7	55 ,7	62 ,8	61 ,2	30 ,9	40 ,4	30 ,1

Tabla 8: Temperaturas medidas en estado estacionario en el caso caliente. Fuente: Elaboración propia.

Caso adicional 1																		
Channel	Shroud	TRP	Vacuum	2	5	3	7	4	67	10	6	11	8	1	12	13	14	18
Temp.LA	51	74,	3,60E-	44,	60,	69,	65,	74,	91	74,	86,	86,	66,	76,	69,	43,	51,	37,



B		6	06	6	7	7	1	9		6	1	3	1	5	8	3	1	3
---	--	---	----	---	---	---	---	---	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Ilustración 53: Temperaturas medidas en estado estacionario en el caso adicional1. Fuente: elaboración propia.

En un principio se tomarán estos dos casos para correlarlo con el modelo MEF por alcanzar en algún punto estado estacionario.

6.4 RESULTADOS TEÓRICOS

Se realizara un modelo MEF con el Programa FEMAP, y su postprocesador TMG, para el análisis de este caso.

Las características del programa y su uso han sido explicadas anteriormente en el capítulo de software.

Para este caso se han aceptado las siguientes hipótesis:

- Se acepta una aproximación por un modelo 2D con elementos placa.
- No es necesario el gradiente de temperatura en el interior de cada elemento sino, los saltos entre las juntas de unión, donde se aprecian los mayores saltos de temperatura.
- Se considerará que los termopares tienen el tamaño igual a un elemento concreto en la posición requerida, y no se interpolara entre varios elementos.
- Se considera una radicación al ambiente dentro de la cámara de coeficiente de emisividad 0,8 constante debido a que los componentes son recubiertos con una capa de barniz y se considera un acabado superficial aproximadamente constante.
- Se consideran materiales ortotrópicos, sus propiedades no dependen de la dirección elegida.

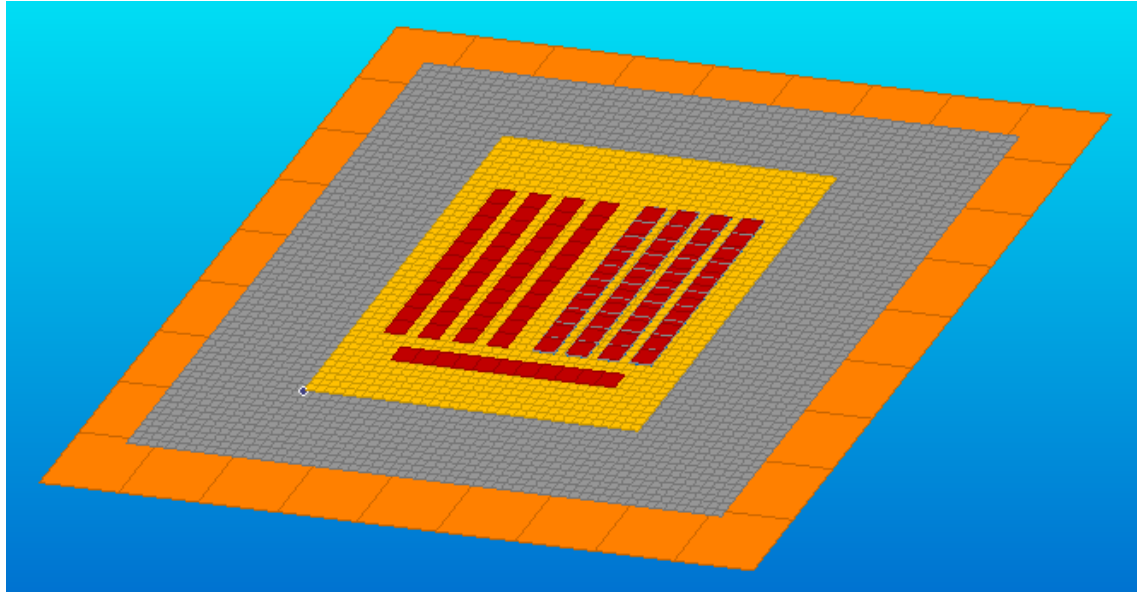


Ilustración 54: Modelo MEF con elementos placa. Fuente: Elaboración propia.

Una vez introducidas todas las características del modelo (materiales, conductancias conocidas, temperatura ambiente, parámetros de radiación), se utilizará Excel y el programa KELVIN para alcanzar los resultados obtenidos en el laboratorio con el modelo en MEF.

Se consideraran los siguientes elementos como los termopares posicionados en el laboratorio:

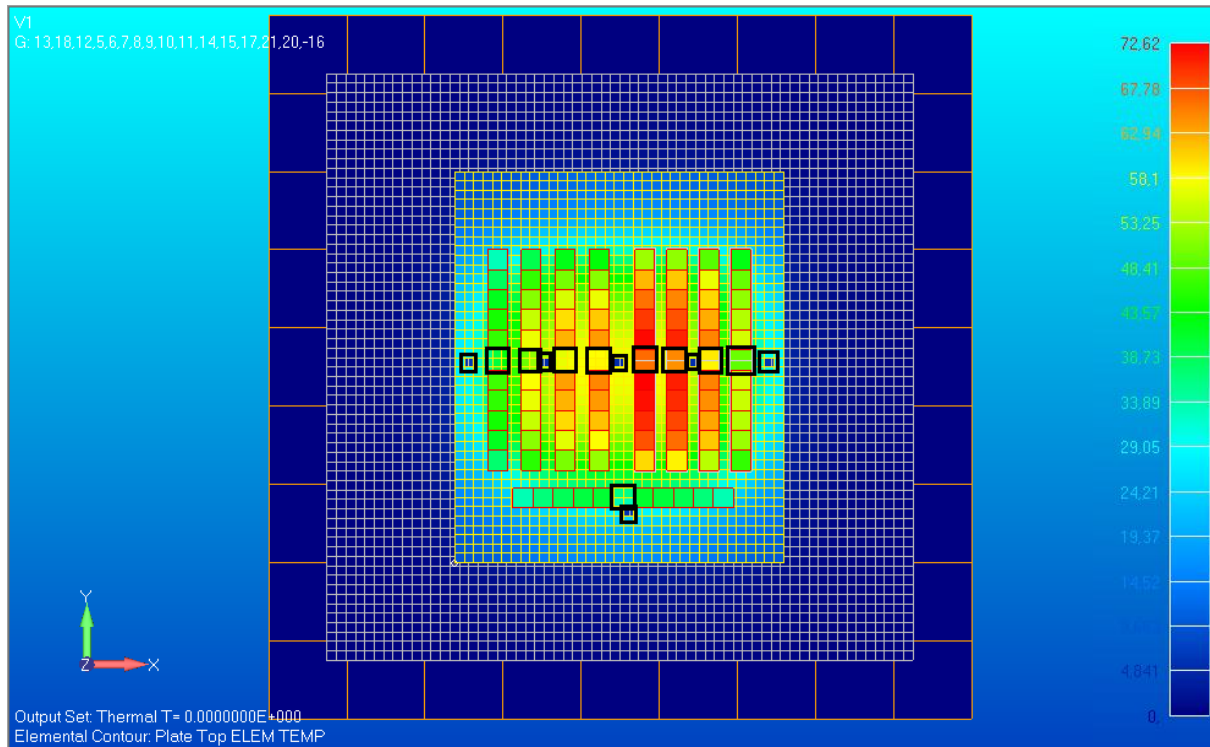


Ilustración 55: Posición termopares, Caso Caliente. Fuente: Elaboración propia.

Se hará una división en la placa base para simular las diferentes conductancias de la misma con el útil debido a que estará sujeta solo por el perímetro. De esta forma se simulara un contacto menor en el centro de la misma, y mayor en el borde donde estarían los tornillos. La división se muestra en la Ilustración 56.

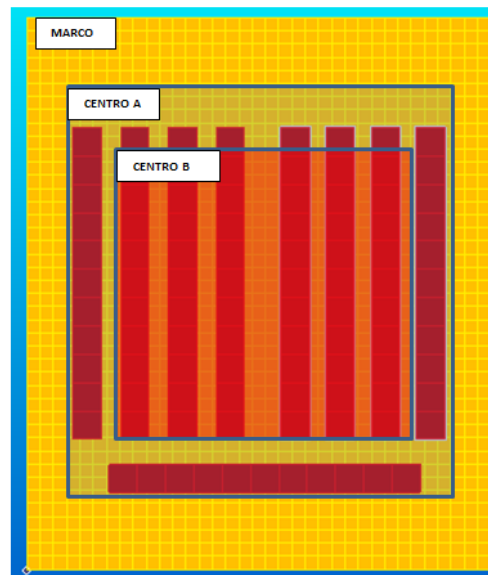


Ilustración 56: Separación por zonas con distintas conductancias. Fuente: Elaboración propia.

Se comenzó ajustando a la temperatura de referencia de estado estacionario del caso caliente, para ello se realizaron aproximadamente 30 casos.

Para la facilitación de resultados se utilizaron las siguientes abreviaturas y colores.

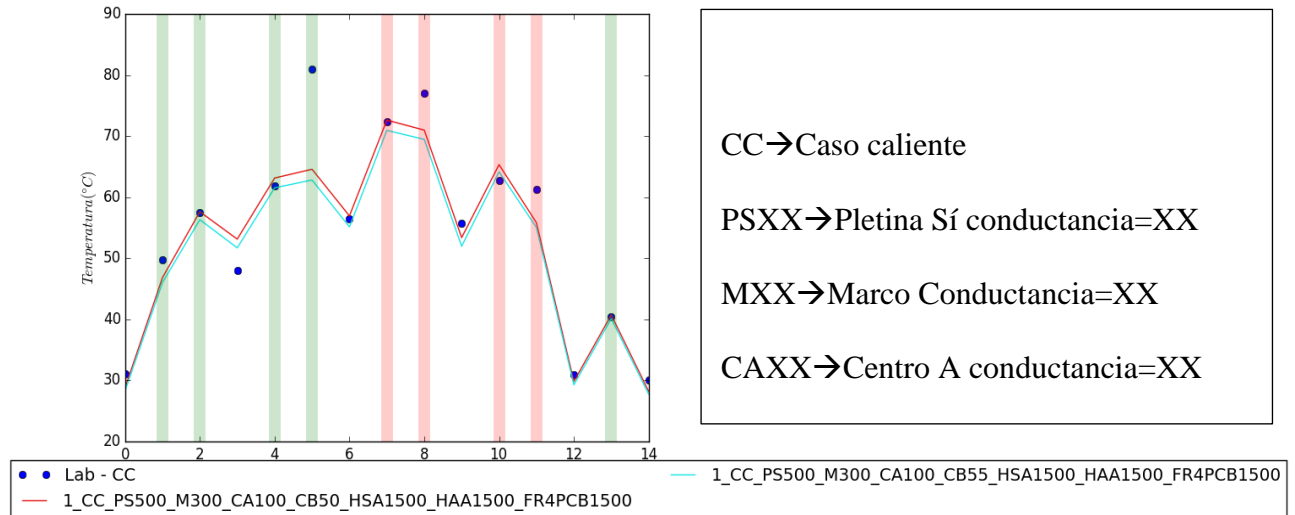


Ilustración 57: Ejemplo de gráfica de resultados obtenidos. Fuente: Programa KELVIN.

Las bandas verdes indican los cinco radiadores no aislados, el último correspondería con el radiador horizontal, las bandas rojas corresponden a los radiadores aislados, los puntos azules son las temperaturas de referencia del caso caliente tomadas en el laboratorio, la leyenda de los casos está indicada en la ilustración 57.

Junto con la siguiente tabla realizada en Excel y el programa KELVIN se obtuvieron los siguientes datos.

Iteraciones realizadas:

- Ajustar termopares en PCB.

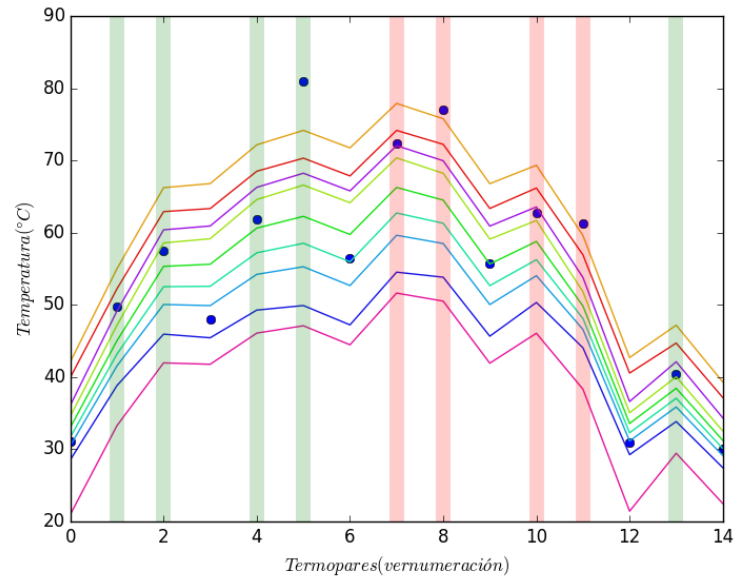


Ilustración 58: Ajuste Marco, CA, CB en termopares en PCB. Fuente: Programa KELVIN.

La **ilustración 58** muestra los primeros casos propuestos, con esta gráfica se pretendía hacer una aproximación vaga a las mediciones del laboratorio, comprobando cuanto afectaban los cambios de conductancias en las tres zonas de la placa base. Los resultados obtenidos en esta gráfica no se acercan con la suficiente precisión, por lo que una vez se observaron las grandes variaciones que se producirán se procedió a hacer cambios más específicos como ajustar por separado los radiadores aislados y los no aislados.

- Ajustar Adhesivo Radiadores sin aislar.

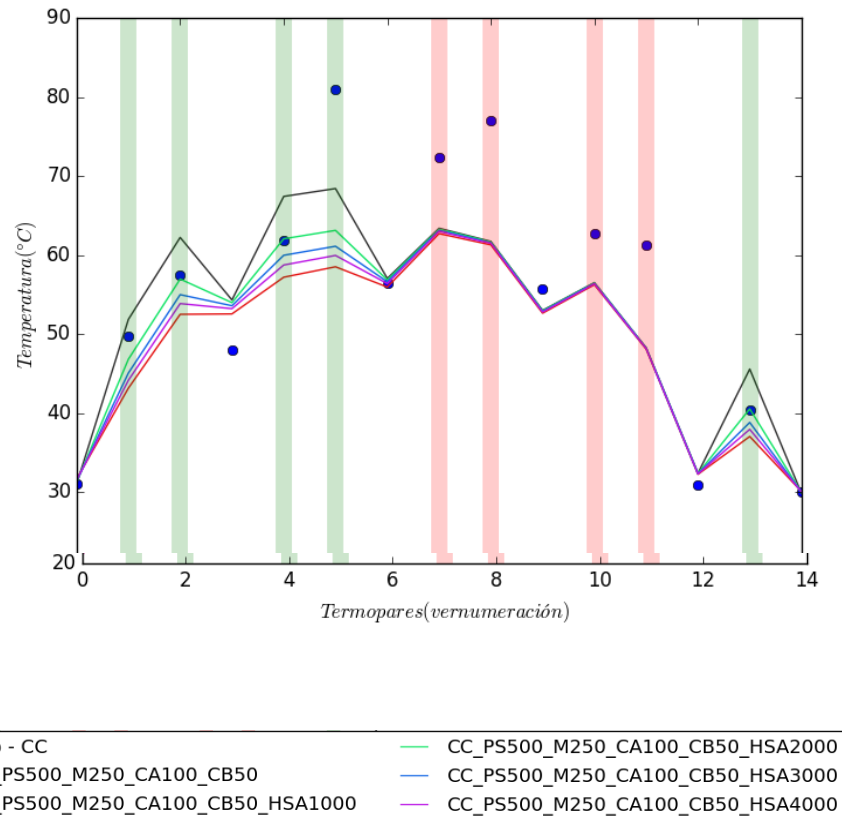


Ilustración 59: Ajuste conductancia entre radiadores sin aislar y PCB. Fuente: Programa KEVIN.

Posteriormente se intentó comenzar a ajustar en primer lugar los valores de los radiadores sin aislamiento, con esa idea y los resultados de la **ilustración 58**, se llegó a la **Ilustración 59**.

Con ello se eligió cambiar los valores de las conductancias de la placa base a M300, CA100, CB50. Y la conductancia del adhesivo 1500, en todas sus uniones, ajustando así también los radiadores aislados.

A su vez se corrieron los casos adicionales, el CA1:

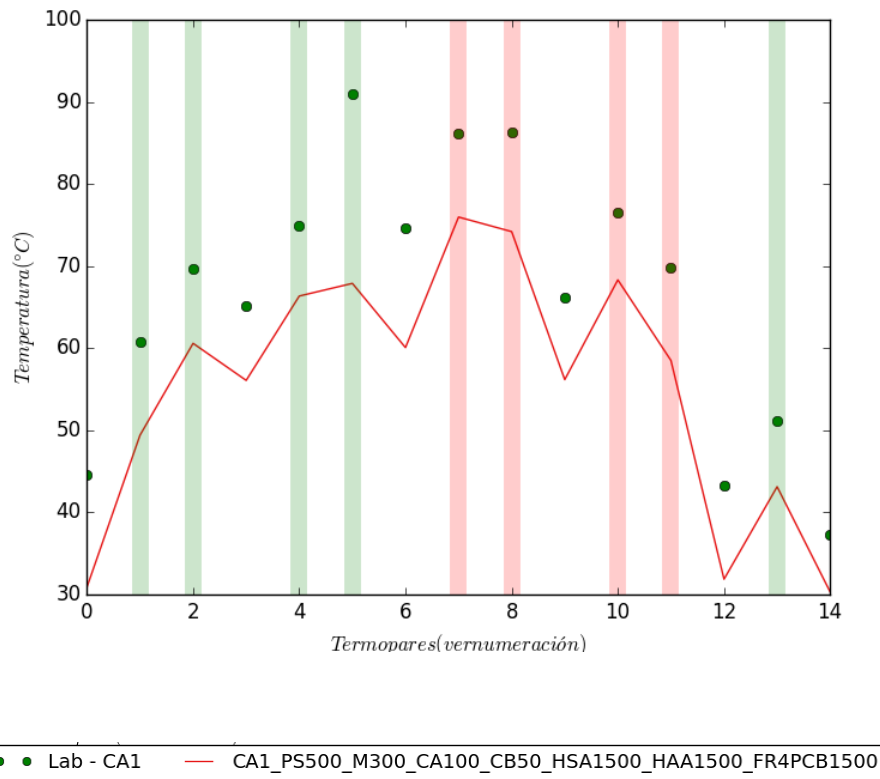


Ilustración 60: Caso Adicional 1. Pletina 0°C, y cámara 50°C. Fuente: Programa KELVIN.

Este caso se modeló utilizando los valores recién hallados, viendo así si coincidían para la variación de temperaturas en la pletina y la pared. Se observó que la forma sí se aproximaba a los resultados requeridos, pero los valores variaban en un gradiente aproximadamente constante de temperatura.

Viendo la forma de la **ilustración 60**, se llegó a la conclusión de que debía estudiarse una variación de temperatura de la pletina, se consideró que la pletina estaba ligeramente más caliente.

Así que se juntaron las referencias del laboratorio para el caso Caliente y el Adicional 1, comprobando así que la variación de temperatura era prácticamente constante en todos los puntos.

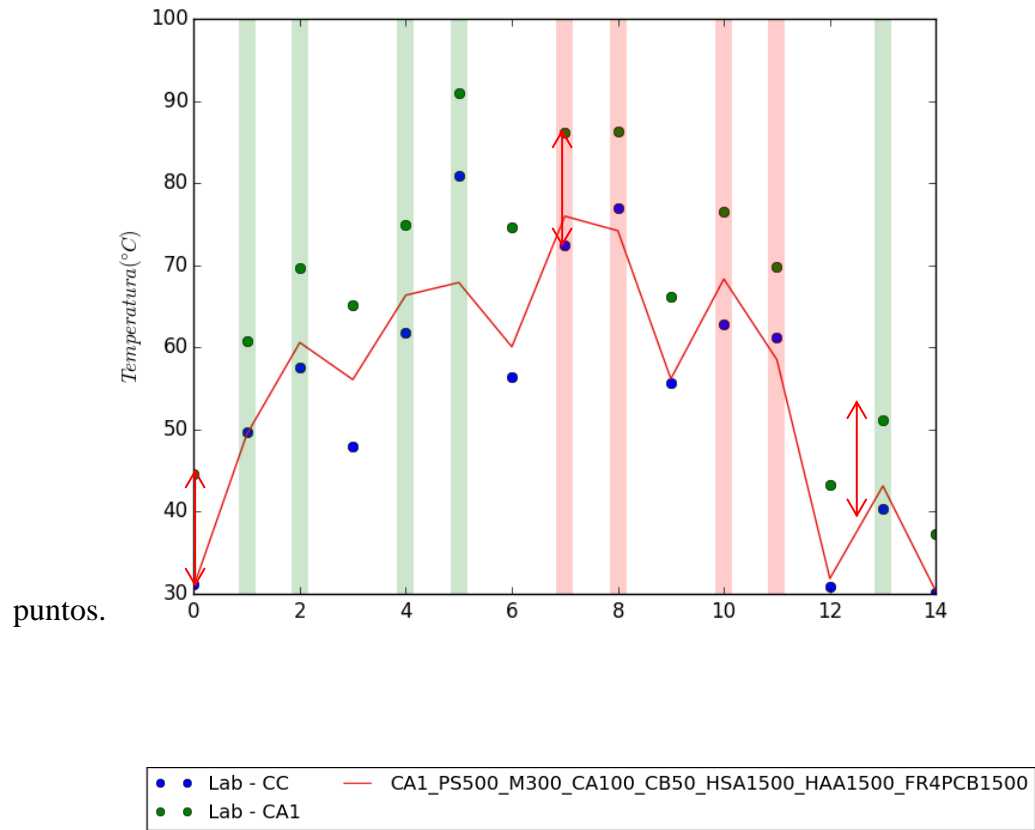


Ilustración 61: CA1 (pletina 0°C) comparando con CC (temps lab). Fuente: Programa KELVIN.

Se ejecutó también el caso adicional dos para la hipótesis de que llegase a estado estacionario:

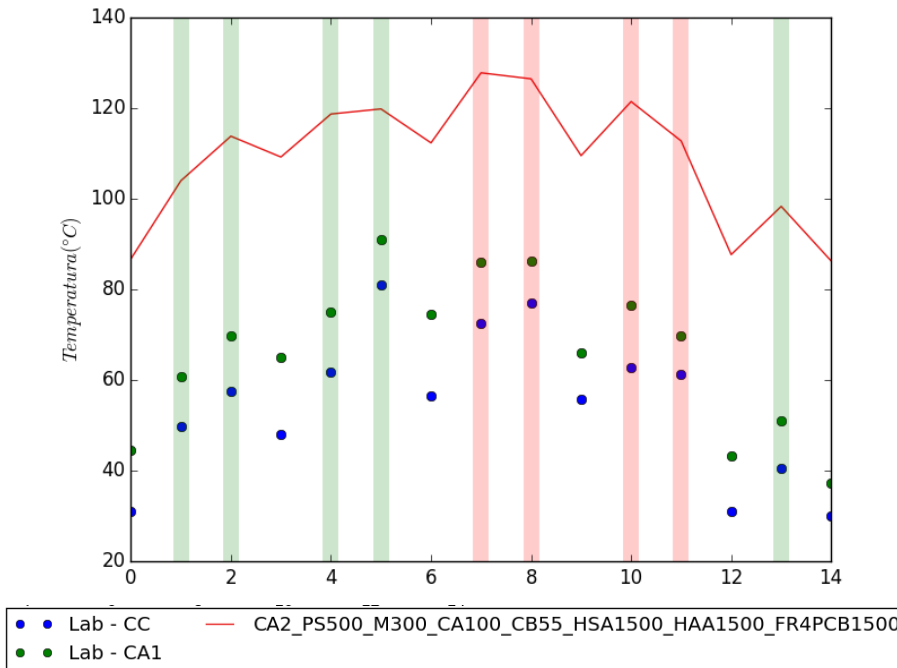


Ilustración 62.CASO A2 (pletina 60ºgrados) comparativa.

Mirando los casos adicional 1 y 2(estacionario), se llega a la conclusión que la variación esperada de temperatura entre pletina y PCB es de unos 30°C, por lo cual se ha supuesto que lo temperatura real de la pletina en el caso adicional 1, no es de 0°C sino de unos 15°C aproximadamente, donde quedaría:

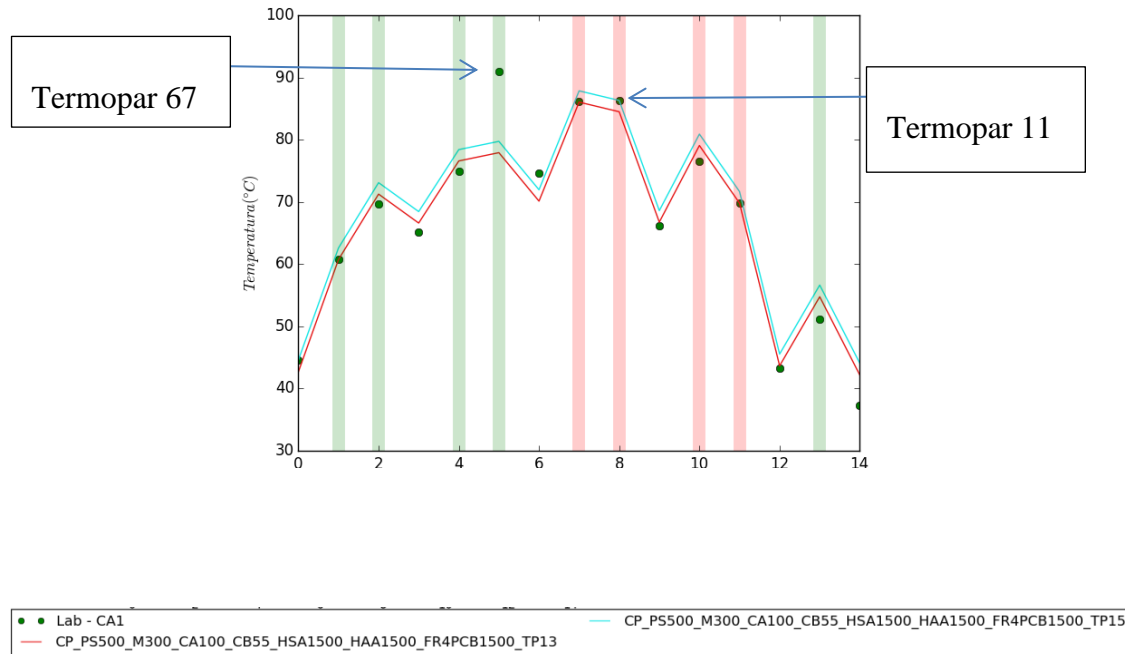


Ilustración 63: Casos cambiando temperatura pletina. (15°C y 13°C). Fuente: Programa KELVIN.

Variando la temperatura de la pletina se ve que la aproximación es bastante buena despreciando el termopar 67, y el termopar 11, debido a que, el termopar 67 da un valor extremo y fuera de lugar y el termopar 11 no debe ser superior a la temperatura del termopar 6.

Se ha tomado por bueno el caso:

CP_PS500_M300_CA100_CB55_HAS1500_HAA1500_FR4PCB1500_TP13.

Es decir, las siguientes conductancias en las uniones:



Útil-pletina	500 W/m ² K
Marco-Útil	300 W/m ² K
CentroA -Útil	100 W/m ² K
CentroB- Útil	55 W/m ² K
Radiadores Aislados- Cala	1500 W/m ² K
Radiadores sin Aislar - placa base	1500W/m ² K
Fr4_placa base	1500 W/m ² K
Temp. pletina	13°C

Tabla 9: Datos finales obtenidos. Fuente: Elaboración propia.

6.5 CONCLUSIONES

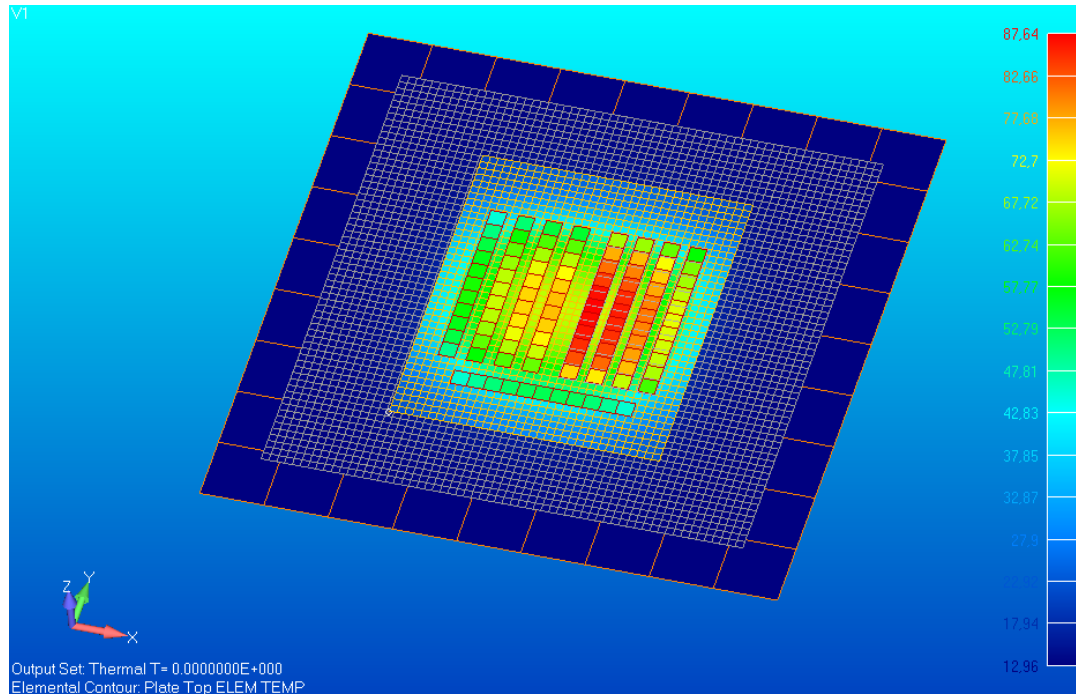


Ilustración 64: Resultado final del Caso adicional 1.

En la **ilustración 64**, se observa que como era de esperar los radiadores más calientes son los más aislados

La temperatura máxima alcanzada sería de unos 87°C, que coincide con aproximadamente el punto señalado en la **ilustración 53**.

Potencia radiadores	1,04	W/cm ²
Área total radiadores	444,15	cm ²
Potencia total	461,916	W

Potencia disipada por radiación a la cámara	60,7	W
Potencia a la pletina a 13°C	401,2	W

Tabla 10: Datos. Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos datos se puede estimar de la siguiente manera la resistencia térmica y compararla la que saldría según el modelo en FEMAP.

- Cálculo teórico:

Conductancia HSA	1500	W/m ² K
Área de un radiador	0,004935	m
C	7,4025	W/K
Rth	0,1350895	K/W

Tabla 11: Cálculo teórico de la resistencia térmica. Fuente: Elaboración propia.

- Cálculo con FEM.

Temperatura en el HSA	76,06	°C
Temperatura en la placa base	70,09	°C

ΔT	5,97	K
Potencia radiadores	1,04	W/cm ²
Potencia radiador 1	51,32	W
C	8,59698492	W/K
Rth	0,11631985	K/W

Tabla 12: cálculo de la resistencia térmica a partir de las temperaturas del modelo. Fuente: Elaboración propia.

Para estos cálculos se ha cogido uno de los cinco radiadores no aislados siendo la forma más sencilla de estimarlo, evitando tener que hacer cálculos más complejos con resistencias en paralelo por las capas aislantes.

Según los resultados se comete una discrepancia con los resultados del 16%, que se acepta. Esto es debido a que la conductancia no es totalmente constante en las superficies, aunque sean suficientemente lisas, esta explicación se puede ver en el capítulo 2, también la colocación de los termopares en el modelo no es exacta, puede introducir pequeñas variaciones.

La conductancia final obtenida del adhesivo es del orden de 1500W/m²K, aceptable para este tipo de adhesivos, y puesto que el adhesivo paso todos los ensayos sin problemas, agrietamientos, o fallos, fue finalmente aceptado.



Capítulo 7 CASO 2: ABRAZADERA.

Una vez terminado el estudio de los radiadores, se plantea realizar un segundo modelo térmico.

En este caso de estudio se procederá al análisis de una pieza (abrazadera), para mejorar la conductancia entre un transistor y la placa base a la que va conectado. Se pretende hacer un estudio completo de la pieza incluyendo cálculos mecánicos para aceptar su uso en los nuevos proyectos.

El análisis de la abrazadera se realizará tanto analítica como experimentalmente. Se tomarán medidas en el laboratorio, y se analizarán los resultados obtenidos de un modelo térmico y un modelo mecánico.

El objetivo particular que justifica la realización de un modelo térmico, es el desconocimiento de la conductancia de contacto de la abrazadera con el transistor y la placa base en todas sus uniones. Sí se conocerá la fuerza aplicada por el tornillo.

Para ello, se realizará una correlación entre los resultados experimentales obtenidos, y un modelo teórico, junto con sus correspondientes cálculos mecánicos y térmicos.

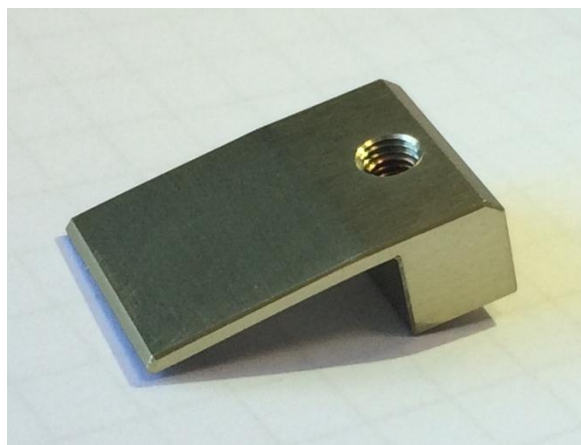


Ilustración 65: Abrazadera. Fuente: Elaboración propia.

Anteriormente al estudio de la abrazadera, se analizará un modelo previo, con ello se pretende conocer la conductancia de contacto del transistor a la placa base en el caso de estar sometido a una presión en la parte superior, esto se simulara situando dos transistores en forma de torreta, será explicado a continuación. En caso de unos resultados muy desfavorables se descartaría directamente la pieza de estudio.

En este modelo se han usado elementos sólidos y elementos de tipo placa conjuntamente. Por ello se han requerido algunas pruebas previas para conocer el correcto funcionamiento de los elementos sólidos.

7.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MONTAJES

El montaje constará de:

- Un útil necesario para la unión con la cámara térmica de vacío, de forma rectangular y con diversos orificios para poder colocar tornillos en diferentes posiciones y anclar los diversos PCBs según sea requerido. No es específico para este modelo, sino universal. De aluminio AA 6086 T6. Visto en el modelo de los radiadores.
- Una placa base, del mismo material que el útil para ayudar a la continuidad térmica de los materiales. El cual estará unido al mismo mediante tornillos en el perímetro.
- Un Dispositivo electrónico semiconductor utilizado para entregar una señal de salida en respuesta a una señal de entrada llamado To 254. Cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador, o rectificador. El tamaño de transistor guarda relación con la potencia que es capaz de manejar. En todos los modelos de este caso se utilizarán de tamaño intermedio (TO254).
 - o Subcaso 1: Pareja de transistores To254.

El montaje de este caso se realizara sobre una placa base considerando dos To 254, uno colocado sobre otro como se puede apreciar en la **Ilustración 66**.

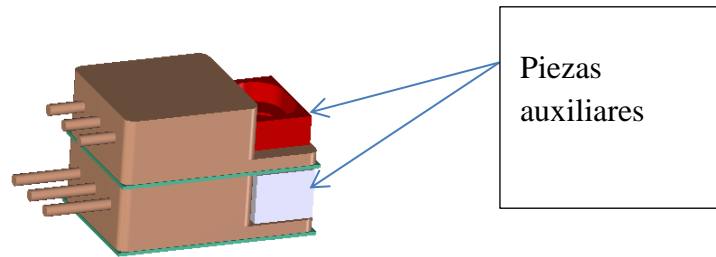


Ilustración 66: Dos To254, situados uno sobre otro. Fuente: Crisa.

Se consideraran diez parejas de transistores colocados sobre la placa base, como se aprecia en la Ilustración 67.

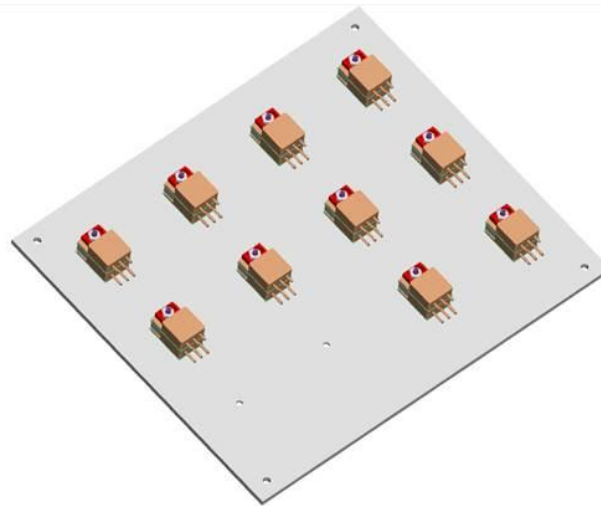


Ilustración 67: Transistores atornillados a la placa base. Fuente: Crisa.

Estos irán anclados a la placa base mediante tornillos y arandelas.

- Subcaso2: Estudio de la abrazadera.

Para este caso se retirara el transistor superior y las piezas auxiliares y se colocara la pieza a estudiar. De la forma que aparece en la

ilustración 69.

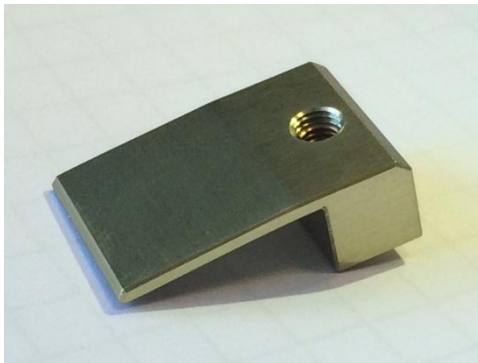
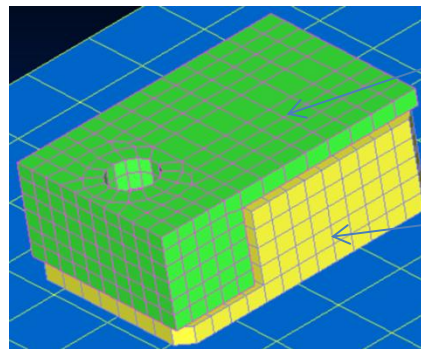


Ilustración 68: Abrazadera. Fuente: Elaboración propia.



Abrazadera

To254

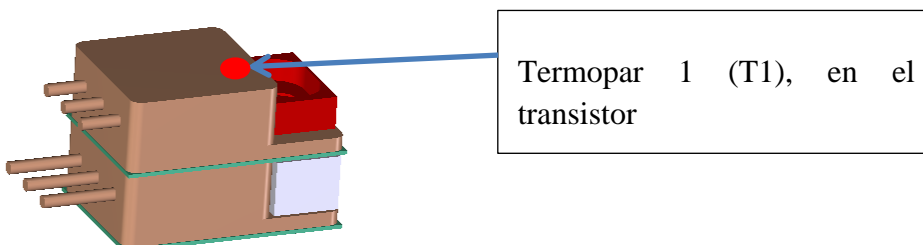
Ilustración 69: Abrazadera modelada sobre el transistor. Fuente: Elaboración propia.

7.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES: PAREJAS DE TRANSISTORES.

Como ya se ha explicado anteriormente, se realizará este estudio previo para verificar que merece la pena desarrollar la abrazadera.

En este caso se necesita medir en cada pareja, la tensión, corriente y la temperatura.

Para la medida de la temperatura se medirá la temperatura del transistor superior y la temperatura de la base sobre la que está apoyado, situando la posición de los termopares según la **ilustración 70**.



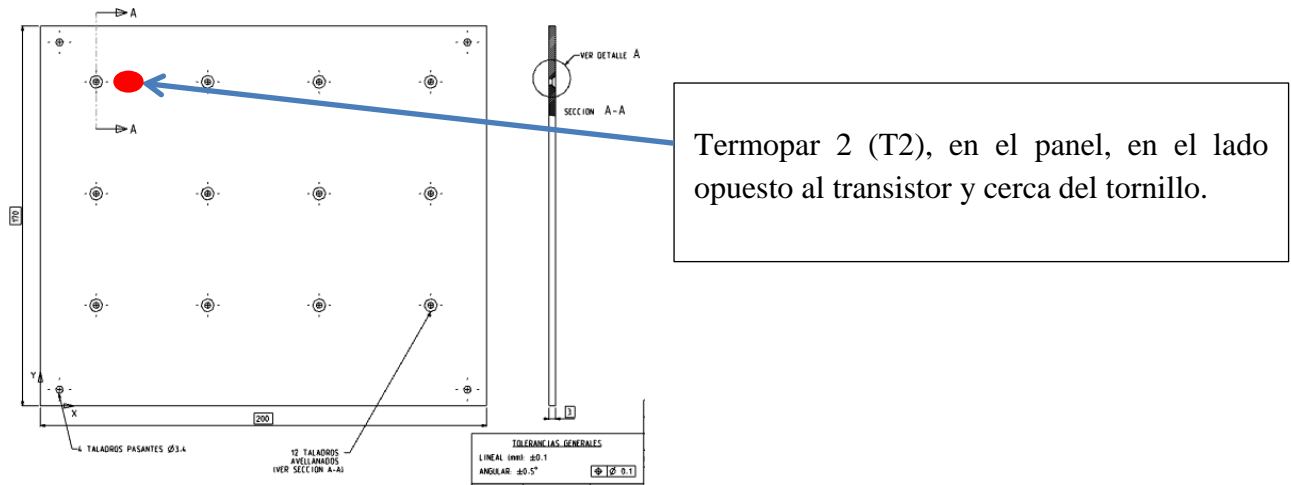


Ilustración 70: Posición de los termopares para registro de temperaturas. Fuente: Elaboración propia para Crisa.

Montar torretas hexagonales en las esquinas de la longitud suficiente para que se puedan poner los transistores boca-abajo y no toquen en la superficie de apoyo.

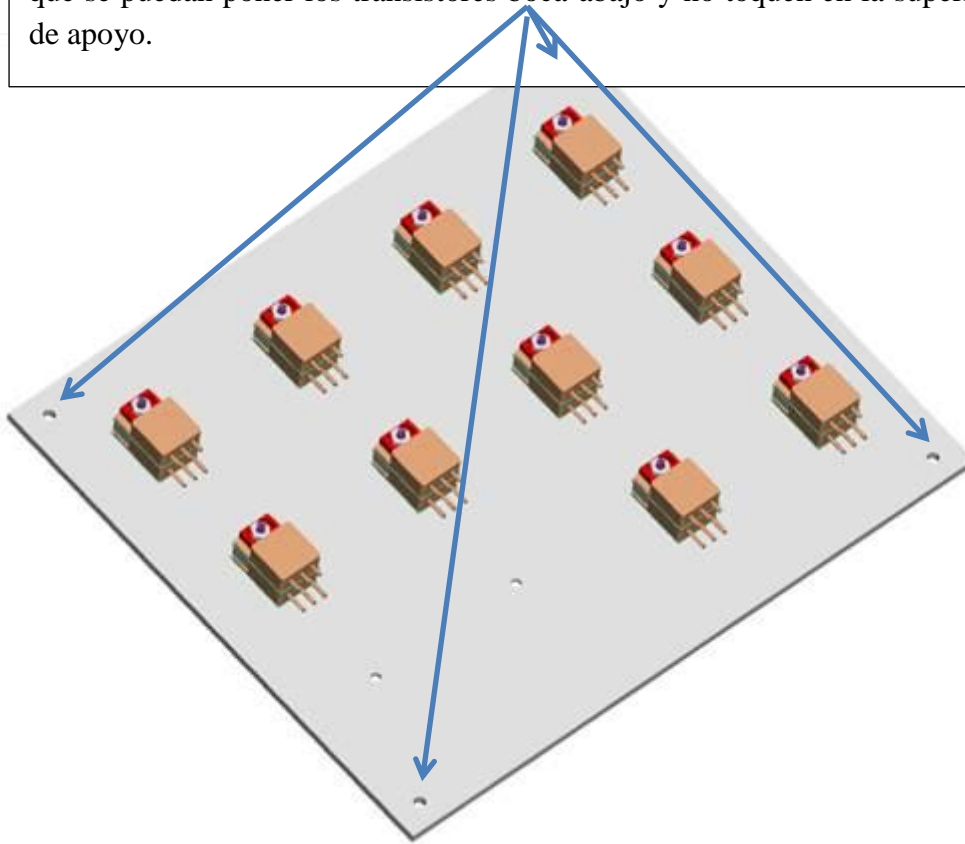


Ilustración 71 : Montaje de torretas de sujeción. Fuente: Crisa.

La **ilustración 71** señala la necesidad de montar unos puntos de apoyo para realizar las medidas sin interferir en las mediciones por apoyo sobre los cables, o contactos no controlados.

Se debe limitar el flujo de aire entre los transistores, para forzar que el flujo de calor vaya principalmente hacia la placa, con esto conseguiremos minimizar las pérdidas de calor por convección directa desde el transistor y un cálculo más preciso de la resistencia térmica.

Una forma de reducir la evacuación de calor desde el transistor es introducir la placa en una caja de plástico de la sala, transistores hacia abajo y dejar abierta la caja para favorecer la convección de la placa.



Las mediciones obtenidas de las diez torretas de transistores son las de la siguiente tabla:

Identificación de pareja de Transistores	Medida de tensión (V)	Medida de corriente (A)	Potencia calculado $W = V \cdot A$ (W)	Temperatura en Transistor (T1) (°C)	Temperatura en Transistor (T2) (°C)	ΔT	Rth
1	3,202	1	3,202	42,74	32,51	10,23	3,19
2	3,252	1	3,252	44,90	31,12	13,78	4,23
3	3,250	1	3,250	43,75	31,21	12,54	3,86
4	3,230	1	3,230	46,10	32,29	13,81	4,27
5	3,251	1	3,251	44,41	31,48	12,90	3,96
6	3,211	1	3,211	44,45	28,79	15,66	4,87
7	3,257	1	3,257	47,40	30,15	17,25	5,30
8	3,218	1	3,218	44,84	31,23	13,61	4,23
9	3,233	1	3,233	43,75	31,60	12,15	3,76
10	3,279	1	3,279	45,00	30,75	14,25	4,35

Tabla 13: Tabla mediciones torretas de transistores. Elaboración propia.

Estas medidas se utilizarán para el primer modelo térmico, con ellas lo correlaremos obteniendo las conductancias de contacto desconocidas.

Fotografías Setup de Test:

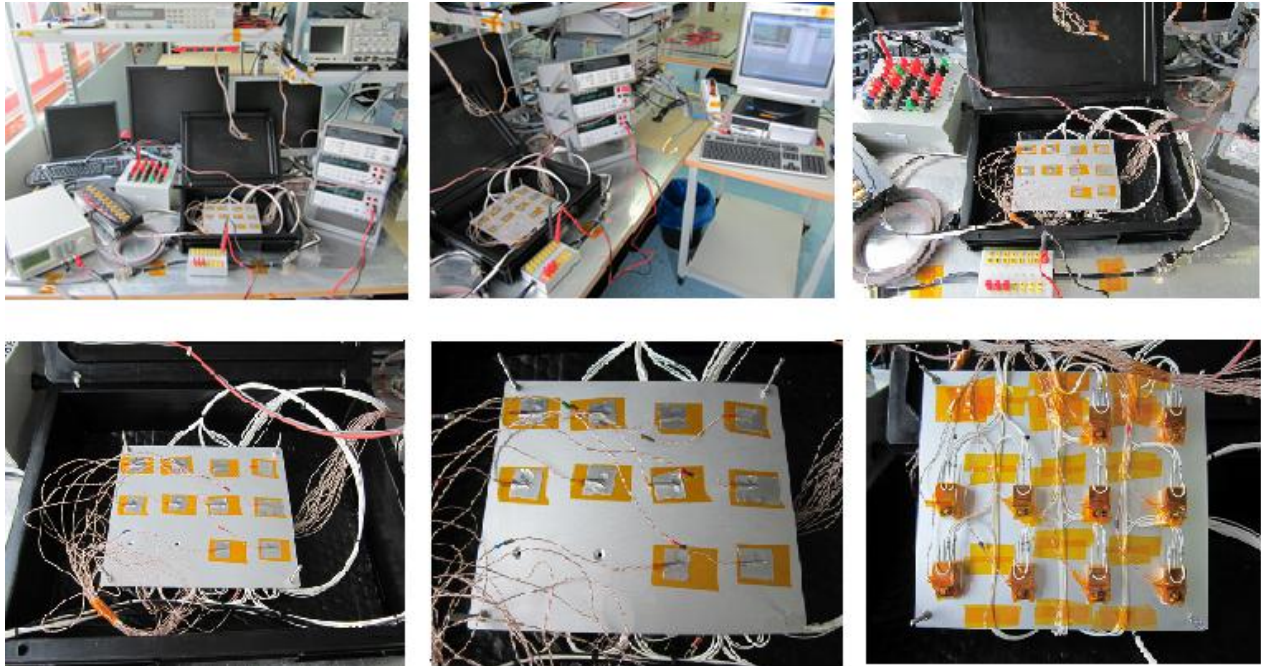


Ilustración 72: Fotografías Setup test.

En la **Ilustración 72** se pueden apreciar imágenes tomadas durante el proceso de medición.

7.2.1 RESULTADOS DEL MODELO: PAREJAS DE TRANSISTORES.

Para la realización del modelo térmico de las torretas de transistores se analizará, en primer lugar, si es necesario hacer un modelo completo o parcial, en este caso, valorando las potencias y las temperaturas obtenidas en la tabla 1, viendo que no son temperaturas excesivamente altas, conociendo una temperatura ambiente de 25 °C, y estar las torretas suficientemente separadas unas de otras, se decidió realizar un modelo único de una sola torreta despreciando así la influencia por calentamiento de unas torretas entre otras.

Una vez obtenida la conductancia de contacto aproximada del transistor con la placa base se realizará un modelo mecánico donde se estudiara la fuerza y la deformación a la que está sometido la abrazadera sobre un transistor para poder iterar aproximadamente la diferencia de presión entre el tornillo y el voladizo final. Por último se hará una predicción aproximada de la conductancia esperable al utilizar la pieza en la base del transistor con la unión a la placa base. Posteriormente se realizará mediciones en el laboratorio y se comprobará si los resultados obtenidos se aproximan al modelo o si se debe hacer una corrección de las hipótesis.

➤ Modelo torretas:

Para el modelo de la torreta de transistores se hará una división de la superficie de contacto con la placa base en tres zonas (A, B y C) como se indica en la **ilustración 73**.

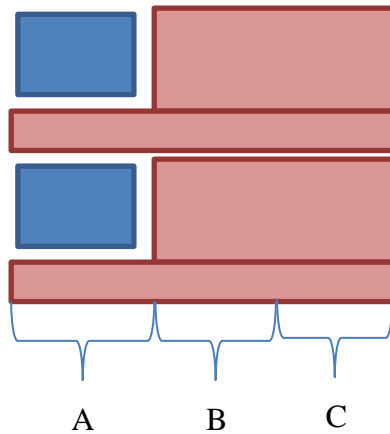


Ilustración 73: Esquema de montaje torretas de transistores. Fuente: Elaboración propia.

Esta consideración es tomada en cuenta por la suposición de que la presión de contacto será mucho mayor en la zona del tornillo que en la zona más alejada del mismo, dando lugar a diferentes conductancias de contacto.

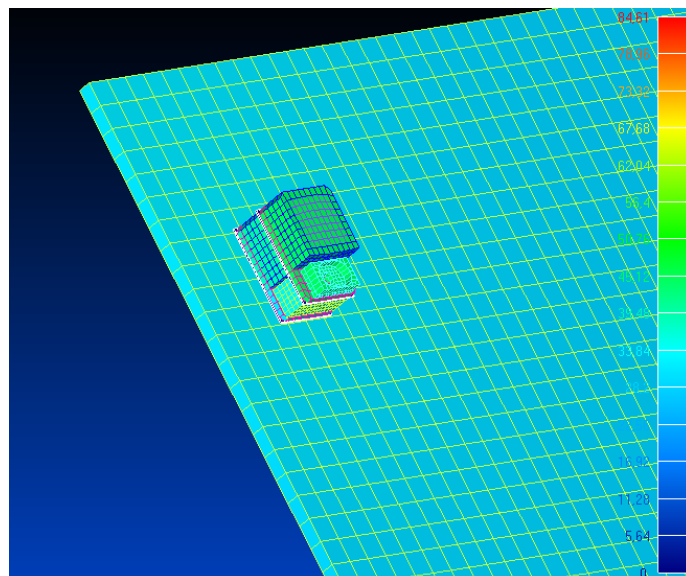
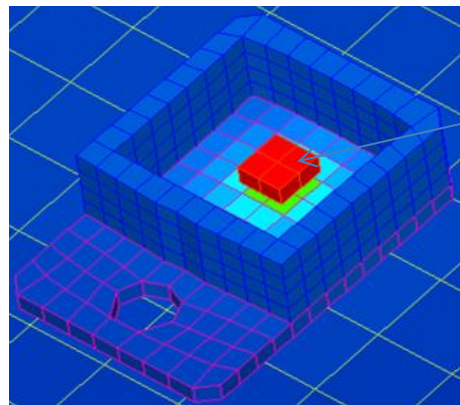


Ilustración 74: Imagen del modelo de una torreta. Fuente: Elaboración propia.



Núcleo de silicio, donde se sitúa la potencia.

Ilustración 75: Modelo térmico de un transistor abierto. Fuente: Elaboración propia.

Las **ilustraciones 74 y 75** muestran imágenes del modelo térmico realizado, y de los componentes que lo forman.

Este modelo se correlacionará con las mediciones del laboratorio variando los parámetros del modelo y sus conductancias hasta obtener una temperatura aproximada a $44,73^{\circ}\text{C}$ en el termopar T1, y $31,11^{\circ}\text{C}$ en el termopar T2, que son la media de las temperaturas de las diez torretas.

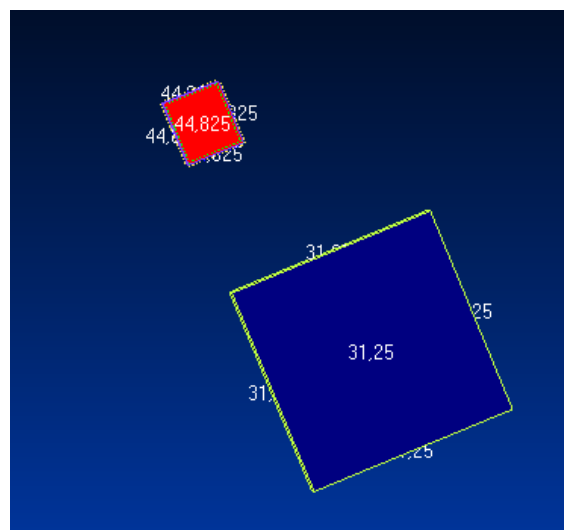


Ilustración 76: Temperatura en los termopares. Fuente: Elaboración propia.

Después de numerosas iteraciones se obtienen los resultados mostrados en la ilustración 76, esto es, $44,83^{\circ}\text{C}$ en el termopar T1 y $31,25^{\circ}\text{C}$ en el termopar T2.

Termopares	Temperatura esperada (°C)	Temperatura obtenida (°C)	Diferencia (%)
T1	44,73	44,83	0,0010
T2	31,11	31,25	0,0014

Tabla 14: Resultados obtenidos y esperados. Fuente: Elaboración propia.

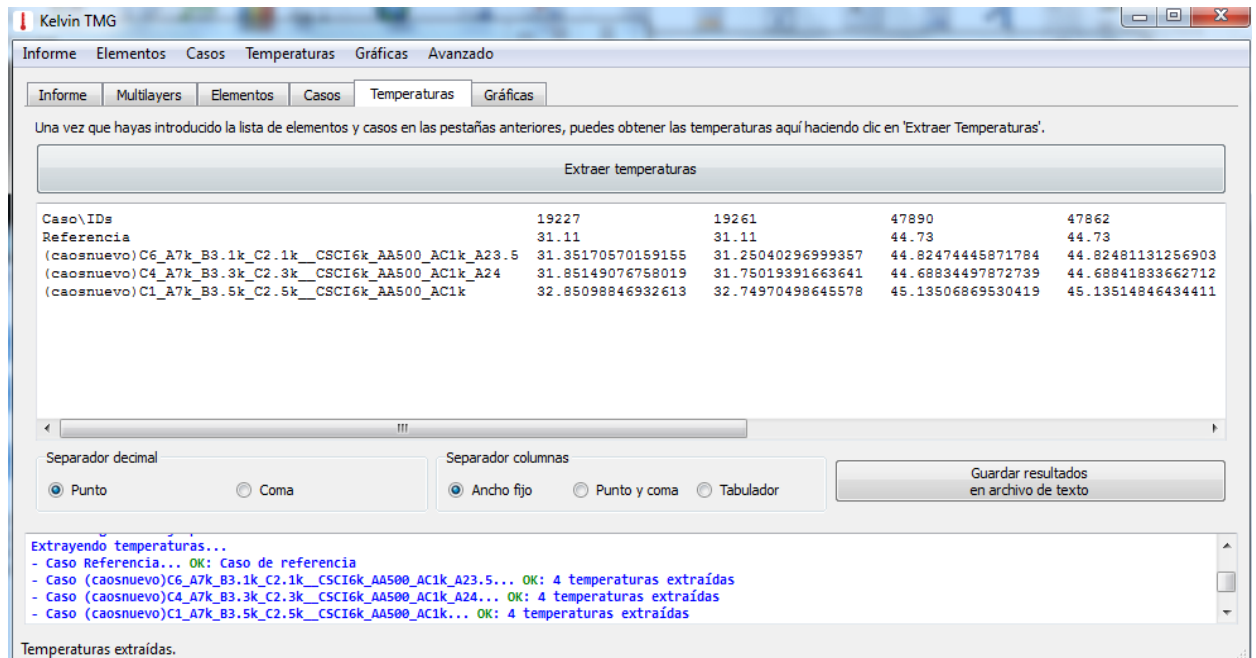


Ilustración 77: Imagen de kelvin con las últimas tres iteraciones y sus temperaturas correspondientes.

Fuente: Elaboración propia.

En la **Ilustración 77** se aprecia una imagen del programa Kelvin mostrando las temperaturas obtenidas en las 3 últimas iteraciones. En este caso se han tomado como termopares dos elementos en vez de uno para mejorar la aproximación al punto exacto.

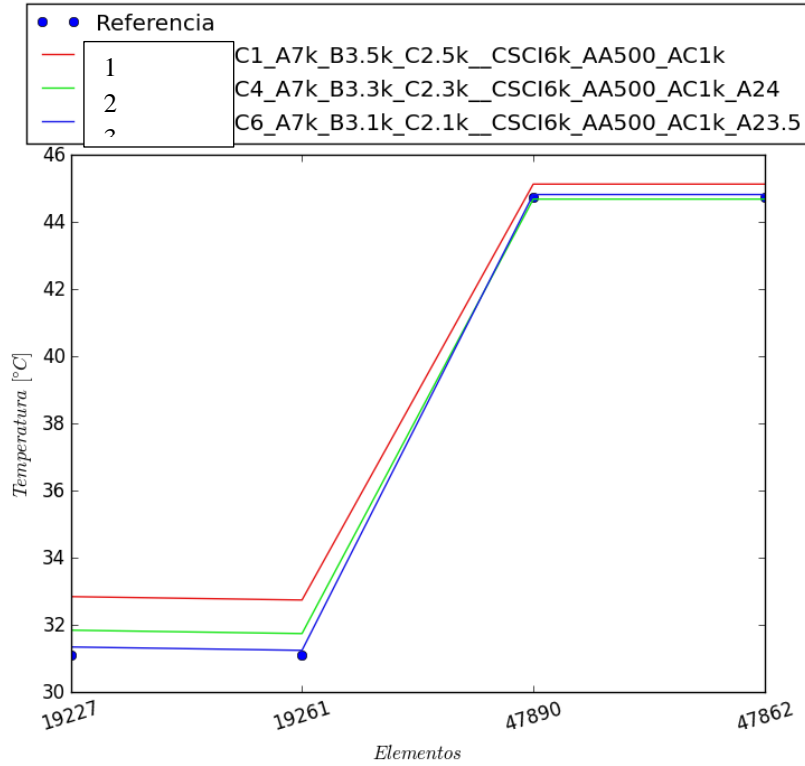


Ilustración 78: Curvas de aproximación a los valores requeridos. Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la **ilustración 78**, el modelo que mejor se aproxima a los resultados teóricos obtenidos en el laboratorio es el modelo tres, que corresponde a la línea azul del cual se obtienen las siguientes conductancias de contacto:

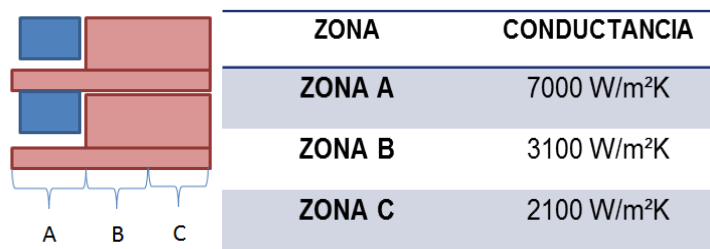


Ilustración 79: Resultados obtenidos del modelo para la aproximación de la conductancia de contacto. Fuente: Elaboración propia.

7.2.2 MODELO MECÁNICO DEL ABRAZADERA:

Una vez obtenida la conductancia de contacto aproximada del transistor con la placa base se realizará un modelo mecánico donde se estudiara la fuerza y la deformación a la que está sometido el Abrazadera sobre un transistor para poder iterar aproximadamente la diferencia de presión entre el tornillo y el voladizo final. Por último se hará una predicción aproximada de la conductancia esperable, con un modelo térmico, al utilizar la pieza en la base del transistor con la unión a la placa base.

Para la realización del modelo mecánico, se ha medido el desplazamiento producido en el voladizo al colocar el Abrazadera sobre el transistor como se aprecia en la **ilustración 81**. A partir de ese desplazamiento y utilizando esta vez FEMAP con NASTRAM, el postprocesador para cálculo mecánico, se obtiene la fuerza ejercida en el voladizo.

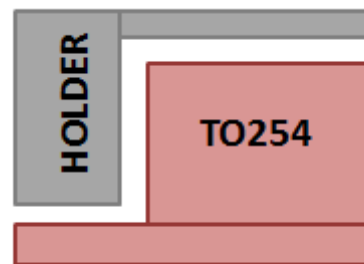


Ilustración 80: Esquema de montaje de Abrazadera con transistor. Fuente: Elaboración propia

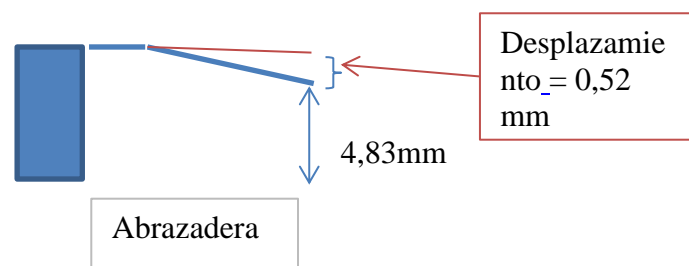


Ilustración 81: Esquema modelo mecánico del Abrazadera. Fuente: Elaboración propia.

Altura TO	5,35	mm
Altura borde Abrazadera	4,83	mm
Desplazamiento	0,52	mm
(objetivo)	0,00052	m

Tabla 15: Mediciones desplazamiento. Fuente: Elaboración propia.

f (N/m)	desplazamiento (m)	desp (mm)	Error
1	7,77E-08	7,77E-05	-99,99%
10000	0,000777	0,777	49,42%
20000	0,00155	1,550	198,08%
6710	0,000522	0,522	0,38%
Fuerza por unidad de longitud a lo largo del borde de la abrazadera:			
6710			N/m

Longitud borde del abrazadera:	
13,5	mm
0,0135	m

Fuerza resultante:	
91	N

Tabla 16: Resultados fuerza resultante. Fuente: Elaboración propia.

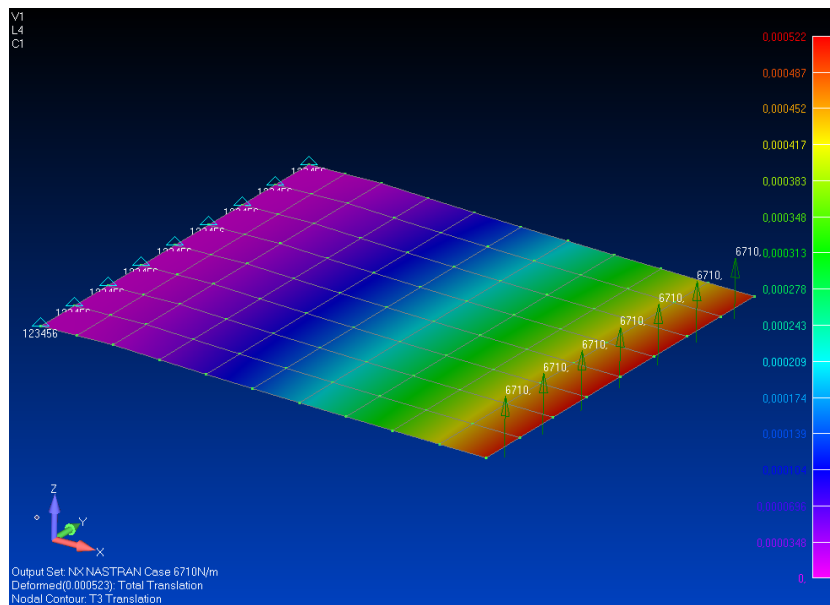


Ilustración 82: Modelo mecánico de la abrazadera. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto en el modelo mecánico se obtuvo una fuerza resultante de 91 N en el final del voladizo, conociendo el tornillo se dibuja el siguiente diagrama:

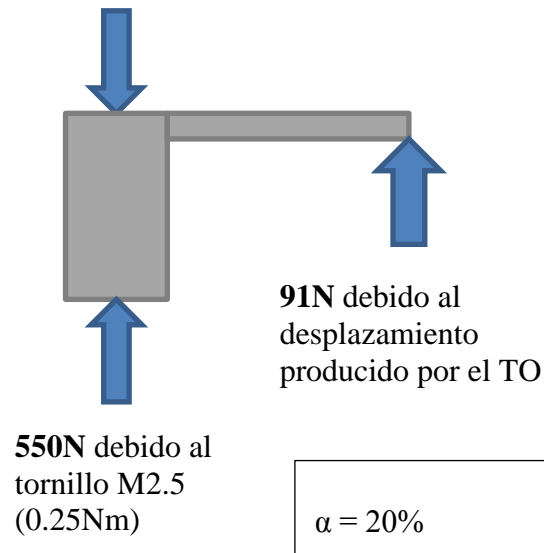


Ilustración 83: Porcentaje aproximado de fuerza ejercida entre el tornillo y el final del voladizo.

Fuente: Elaboración propia.

Con este diagrama se obtiene una diferencia de presión entre la zona del tornillo y la zona del voladizo final de un 20%.

Con estos datos procederemos al estudio térmico de la pieza.

7.2.3 MODELOS TÉRMICO:

Para la realización del modelo térmico, como ya se ha explicado anteriormente en el apartado 1 de descripción de montajes, se reutilizará el modelo de las torretas, sustituyendo uno de los transistores por la Abrazadera, eliminando las piezas auxiliares.

Quedando de la siguiente manera:

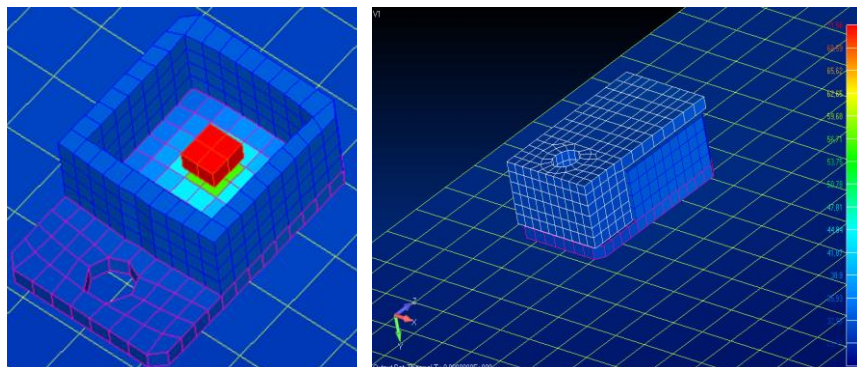


Ilustración 84 : Imágenes del modelo térmico. Fuente: Elaboración propia.

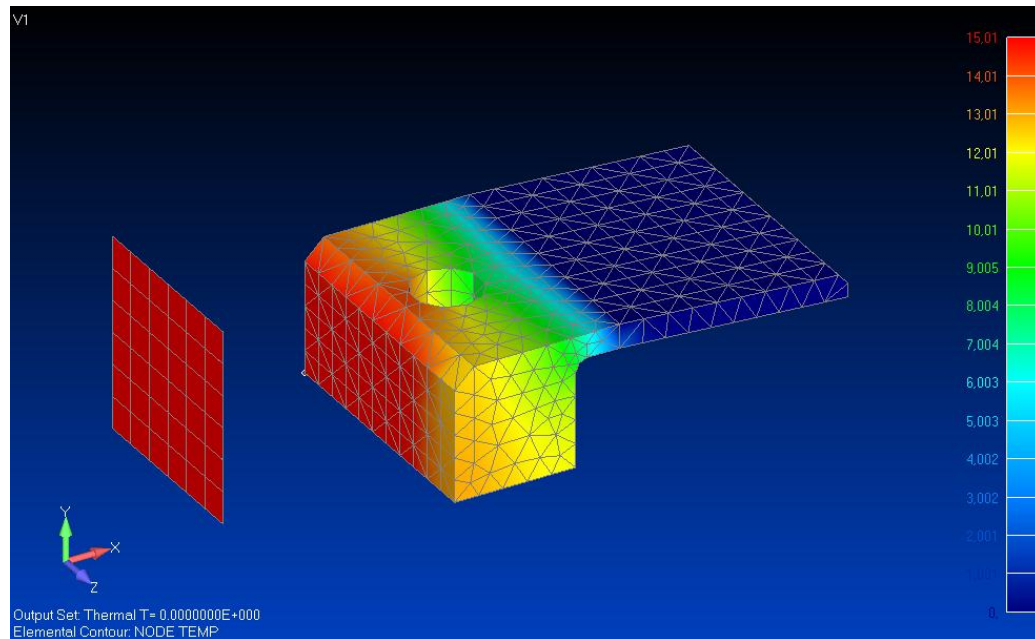


Ilustración 85: Pruebas de transmisión de calor a través del Abrazadera. Fuente: Elaboración propia.

Para realizar correctamente los contactos se realizaron numerosas pruebas la **Ilustración 85** es un ejemplo de las mismas. En ella se aprecia una placa con potencia en contacto con el Abrazadera y la forma en que se transmite el calor a través del mismo, esto nos permite verificar que el modelo está bien hecho y no hay interferencias o discontinuidades.

Según los cálculos obtenidos en el modelo mecánico y térmico:

Par de apriete [Nm]	Precarga [N]	α	Conductancia borde [W/m ² K]	Conductancia centro [W/m ² K]	potencia a través de TO[W]	T1 (TO arriba)	T2 (Útil)	ΔT	Rth[K/W]
0,24	443	0,21	1849	5424	3,176	33,76	31,43	2,33	0,7336272
0,25	550	0,17	1489	5245	3,175	34,00	31,45	2,55	0,8031496

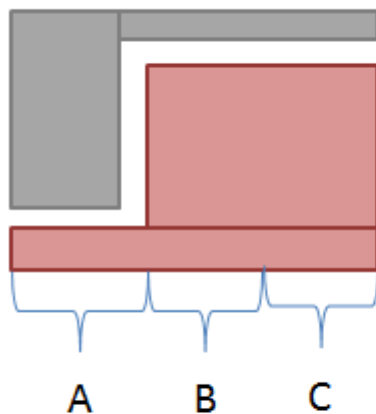
0,26	689	0,13	1189	5094	3,174	34,24	31,47	2,77	0,8727158
------	-----	------	------	------	-------	-------	-------	------	-----------

Media Rth	0,8031642
-----------	-----------

Tabla 17: Resultados y cálculo de Rth. fuente: Elaboración propia.

Fb[N]	Conductancia tornillo [W/m²K]	Potencia[W]
91	9000	3,24

Tabla 18: Datos modelo térmico. Fuente: Elaboración propia.



A= 9000 W/m²K (Estimated)
 B= 5245 W/m²K = (A+C)/2
 C= 1490 W/m²K (≈20% A)

$\Delta T = 2.55K$	$R_{th} = 0.803K/W$ (*)
--------------------	-------------------------

Ilustración 86: Resultados previos sin considerar Cho-therm. Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados se obtendrían sin considerar el Cho-therm, elemento de unión entre la placa base y el transistor en el caso del montaje con Abrazadera. Este material mejora la unión y tiene las características que se muestran en la imagen:

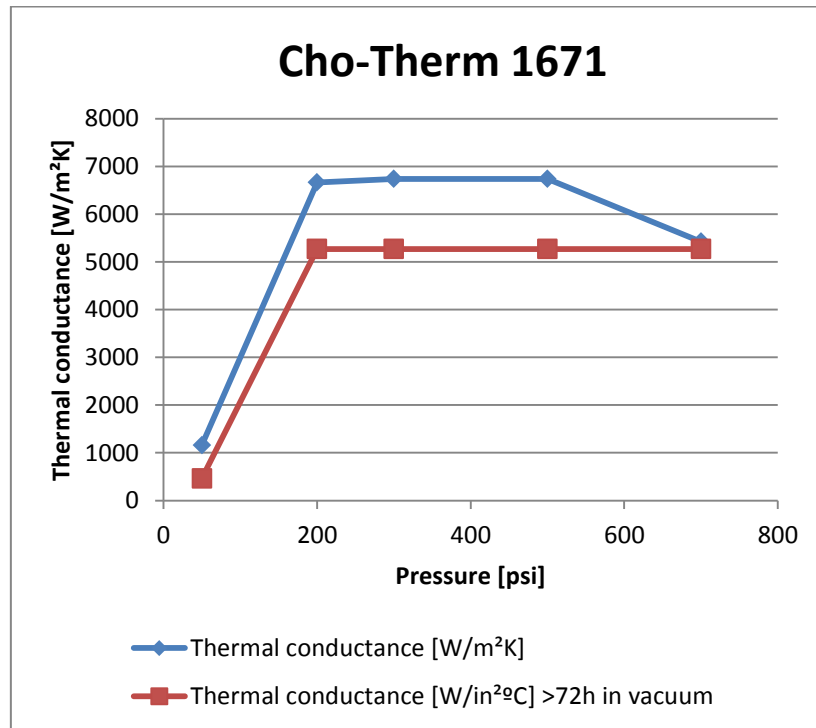
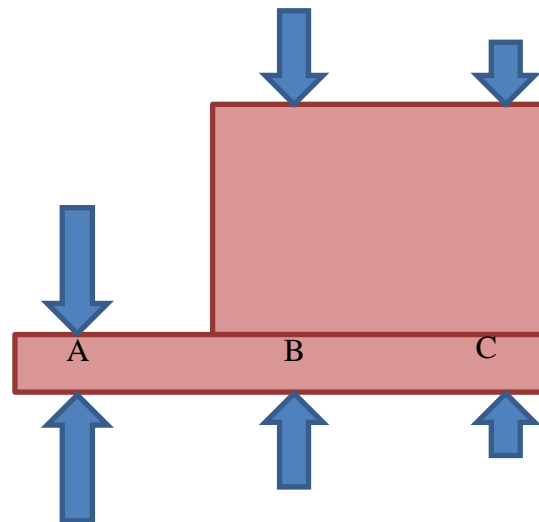


Ilustración 87: Conductancia del Cho-therm frente a presión ejercida. Valor óptimo @300-500psi (6739W/m²K). Fuente: www.chomerics.com

Con los datos mostrados por la Ilustración 86, y la ilustración 87, se obtienen las conductancias mostradas en la tabla 7.



500N

300N

100N

(797psi)

(515psi)

(172psi)

Ilustración 88: Suposición de valores aproximados de presión. Fuente: Elaboración propia.

Zona	ÁREA [m ²]	FUERZ A [N]	PRESIÓ N [Pa]	PRESIÓ N [psi]	THERMAL CONDUCTANCE [W/m ² K]	
A (tornillo)	0,000091	500	5494505	797	5300	5270
B (medio)	0,000084 5	300	3550296	515	6700	5270
C (extremo)	0,000084 5	100	1183432	172	5100	4000
						>72h in vacuum

Tabla 19: Conductancias obtenidas basadas en el comportamiento del Cho-term.



En esta tabla se muestran los resultados de las dos opciones, en condiciones normales o con un tiempo superior a 72 horas en vacío.

7.3 CONCLUSIONES DE LA ACEPTACIÓN DE LA ABRAZADERA EN PROYECTOS.

Se concluye que la utilización de la abrazadera es innecesaria ya que no mejora la conductancia de contacto debido a las propiedades del Cho-therm, para que hubiese sido aceptada debería haber mejorado la conductancia en más de un 20% sin superar el gradiente de temperatura en el caso de los dos transistores. Se debería estudiar otro método de unión entre el transistor y la placa base que no incluya el Cho-therm para observar si de esa manera sí que sería conveniente usar la Abrazadera.

Otro de los inconvenientes de la Abrazadera es su peso -aproximadamente dos gramos- en el caso de que solo hubiese un transistor en el proyecto requerido, no sería un inconveniente, pero generalmente los montajes industriales llevan gran cantidad de transistores, lo que incrementaría el peso de la caja final notablemente.

Medición de peso del Abrazadera	
Medida 1	2,01g.
Medida 2	1,99g.
Medida 3	2,02g.

Tabla 20: Resultados de la medición de pesos en sala. Fuente: Elaboración propia.

Con este modelo se han adquirido los conocimientos necesarios para trabajar con elementos sólidos, de forma que se observen cambios de gradiente en el interior de un mismo sólido, adquiriendo con ello una visión más real del comportamiento de las temperaturas.

A continuación se realizará un estudio de sensibilidad para PCBs con distintas configuraciones con elementos sólidos, se pretende conocer mejor lo que ocurre en el interior de las capas al aplicar diferentes potencias, en diferentes composiciones.





Capítulo 8 CASO 3: ESTUDIO PCB

En este último caso de estudio se va a realizar un análisis mediante modelado de un PCB. El objetivo es la generación de una serie de gráficas e imágenes que ayuden de una forma rápida y visual, a valorar el grado de precisión que se debe utilizar en los modelos térmicos de proyectos electrónicos de elementos sobre PCB.

Se pretende suponer con una inversión de poco tiempo un gradiente máximo de las temperaturas más desfavorables obtenidas tanto en la parte superior (TOP) del PCB, como en la parte inferior (BOTTOM), dependiendo de dónde se sitúen las potencias, ya que los montajes que están siendo estudiando son montajes con una ocupación aproximada de entre el 110% y el 120%, lo que implica que, hay componentes situados por ambos lados del PCB mejorando así el aprovechamiento de espacio.

Estas gráficas con gradientes de temperaturas obtenidos en configuraciones típicas ayudaran a elegir el criterio para construir el modelo, que depende del grado de detalle que sea necesario en el resultado. Dependiendo del gradiente de temperaturas estimado, se puede conocer la aproximación al margen de temperaturas máximas requeridas por el proyecto y con ello, reducir el modelo a un estudio del balance de la energía, o modelar más en detalle los puntos calientes, o los elementos con capacidad de disipación complicada con una gran concentración de potencia. La disipación de cada componente es un dato de entrada dado por los fabricantes de los mismos para unas determinadas potencias, entre las cuales estarán las potencias de uso.

Típicamente hay que asegurarse de que la unidad electrónica pueda operar de forma segura en los diferentes ambientes en los cuales las unidades pueden ser establecidas, incluyendo una sala blanca con características de presión y temperaturas específicas donde será ensayada, (se trata la vida útil de las unidades ensayadas en el capítulo 4, y las condiciones de funcionamiento, especialmente las cargas térmicas durante el vuelo de la lanzadera donde sufre peores condiciones, en caso de formar parte de un satélite.



Los principales objetivos de un estudio térmico son:

- Calcular que las temperaturas tanto internas como externas de los componentes y materiales cumplen con los límites aceptables.
- Analizar el sistema o condiciones térmicas al que se verá sometido, y contribuir al modelo completo del sistema total proveyendo de los datos necesarios para integrarse sin introducir fallos.

El modelo térmico es la herramienta principal para conseguir estos objetivos, de ahí la importancia de facilitar el grado de precisión requerido con este estudio a medida de algunas de las configuraciones típicas.

8.1 MODELACIÓN TÉRMICA DE PCB.

Para realización de un modelo térmico de un PCB se debe tener en cuenta qué datos son conocidos, y cuáles se espera conocer.

Datos de entrada

- a) La temperatura ambiente de operación.
- b) El diseño mecánico de la unidad, incluyendo materiales, geometría, elementos de unión...
- c) La definición del PCB en sí, planos internos, configuración de las vías eléctricas, de las capas de cobre con su espesor y su ubicación...
- d) La disipación de potencia de cada componente.
- e) La distribución de potencia interna de los componentes (por ejemplo si es uniforme en su base).

Datos de salida

Con esta información es posible de construir el modelo completo y obtener lo siguiente:

- a) La temperatura alcanzada por los componentes, y la de su entorno, para proveer de información para los ensayos de estrés.

- b) Un modelo simplificado térmico si fuese requerido para realizar comprobaciones del sistema completo...

En la figura 2 se muestra un esquema típico de las resistencias térmicas dentro de una unidad electrónica, junto con unas definiciones para entender exactamente cómo circula el flujo de calor y la importancia de un buen diseño interno del PCB para ayudar a disiparlo rápidamente.

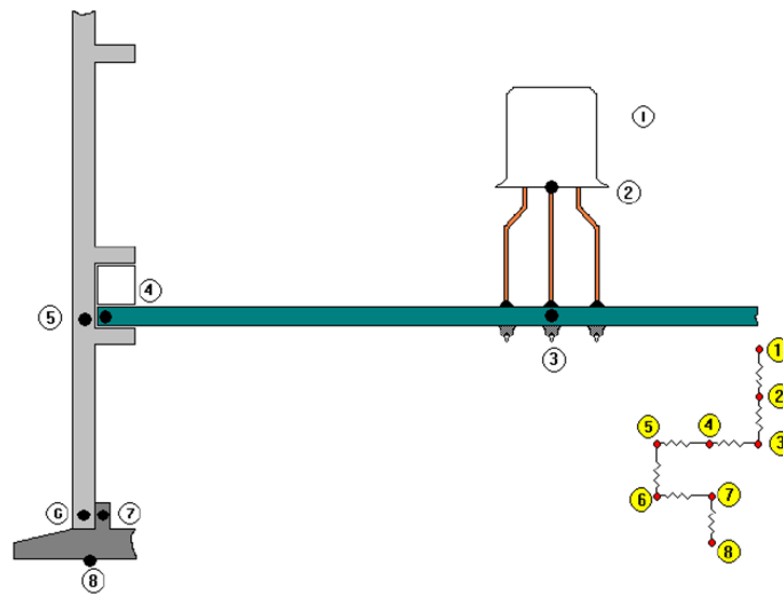


Ilustración 89: Esquemas de resistencias en el interior de una unidad electrónica. Fuente: Crisa.

Los números de la **ilustración 89** representan un punto de temperatura descrito en las siguientes líneas.

- 1 Unión con el ambiente. (AA)
- 2 Cubierta del componente.(BB)
- 3 Parte del PCB donde está unido térmicamente el componente.(CC)
- 4 Límite externo del PCB. (LE)
- 5 Punto externo del sistema. (PE)
- 6 Punto de conexión entre la pared externa de la unidad y la placa base. (UB)
- 7 Placa base. (PB)



- 8 Punto de referencia de temperaturas, este punto está típicamente localizado en la placa base cuando la unidad está diseñada para que este conductivamente controlada. Es importante mencionar que no es necesario que este punto (TRP, Punto de Temperatura de Referencia) esté siempre localizado en la placa base, podría estar situado en otras posiciones.

En los siguientes párrafos se definirán las resistencias térmicas presentadas en la **Ilustración 89**.

Se debe crear un camino que dirija el calor desde el TRP hacia el ambiente para el flujo de calor introducido en el CC.

La resistencia del punto R_{23} , se suele solucionar al fijar el componente al PCB, esta resistencia depende del material usado para conectarlo, como ejemplo de soluciones para mejorar esta resistencia serían el capítulo 5 y 6 de este Proyecto. Generalmente esta resistencia es conocida y viene impuesta para el diseño por el fabricante del componente o material de unión.

Definición de las resistencias definidas en la **ilustración 89**.

R_{34} : Es la Resistencia del PCB, el PCB está lleno de discontinuidades, el cobre es un excelente conductor pero el dieléctrico generalmente poliamida o FR4 es muy buen aislante, por lo que es muy complejo y costoso representar todos los planos de cobre con sus pistas con la geometría exacta en el modelo térmico, por lo tanto se suele utilizar un espesor equivalente medio de cobre que integra estas discontinuidades.

R_{45} : Representa el contacto entre el PCB y la pared, la pared está típicamente construida en aluminio. Para la unión se suelen usar tornillos, guías, etc. Es importante considerar materiales de la interfase como siliconas, o adhesivos.

R_{56} : Representa la resistencia térmica de la cubierta de aluminio, es una Resistencia fácil de modelar con alto grado de precisión ya que es continua y un material isentrópico.

R_{67} : Es la resistencia térmica entre dos partes externas de la caja de electrónica, es una discontinuidad típica unida normalmente mediante tornillos, la conductancia de contacto depende de numerosos factores como el tamaño de la superficie de contacto, materiales en contacto, presiones y calidad de la superficie (planitud, rugosidad) .

R_{78} : Representa la Resistencia térmica de la placa base, como se ha mencionado en la R_{56} anteriormente, ese tipo de resistencias no son difíciles de representar en el modelado por la continuidad y las propiedades isotrópicas del material.



En este análisis se prestará especial atención a la conducción del calor a través del PCB (R_{67}).

Como se ha explicado durante las definiciones de las conductancias el PCB no es un material homogéneo, la conductividad varía en cada plano y es diferente en función de la dirección que se tome, debido a las pistas (se denominan pistas a las zonas por las que circulan señales eléctricas, son diferentes a los planos de cobre que disipan el calor) de cobre para transmitir las señales eléctricas. Los valores dependerán de:

- El espesor total de cobre.
- El espesor del material dieléctrico, en este Proyecto se usará como material dieléctrico poliamida.
- Conductividad de la poliamida en función de:
 - o rugosidad
 - o planitud.
 - o defectos.
- La dureza del material en contacto.
- La presión aplicada a las uniones.

Una vez tenido eso en cuenta se utilizará una aproximación para modelar térmicamente esta estructura con capas, utilizando para ello un material homogéneo con dos distintas conductividades térmicas.

8.2 TRANSFERENCIA DE CALOR.

Antes de comenzar a ver las configuraciones típicas de diseño de PCB utilizadas es importante explicar cómo se transmite el flujo de calor por dentro del mismo.

En primer lugar existen dos tipos de flujo de calor:

- Uno a través del plano (k In-plane)
- Otro a través del espesor del plano (k Through)

Definidos en las siguientes ecuaciones,

$$K_{In-plane} = \frac{\sum_{i=1}^N K_i t_i}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad K_{Through} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N t_i / K_i}$$

Dónde:

t: Es el espesor dado a una capa

k: Es la conductancia térmica de esa capa

Datos de la muestra:

- Espesor total del PCB 1.59mm
- El PCB está compuesto únicamente por capas de FR4 y cobre.
- k del cobre es 380 W/mK
- k del FR4 es 0.25 W/mK

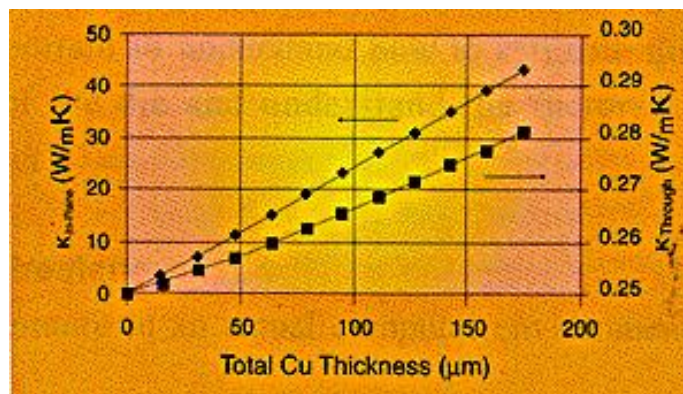


Ilustración 90: Espesor total de cobre frente a flujos de calor. Fuente: Imagen obtenida de Crisa.

Conclusión de los cálculos numéricos

- Incluso para capas muy finas de cobre la transmisión de flujo de calor $k_{In-plane}$ es mucho más grande que $k_{Through}$.



- Tanto FR4 como la poliamida tienen una conductividad térmica muy baja, una capa continua de cobre dominara la trasmisión del flujo de calor.
- Por ello, la conductividad térmica no será eficiente donde no haya caminos continuos de cobre.

Conclusiones generales:

- Las vías de señal de cobre tienen mucho menos efecto que los planos de cobre en la trasmisión de flujos de calor.
- Normalmente se podrán excluir las capas de vías en los cálculos.
- En caso de ser requeridas se podría utilizar la siguiente formula:

$$K_i = f_i K_{Cu}$$

Donde f_i es una fracción del plano de cobre.

8.3 CONFIGURACIONES ANALIZADAS

Como se ha visto, el objetivo de este análisis es la realización de una serie de gráficas que faciliten la valoración del análisis térmico requerido para una unidad formada por PCB y componentes.

Se han llevado a cabo diversas configuraciones típicas, con diferentes espesores de poliamida, y cobre, en varias posiciones y suponiendo unos rangos de densidades de potencia.

8.3.1 ANÁLISIS 1:

El PCB utilizado para este análisis está formado inicialmente por 11 capas de poliamida de $300\ \mu$ y 10 capas de cobre de $35\ \mu$. A partir de este montaje inicial se realizarán diferentes variaciones para intentar cubrir las configuraciones típicas utilizadas.

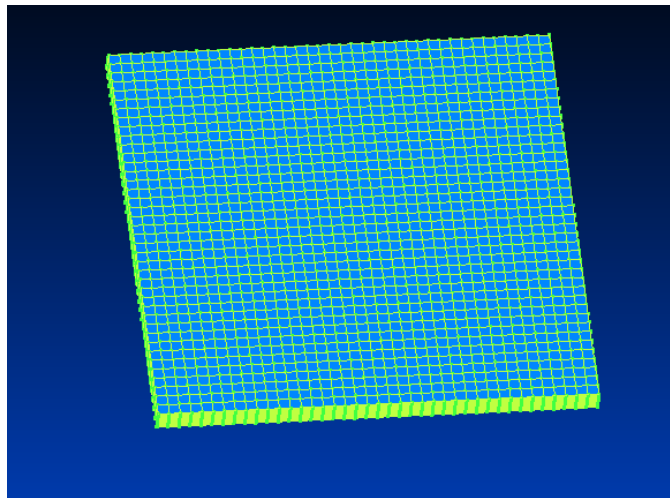


Ilustración 91: Imagen del PCB. Fuente: elaboración propia, FEMAP.

La **ilustración 91** muestra un PCB mallado, las dimensiones del PCB son $80 \times 80\ \text{mm}^2$, y el espesor variará en función de las necesidades requeridas. El tamaño de elemento es de $2 \times 2\ \text{mm}^2$.

La composición interna del mismo, es la siguiente:

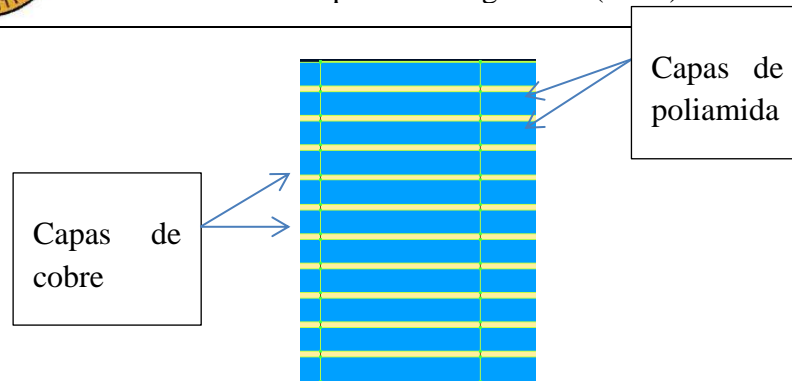


Ilustración 92: Configuración interna del PCB. Fuente: Elaboración propia, FEMAP.

La unión del PCB con el ambiente se realizará con la modelización de un marco, de espesor 1 elemento, unido a un elemento “no geométrico” (denominación del programa), simulando la unión del rigidizador, mantenido a una temperatura constante de 60°C. Con una conductancia por elemento de 0.024 W/m²°C elegida considerando conductancia térmica muy buena de 6000 W/m²°C, véase **ilustración 93**.

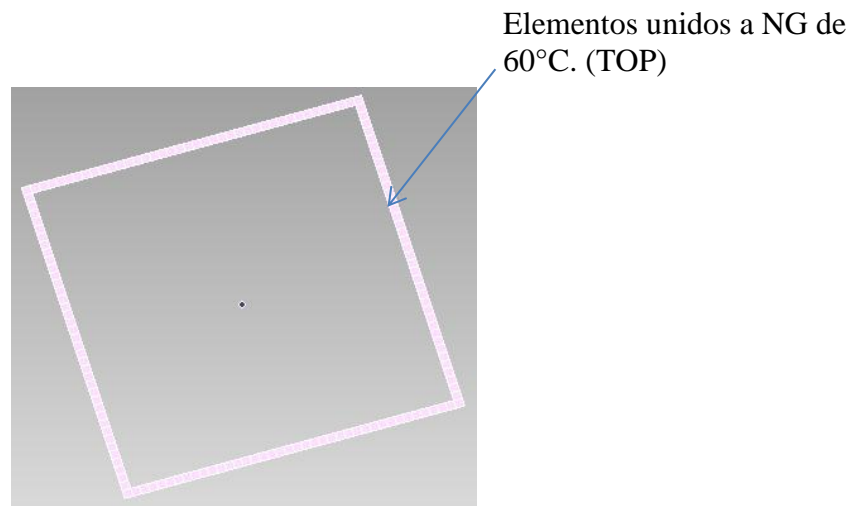


Ilustración 93: Elementos unidos a punto no geométrico, supuesto a 60°C. Fuente: Elaboración propia, FEMAP.

Para esta configuración se consideraran una serie de componentes simulados como placas a las cuales se les aplicará una densidad de potencia de 1W/cm², se muestra un ejemplo en la **ilustración 93**. La conductancia de contacto se ha considerado muy buena, casi perfecta para considerar un aumento de las temperaturas considerable y añadir un coeficiente de seguridad al modelo realizado, esta es de 6000W/m²°C.

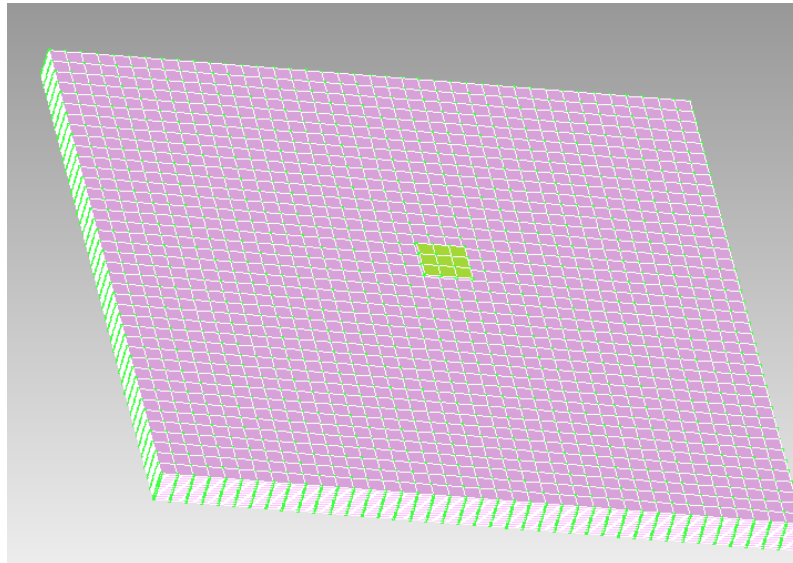


Ilustración 94: Componente simulado de 3x3 por TOP. Fuente: FEMAP.

La tabla a continuación muestra los diferentes casos realizados colocando los elementos que simulan el componente por TOP (es decir en el mismo lado que el marco que disipa el calor hacia el stiffner), o por BOTTOM, lado opuesto al marco disipativo. Ambos lados cuentan con varios casos, en los cuales se ha ampliado el tamaño del componente cambiando la densidad de potencia.

Capas alternas Cobre-Poliamida

Potencia en TOP

potencia total
considerando
densidad de
potencia
1W/cm²

	filas	elementos	tamaño cm ²	Potencia (densidad de pot 1W/cm ²)	Temperatura máxima en TOP (°C)
CASO 1	1	1 elemento	0,04	0,04	63,35



CASO 2	2	4 elementos	0,16	0,16	65,23
CASO 3	3	9 elementos	0,36	0,36	67,46
CASO 4	4	16 elementos	0,64	0,64	69,34
CASO 5	5	25 elementos	1	1	71,49
CASO 6	10	100 elementos	4	4	83,94
CASO 7	20	400 elementos	16	16	118,9

Potencia en BOTTOM

	filas	elementos	tamaño cm ²	1W/cm ²	Temperatura máxima en BOTTOM (°C)
CASO 1	1	1 elemento	0,04	0,04	63,36
CASO 2	3	9 elementos	0,36	0,36	67,61
CASO 3	5	25 elementos	1	1	71,90
CASO 4	20	400 elementos	16	16	124,3

Tabla 21: resultados análisis 1. Fuente: Elaboración propia.

La configuración por BOTTOM simula el peor caso posible, generalmente no es tan común y por ello se han estimado menos casos.

Con estos datos se obtienen los siguientes gradientes de temperatura:

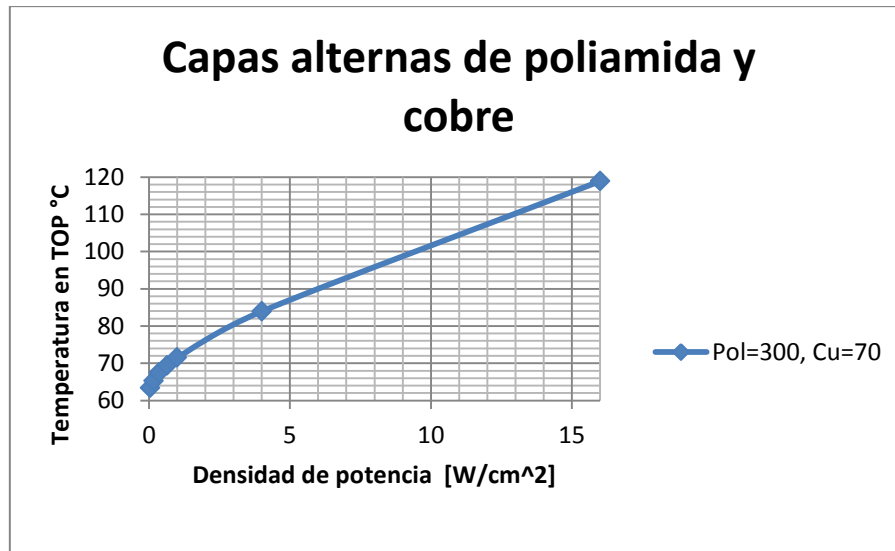


Ilustración 95: Gráfica capas alternas poliamida-cobre. Fuente: Elaboración propia.

Generalmente las potencias con las que se trabajan no exceden de 2 W/m²°C, por lo tanto, se amplía la zona de interés.

-Zona de interés:

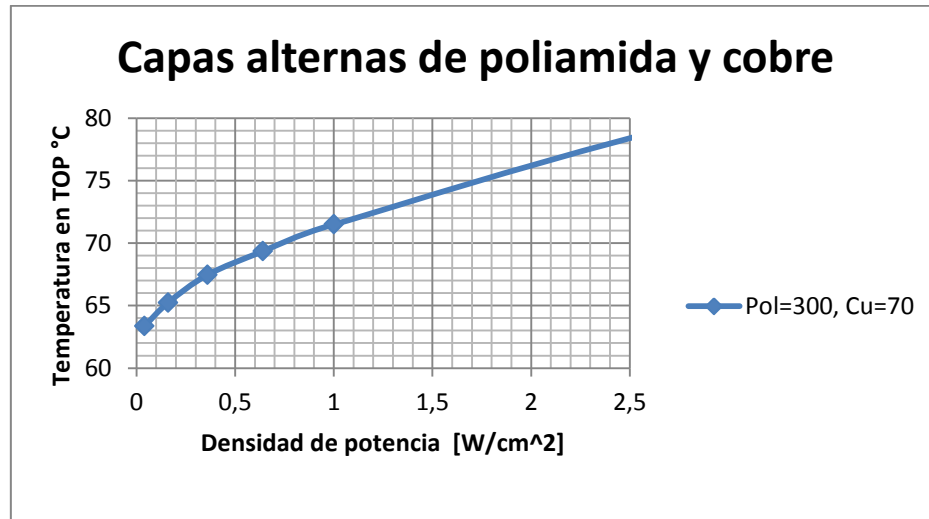


Ilustración 96: Capas alternas de poliamida-cobre, zona de interés. Fuente: elaboración propia.

8.3.2 ANÁLISIS 2:

El PCB utilizado para este análisis estara formado inicialmente por 11 capas de poliamida y 4 capas de cobre y 6 capas de un material que tomara el valor de la conductancia del cobre o de la poliamida según sea requerido valiendose de la linealidad en los valores de las conductancias termicas. A partir de este montaje inicial se realizaran diferentes variaciones para intentar cubrir las configuraciones típicas utilizadas.

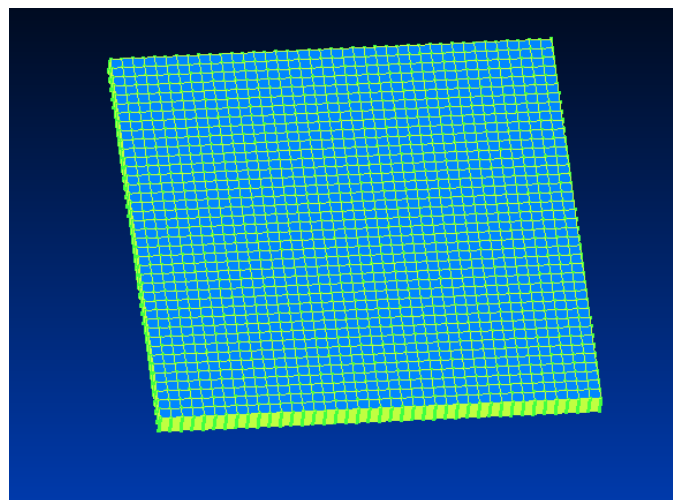


Ilustración 97: Imagen del PCB. Fuente: Elaboración propia, FEMAP.

La **ilustración 97** muestra un PCB mallado, no varían las dimensiones del PCB original, ni el tamaño de malla.

La composición interna del mismo, es la siguiente:

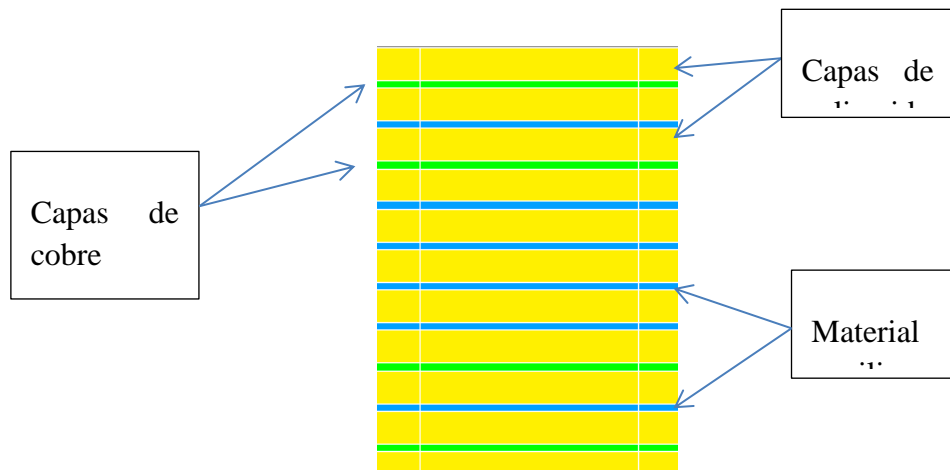


Ilustración 98: Configuración interna del PCB. Fuente: Elaboración propia, FEMAP.

La unión del modelo con el ambiente se realizará de la misma forma que en el estudio 1. Como se observa en la **ilustración 99**.

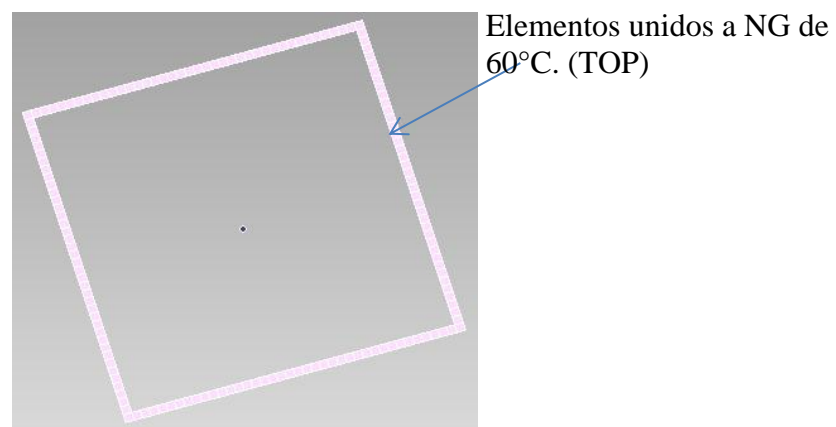


Ilustración 99: Elementos unidos a punto no geométrico, supuesto a 60°C. Fuente: Elaboración propia FEMAP.

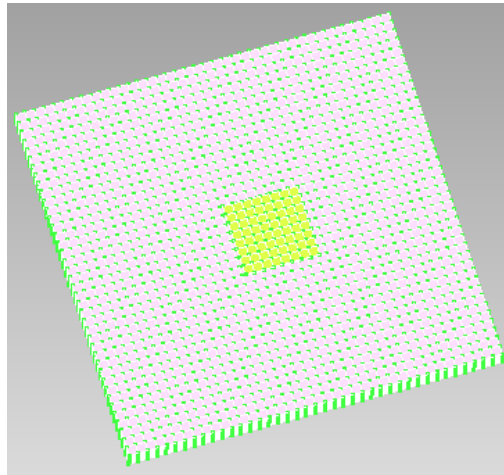


Ilustración 100: Componente simulado de 10x10 por TOP. Fuente: FEMAP.

En este caso se mantendrá una potencia total constante de 4W en cada componente, de nuevo se variará la superficie de contacto de los mismos, en este estudio también se modificarán los espesores tanto de la poliamida como del cobre como muestran las tablas a continuación,

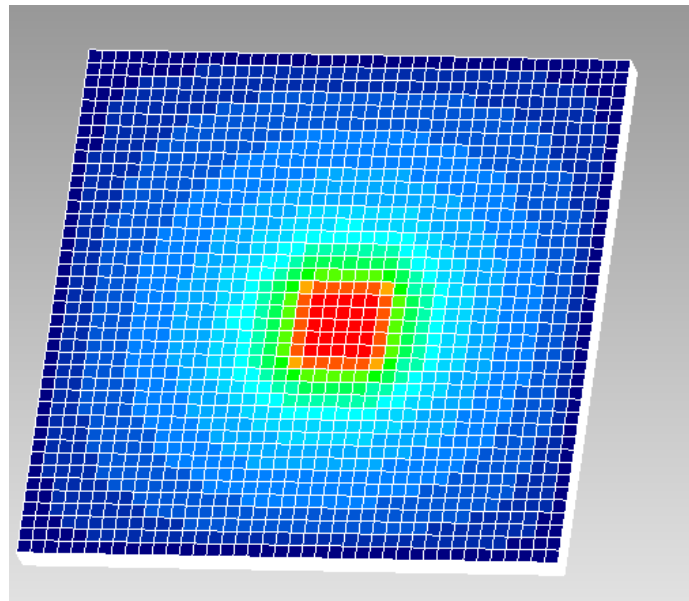


Ilustración 101: Ejemplo de mapa de temperaturas con una densidad de potencia de 1,56 W/m²°C.

Fuente: Elaboración propia, FEMAP.

Poliamida=300micras



Cu=70micras	filas	elementos	cm ²	Potencia [W]	Densidad W/cm ²	Temperatura máxima en TOP
CASO	2	4	0,16	4	25,00	
CASO A	3	9	0,36	4	11,11	150,6
CASO B	4	16	0,64	4	6,25	125,6
CASO C	5	25	1	4	4,00	112,9
CASO DEXTRA2	7	49	1,96	4	2,04	99,5
CASO DEXTRA1	8	64	2,56	4	1,56	94,79
CASO D	10	100	4	4	1,00	88,97
CASO E	20	400	16	4	0,25	76,64
Cu=35micras	filas	elementos	cm ²	Potencia [W]	Densidad W/cm ²	Temperatura máxima en TOP
CASO	2	4	0,16	4	25,00	
CASO A2	3	9	0,36	4	11,11	178,2
CASO B2	4	16	0,64	4	6,25	148,3



CASO C2	5	25	1	4	4,00	132,5
CASO D2EXTRA2	7	49	1,96	4	2,04	114,2
CASO D2EXTRA1	8	64	2,56	4	1,56	108,3
CASO D2	10	100	4	4	1,00	100,1
CASO E2	20	400	16	4	0,25	82,3

Tabla 22: Resultados análisis 2. Fuente: Elaboración propia

Poliamida=150micras						
Cu=70micras	filas	elementos	cm ²	Potencia [W]	Densidad W/cm ²	Temperatura máxima en TOP
CASO	2	4	0,16	4	25,00	
CASO V	3	9	0,36	4	11,11	120,9
CASO W	4	16	0,64	4	6,25	105,6
CASO X	5	25	1	4	4,00	97,65
CASO YEXTRA2	7	49	1,96	4	2,04	88,35



CASO YEXTRA1	8	64	2,56	4	1,56	85,35
CASO Y	10	100	4	4	1,00	81,18
CASO Z	20	400	16	4	0,25	72
Cu=35micras	filas	elementos	cm ²	Potencia [W]	Densidad W/cm ²	Temperatura máxima en TOP
CASO	2	4	0,16	4	25,00	
CASO V2	3	9	0,36	4	11,11	143,3
CASO W2	4	16	0,64	4	6,25	123,9
CASO X2	5	25	1	4	4,00	113,4
CASO Y2EXTRA2	7	49	1,96	4	2,04	100,4
CASO Y2EXTRA1	8	64	2,56	4	1,56	96,22
CASO Y2	10	100	4	4	1,00	90,22
CASO Z2	20	400	16	4	0,25	76,66

Tabla 23: Continuación tabla 22.

De estos resultados se obtienen las siguientes gráficas, se presenta únicamente la zona de interés:

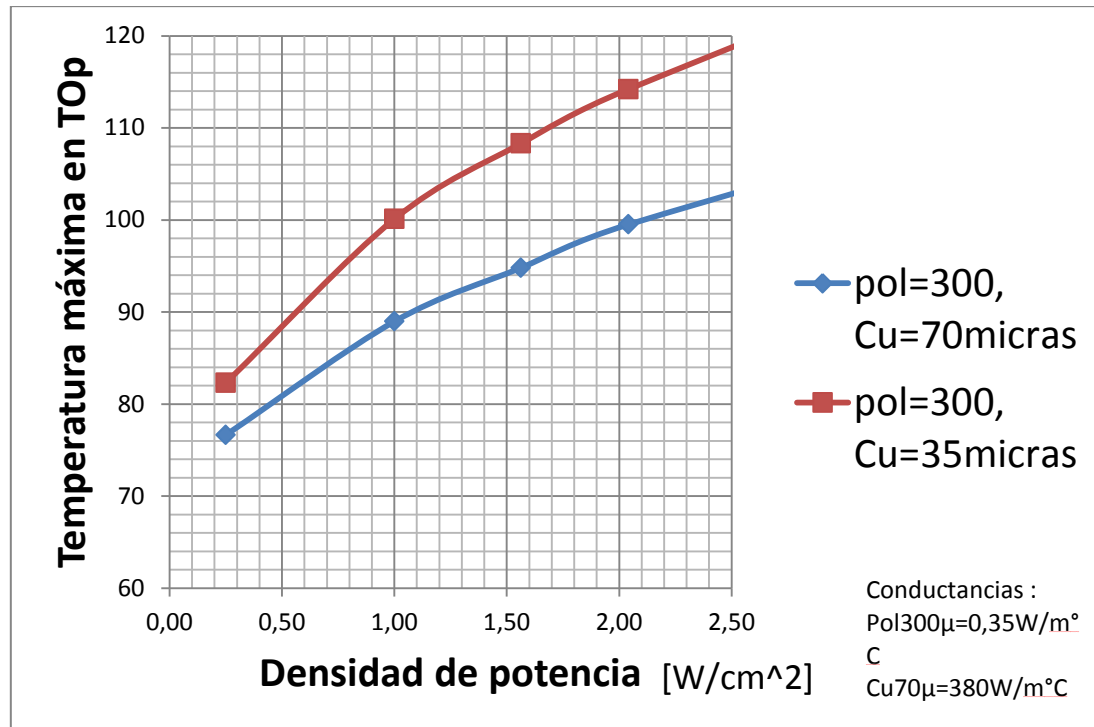


Ilustración 102: Capas de cobre la 2,6, 16y 20, con diferentes espesores de cobre para poliamida=300micras. Fuente: Elaboración Propia.

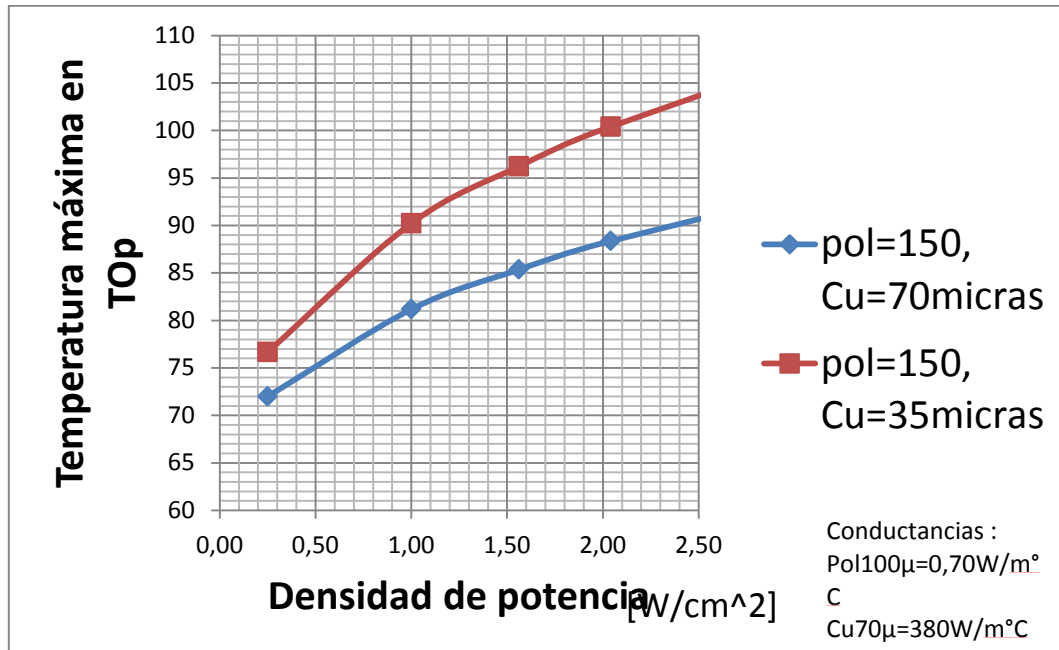


Ilustración 103: Capas de cobre la 2,6, 16y 20, con diferentes espesores de cobre para poliamida=150micras. Fuente: Elaboración Propia.

8.3.3 ANÁLISIS 3:

La variación del estudio 3 frente al estudio 2, es la unión con el exterior. En este caso es solo uno de los lados el que está conectado al rigidizador, por lo que empeora la disipación de calor aumentando la temperatura en los puntos de los puntos de la superficie del PCB. Imagen

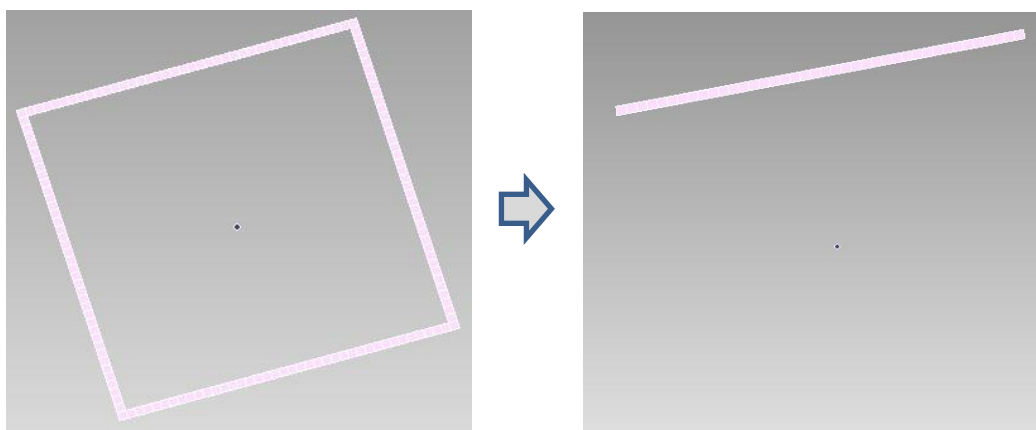


Ilustración 104: en la ilustración de la izquierda se muestra la unión con el ambiente de los estudios 1 y 2, y a la derecha la unión por un único lado estudio 3. Fuente: FEMAP.

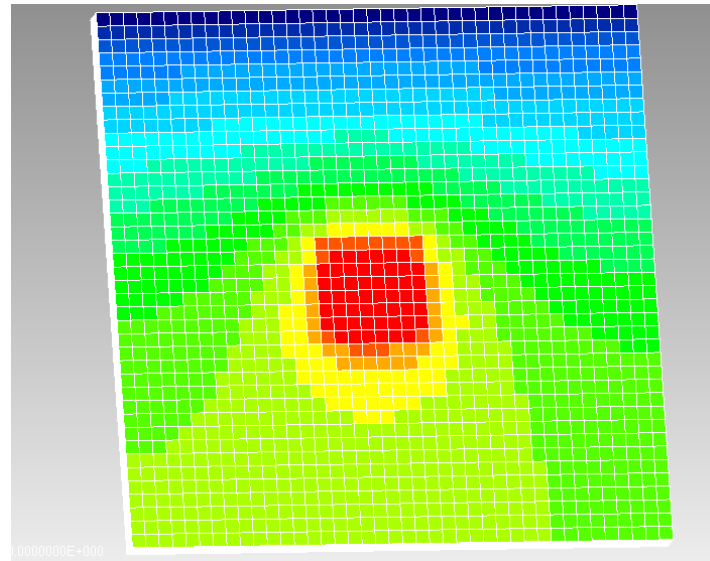


Ilustración 105: ejemplo de mapa de temperaturas para densidad de potencia de $1W/m^2$. Fuente: Elaboración propia, FEMAP.

En la ilustración **105** se observa a simple vista si es comparada con la ilustración del estudio 2, como el mapa de temperaturas ya no es simétrico sino que las temperaturas más altas se desplazan hacia el lado opuesto del foco frío.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del estudio de este análisis:

Poliamida=300 micras						
Cu=70micras						
	filas	elementos	cm ²	Potencia [W]	Densidad W/cm ²	Temp máx en TOP con un solo lado conectado a 60°C
CASOJ	7	49	1,96	4	2,04	132,2



CASOK	8	64	2,56	4	1,56	127,5
CASOL	10	100	4	4	1,00	121,6
CASOM	20	400	16	4	0,25	105,4
Cu=35micras						
	filas	elementos	cm ²	Potencia [W]	Densidad W/cm ²	Temp máx en TOP con un solo lado conectado a 60°C
CASOJ2	7	49	1,96	4	2,04	159,4
CASOK2	8	64	2,56	4	1,56	152,7
CASOL2	10	100	4	4	1,00	144,4
CASOM2	20	400	16	4	0,25	125,2

Tabla 24: Resultados análisis 3. Fuente Elaboración propia.

Poliamida=150 micras



Para espesor de Cu=70micras

	filas	elementos	cm ²	Potencia [W]	Densidad W/cm ²	Temp máx en TOP con un solo lado conectado a 60°C
CASO R	7	49	1,96	4	2,04	112,6
CASO S	8	64	2,56	4	1,56	109,6
CASO T	10	100	4	4	1,00	105,4
CASO U	20	400	16	4	0,25	95,41

Para espesor de Cu=35micras

	filas	elementos	cm ²	Potencia [W]	Densidad W/cm ²	Temp máx en TOP con un solo lado conectado a 60°C
CASO R2	7	49	1,96	4	2,04	135,9
CASO S2	8	64	2,56	4	1,56	130,8
CASO T2	10	100	4	4	1,00	124,7
CASO U2	20	400	16	4	0,25	109,7

Tabla 25: continuación tabla 24

Y las gráficas en su zona de interés.

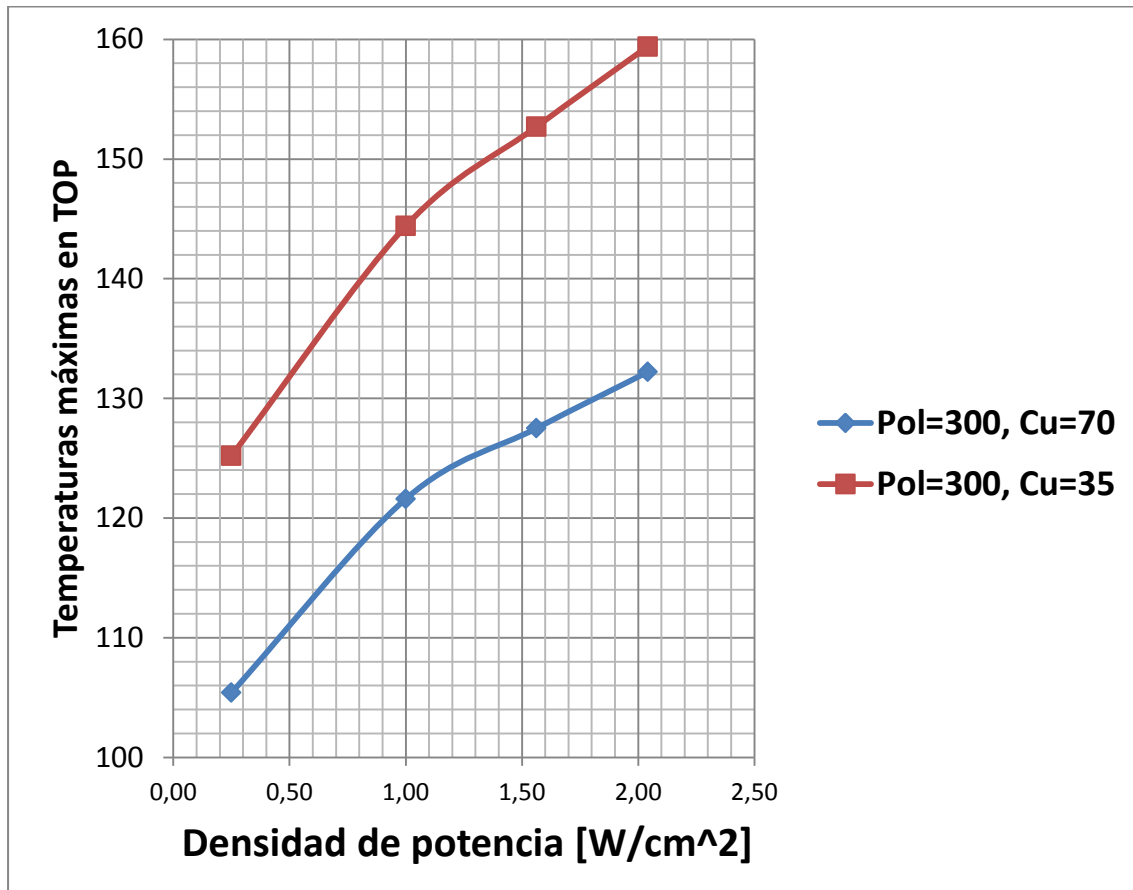


Ilustración 106: Capas de cobre la 2,6, 16y 20, con diferentes espesores de cobre para poliamida=3000micras. Fuente: Elaboración Propia.

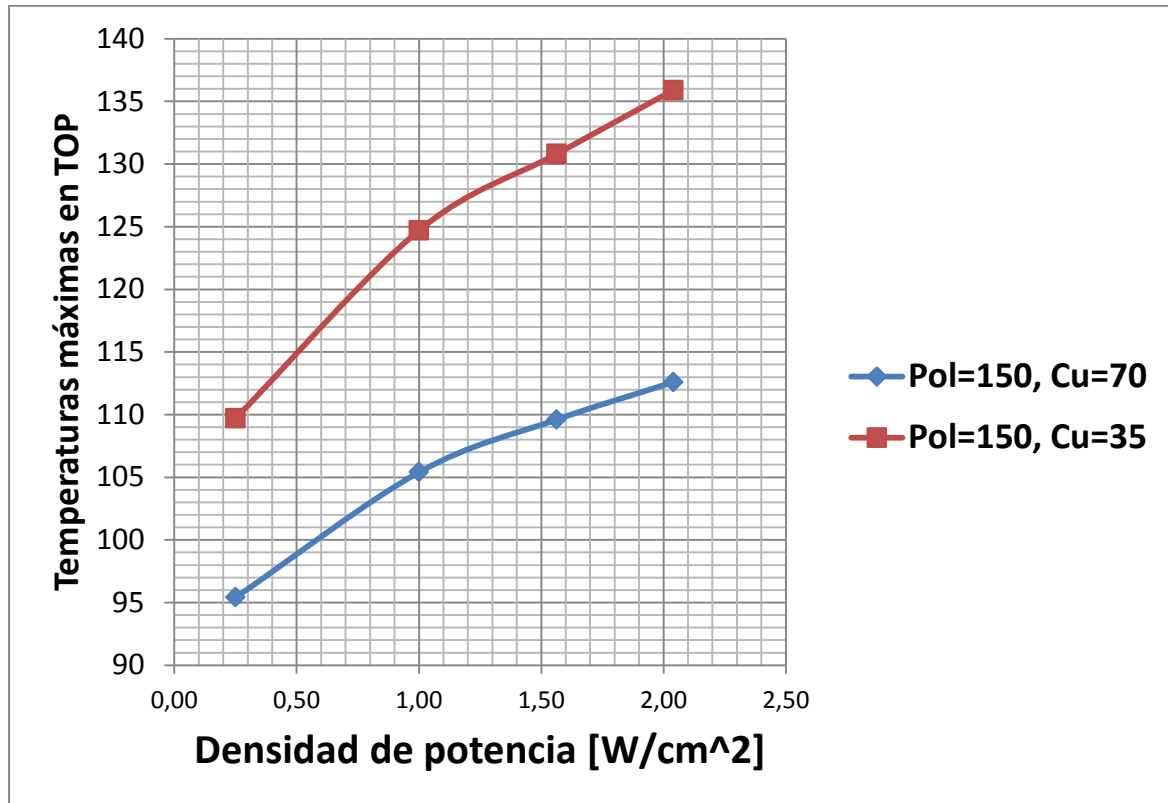


Ilustración 107: Capas de cobre la 2,6, 16y 20, con diferentes espesores de cobre para poliamida=150micras. Fuente: Elaboración Propia.

8.4 CONCLUSIONES

Con estas gráficas obtenidas y con la linealidad del modelado respecto a la temperatura ambiente, es decir, valorando el gradiente térmico en este caso desde 60°C, y trasladándolo a la nueva temperatura de ambiente correspondiente a cada caso, se puede tener una visión bastante aproximada del gradiente que se producirá en el modelo con una densidad de potencia determinada llevando a cabo un análisis de la precisión que se requiere para realizar el modelo térmico, e incluso evitando modelar pequeños componentes con el ahorro que eso conlleva en tiempo y dinero.

Por el momento éstas han sido las configuraciones típicas realizadas, no obstante existen muchas más configuraciones y se debería valorar si en un futuro se deben ampliar estas gráficas con más casos.

Con este capítulo se terminan los análisis que han servido para ilustrar las soluciones planteadas para mejorar las prestaciones de los equipos electrónicos tratando de mejorar



la disipación de calor de los componentes, la transmisión de calor a través de las juntas o en el diseño de los mismos de acuerdo con el principal objetivo del Proyecto. Con ello queda finalizada la parte de cálculo del presente Proyecto.



Capítulo 9 CONCLUSIONES.

9.1 DESARROLLO DEL PROYECTO

Durante muchos años la industria electrónica se ha esforzado por mejorar la fiabilidad de los sistemas electrónicos reduciendo las temperaturas de operación y las temperaturas de las uniones de los componentes. Durante el mismo periodo de tiempo ha habido una fuerte tendencia también a reducir el tamaño y coste de estos montajes electrónicos.

A lo largo de este proyecto se han analizado tres casos de posibles soluciones para mejorar las prestaciones de estos equipos electrónicos tratando de mejorar la disipación de calor de los componentes, la transmisión de calor a través de las juntas o en el diseño de los mismos.

Durante el primer caso de estudio se analizó la utilización de un nuevo adhesivo que mejoraría las conductancias térmicas entre diversos componentes y el PCB o la placa base en la que estuviesen colocados, en este primer caso se tomó contacto con el software FEMAP y TMG propiedad de MAYA que acompañaría todo el proyecto. Con el Método de los Elementos Finitos (MEF) y mediante estudios en el laboratorio exigidos por el plan de validación, se realizó un modelo térmico del adhesivo montado junto con una serie de radiadores aislados y no aislados, obteniendo mediante correlación la conductancia de contacto, que era una incógnita que plantaba la necesidad del modelado en MEF.

Posteriormente, una vez terminado el plan de validación exigido por AIRBUS para estos componentes y obtenida la conductancia de contacto, se dio por finalizado este caso de estudio.

Durante la realización de este modelo se vio la necesidad de crear una herramienta a medida para las correlaciones que se estaban realizando, la forma de comparar los modelos entre sí para adaptar las propiedades a las temperaturas dadas por el laboratorio, realimentando los modelos, así que, ante la dificultad de efectuar de forma eficaz estas



correlaciones se procedió a la realización de un programa en Python, un lenguaje de programación en código abierto, para ayudar con la tarea y poder realizar algunos informes sobre los cambios realizados y gráficas donde, visualmente, facilitar la comparativa. Se le denominó KELVIN.

Vistas la utilidad y facilidad de uso de KELVIN, este programa se fue ampliando según requería el caso 2. El segundo caso de estudio ya no era un modelo en dos dimensiones como el utilizado para valorar el adhesivo sino que era un modelo tridimensional mucho más complejo. Se adaptó KELVIN de acuerdo a estas necesidades.

En este segundo caso de estudio se realizó otro modelo térmico para analizar si la utilización de una abrazadera mejoraría la conductancia de contacto de forma notable en los componentes de tipo transistor. Después de un estudio en el laboratorio y un modelo térmico, se realizó una valoración de su peso, el cual podría perjudicar en caso de ser excesivo a todo sistema, con respecto a sus ventajas de posible mejora de la conductancia de contacto.

A continuación se realizó un estudio de sensibilidad con diferentes configuraciones típicas utilizadas en PCB, con diversos espesores y uniones con el ambiente, para crear una herramienta de representación de fácil visualización que ayude al ingeniero a valorar la importancia de un modelado detallado y preciso frente a uno más general.

Se elaboraron una serie de gráficas donde se representaban los gradientes térmicos en el eje de abscisas frente a densidades de potencia típicas en el eje de ordenadas.

Es decir, conociendo la temperatura ambiente aproximada o crítica requerida por el proyecto, y la densidad de potencia dada por los diseñadores del sistema, el ingeniero es capaz de valorar si su modelo es crítico por la proximidad al rango límite de temperaturas dadas por el sistema global, o por el contrario se encuentra lejos de estas temperaturas críticas y el modelado puede ser más general y menos preciso.

Con ello es posible ahorrar gran cantidad de tiempo y dinero invertido en estos modelos.

Por último, se ha llevado a cabo un análisis del presupuesto empleado para la realización del proyecto.

9.2 CONCLUSIONES GENERALES

Las conclusiones respectivas al primer caso de estudio fueron,



- La conductancia de contacto resultó ser del orden de $1500 \text{ W/m}^2\text{K}$, lo que es aceptable para el tipo de adhesivo estudiado. es un resultado que entra dentro de los márgenes esperados
- El adhesivo no generó ningún tipo de problema o fallo durante las pruebas de ensayo realizadas. Se comprueba porque los rangos de temperatura entran dentro de los márgenes esperables.
- El adhesivo permaneció en perfectas condiciones al finalizar las pruebas, con plena funcionalidad.

Por lo tanto, el adhesivo queda aceptado para su uso en vuelo después de comprobar que cumple con el plan de validación exigido por la AIRBUS y que su conductancia de contacto es aceptable para su uso.

Con respecto al programa en Python, denominado KELVIN, realizado a medida como herramienta de ayuda,

- Ayuda a la correlación de modelos térmicos
- Es flexible, puede ser utilizado en cualquier tipo de modelo.
- Puede evolucionar, se pueden añadir otros módulos si se requieren nuevas características.
- Genera informes y gráficas sencillas fáciles de interpretar.

El programa cumple con los objetivos requeridos, es decir facilita la correlación de modelos, es una herramienta de uso sencillo y seguirá siendo usada por el Departamento de Diseño Mecánico y Físico de Airbus.

En el caso de estudio de la abrazadera se concluyó que:

- Debido al montaje utilizado con el adhesivo Cho-Therm como elemento de unión entre el transistor y el PCB, y que la característica del mismo de presión frente a conductancia de contacto no es estrictamente creciente, se observa que no se mejora la conductancia de contacto.
- La abrazadera Tiene un peso demasiado elevado para la función que realiza.

Se rechazó su uso, en estos montajes por no suponer una mejora notable de la conductancia de contacto, y añadir un peso excesivo.

Por otra parte, en el caso de estudio de al análisis de temperaturas en PCB, se llegó a las siguientes conclusiones:



- Las gráficas obtenidas permiten valorar de forma rápida y sencilla, la cercanía a los límites de temperatura planteados por los requerimientos técnicos y especificaciones definidas por AIRBUS para un proyecto.
- Facilita la decisión de la precisión requerida por el modelo.
- Por el momento, las configuraciones son limitadas, se deberían estudiar más casos.

Queda demostrado que las gráficas son útiles para la función por la que se plantearon, no obstante son limitadas respecto a variedad de configuraciones, actualmente están siendo utilizadas por el Departamento de Diseño Físico y Térmico de AIRBUS la empresa, con ellas se puede valorar a priori el riesgo de varios proyectos.

Respecto a los objetivos generales planteados por el proyecto, se puede afirmar que se han adquirido los conceptos necesarios para la modelización física y en elementos finitos de equipos electrónicos, y las capacidades para realizar ensayos en el laboratorio y poder realimentarlos valorando su precisión y validez.

Se han llevado a cabo los estudios previstos, y se demuestra el manejo experto de las aplicaciones de FEMAP y TMG.

Se puede afirmar categóricamente que para la realización de los modelos desarrollados durante este Proyecto, el mejor método a utilizar por la precisión requerida, el tamaño de los componentes, y la gran cantidad de nodos y elementos, es el Método de los Elementos Finitos (MEF). Se puede afirmar también que no habría diferencia en sustituir FEMAP por IDEAS otra herramienta de análisis térmico, ya que son muy similares, y en ambos se pueden exportar los modelos en un formato universal y reutilizarlos.

Con respecto al presupuesto requerido, se considera que es adecuado para este Proyecto, y que el ahorro planteado con las soluciones propuestas lo hace totalmente rentable.

9.3 POSIBLES DESARROLLOS FUTUROS

La realización de este Proyecto nos ha permitido profundizar en las líneas de investigación de soluciones térmicas de la compañía, y de esta forma, es posible apuntar unas vías en las que se podrían desarrollar futuras investigaciones al respecto.

En concreto, a nuestro juicio, sería de gran interés:



- Continuar con el estudio de la abrazadera para proyectos con otros métodos de unión de los transistores al PCB que no incluyan el Cho-Therm, de esta forma quedaría totalmente valorada la pieza, y sus posibles utilizaciones.
- Continuar ampliando las gráficas de estudios térmicos de configuraciones típicas del PCB, configurando una biblioteca más amplia viendo que es una herramienta útil.

Por otra parte, aunque trasciende el ámbito del Proyecto, es de gran interés el modelado y mallado de los componentes más utilizados en los proyectos recurrentes llevados a cabo por esta empresa continuamente. De esta forma se ahorraría la creación de la geometría completa del modelo y se utiliza un método más eficaz mediante importación de parte de la geometría y adaptación de la misma a las condiciones requeridas. Probablemente se comience con esta propuesta este mismo año.

Además, sería interesante realizar una comparativa cuantitativa de las diferentes herramientas que existen para los estudios térmicos y en concreto, de las siguientes:

- a) IDEAS / TMG
- b) ANSYS
- c) FEMAP / TMG
- d) ESATAN TS / ESARAD
- e) ESATAN TMS
- f) SINDA
- g) THERMICA

La complejidad requerida por los modelos en términos de cantidad de nodos y elementos depende de los resultados esperados, y de la geometría a modelar. No obstante, sería interesante intentar optimizar el uso de estas herramientas verificando donde está el punto de inflexión en cuanto a precisión y fiabilidad que permite elegir entre unas y otras.

A este respecto y para finalizar, se ha elaborado la siguiente tabla, en la que, a modo de conclusión final se muestra un breve resumen de las ventajas y desventajas de las diferentes herramientas desde el punto de vista de una unidad electrónica.





Capítulo 10 VALORACIÓN ECONÓMICA.

10.1 VALORACIÓN ECONÓMICA

Para la realización de este Proyecto, se ha realizado la siguiente valoración económica, teniendo en cuenta los siguientes bloques de costes:

- Recursos humanos.
- Recursos informáticos.
- Gastos en materiales y componentes.

A continuación se procede a detallar cada uno de los costes y áreas afectadas:

10.1.1 RECURSOS HUMANOS

El proyecto ha sido realizado por un Ingeniero Industrial, asumirá diversos papeles a lo largo del mismo, siendo técnico de sala cuando lo requiera, y suponiéndose en un cargo de administración en lo referido al tiempo de redacción de este Proyecto.

Se considera también el gasto producido por el personal de gestión de compras

Los costes humanos ascienden a una cantidad moderada para un proyecto de esta índole. Más detalladamente se pueden obtener los siguientes datos:

	Horas trabajadas	Coste/hora	Coste acumulado
Ingeniero Industrial.	200 horas	40€/h	8000€



Técnico de sala.	50 horas	32€/h	1600€
Cargo administrativo.	35 horas	20€/h	700€
Personal de gestión de compras	6 horas	30€/h	180€
TOTAL			10480€

Tabla 26: Costes recursos humanos. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se hace un desglose de los costes en relación a las horas trabajadas.

Por un lado se desglosa la labor realizada como ingeniero industrial, por otro su rol de técnico de sala, a parte se consideran los gastos de la gestión de compras y por último los costes incurridos en la redacción de este documento como cargo administrativo. El coste total en mano de obra para este proyecto es de 10480€ para un total de 291 horas trabajadas.

10.1.2 RECURSOS INFORMATICOS

Un gasto importante de este proyecto es en licencias, los programas de modelado son programas caros que requieren mantenimiento, normalmente se paga una licencia y a lo largo de los años se mantiene un alquiler de aproximadamente el 25% del pago inicial por mantenimiento. Se debe tener en cuenta que estas licencias son utilizadas simultáneamente por numerosos proyectos por lo que se considerara un uso del 20% del total de una licencia durante este año, ya que esa ha sido la duración aproximada del proyecto.

Los gastos incurridos en este bloque son:



LICENCIAS	Porcentaje de uso	Pago Inicial	Pago anual por mantenimiento
FEMAP	30%	11500€	2875€
TMG	15%	12000€	3000€
TOTAL		23500€	5875€

Tabla 27: Costes recursos informáticos. Fuente elaboración propia.

Para el cálculo del gasto incurrido en licencias, se considera que, la licencia de un programa es un inmovilizado intangible cuenta 206, que se amortiza al 33% máximo o a 6 años (min), al debe de cuenta 680 por la dotación anual, abonando en cuenta 2806.

Por otro lado, el mantenimiento del programa es un gasto imputable al periodo que cubre.

En este caso se consideran amortizados ambas licencias por contar con más de 6 años contratadas, por lo que solo computabilizaremos para este proyecto el gasto incurrido en el pago anual de mantenimiento.

Teniendo en cuenta el porcentaje de uso, es decir la siguiente tabla:

LICENCIAS	Porcentaje de uso	Pago anual
FEMAP	30%	862.5€
TMG	15%	450€
TOTAL		1312,5€

Tabla 28: Costes recursos informáticos. Fuente elaboración propia.



10.1.3 GASTOS EN MATERIALES Y COMPONENTES.

A continuación se presenta una tabla con los gastos incurridos en materiales para los ensayos en el laboratorio, el gasto más destacable es el de utilización de la cámara de vacío, donde cada día de utilización es un coste de 3000€, contando con que debe haber 3 turnos de técnicos de sala, para mantenerla las 24 horas funcionando, ya computando en el apartado de recursos humanos.

Se dividirán los gastos en 2 cuadros según los casos de estudio.

Para la calificación del adhesivo se incurrió en los siguientes gastos:

COMPONENTE	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€)	TOTAL (€)
Radiador	9	50	450
Adhesivo en cinta	0,3	200	60
Placa aluminio	de 1	150	150
Calas aluminio	de 9	40	36
Adhesivo estructural	0,1	300	30
Alquiler cámara de vacío	1 día	3000	3000
TOTAL			3726

Tabla 29: Costes materiales y maquinaria. Fuente: Elaboración propia.

Se utilizaron radiadores comerciales, no certificados para vuelo, ya que son más baratos y no afectaban para la valoración del adhesivo

Para el estudio de la abrazadera se incurrió en los siguientes gastos:

COMPONENTE	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€)	TOTAL (€)
Placa de aluminio	1	150	150
transistor	30	15	450
Adhesivo Therm	Cho- 0,3	400	120
Abrazadera aluminio	de 2	30	60
TOTAL			900

Tabla 30: Costes materiales y maquinaria 2. Fuente: Elaboración propia,

Se utilizaron transistores de vuelo pero sin control de calidad, lo que reducía su precio de 350€ a 15 aproximadamente, estos transistores fueron enviados por el fabricante para diversos ensayos, no pudiendo ser utilizados en vuelo por no haber realizado el control de calidad requerido.

10.2 CONCLUSIÓN

El gasto total incluido en este proyecto será la suma de los diversos costes de personal, material, y licencias utilizados.

Este costa asciende a un valor de 16418€, con un total de 291 horas.





Capítulo 11 BIBLIOGRAFÍA

11.1 NORMATIVA:

CRISA	CRS-SMT-02505	Crisa Processes Identification Document.
European Coordination for Space Standardisation	ECSS-E-30	Part 1A Space engineering - Mechanical — Part 1: Thermal control.
European Coordination for Space Standardisation	ECSS-E-HB-31-01	Space engineering - Thermal design handbook.
European Coordination for Space Standardisation	ECSS-E-HB-31-01	Part 4A: Thermal design part 4: Conductive Heat Transfer.



European Coordination for Space Standardisation	ECSS-E-ST-31C	Space engineering - Thermal control general requirements.
European Coordination for Space Standardisation	ECSS-E-ST-32-03.	Modelos de elementos finitos.
European Coordination for Space Standardisation	ECSS-Q-70B	Materials, mechanical parts and process.
European Coordination for Space Standardisation	ECSS-Q-ST-70-08C	Manual Soldering of High-Reliability Electrical Connections.
Support Technology Programme	STP.0000169	Procedimiento de pegado de radiadores poliamida con 3M 966 sobre aluminio.
Technological Centre	TEC-MF-3004-21-CRS	Manufacturing File.



Steinberg, D.S. Cooling techniques for electronic equipment. Atlanta, 1992.

Yunus A. C. Heat transfer a practical approach. NYC,2006.



Capítulo 12 *AGRADECIMIENTOS*

Agradecimientos

Los resultados de este proyecto, están dedicados a todas aquellas personas que, de alguna forma, son parte de su culminación. Mis sinceros agradecimientos a la empresa CRISA (An Airbus Defence and Space Company) que me ha permitido tener la oportunidad de utilizar todos sus recursos y darme una formación adecuada para conseguir llevar a cabo este Proyecto con éxito, en especial a mi jefe, Jesús Vallega por la flexibilidad que me ha permitido, y al resto del equipo de Diseño Físico y Térmico por su apoyo, y disponibilidad para ayudarme.

Quiero hacer una mención especial a mi director Antonio García y de Garmendia, por su paciencia, su ayuda, y su ojo de halcón para descubrir erratas.

Y no puede faltar el agradecimiento a mi familia, por estar a mi lado las 24 horas del día, ayudando y apoyando al 100%, gracias por creer en mí durante estos largos años de carrera.

No quiero pasar por alto la oportunidad de agradecer a mis profesores todos estos años de formación, que han sido mi base para llegar a lo que soy ahora.

A la oficina de prácticas y empleo de la universidad, que me ha facilitado todos los trámites para la realización de estas prácticas.

Y a mis amigos, por animarme siempre y por ayudarme a superar los retos que me han presentado este Proyecto y la carrera.

