

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ANÁLISIS TÉRMICOS Y DE VIBRACIONES DE UNA UNIDAD DE CONTROL ELECTRÓNICO DE CAMBIO DE NUEVA GENERACIÓN EMERGENTE DEL ESTUDIO DE LA MATRIZ FMEA**

**(ANALISI TERMICHE E VIBRAZIONALI DI UNA  
CENTRALINA CONTROLLO CAMBIO DI NUOVA  
GENERAZIONE DERIVANTI DALLO STUDIO DELLA  
MATRICE FMEA)**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Angulo G,  
Daniela del C.  
Para optar al Título de  
Ingeniera Mecánico

Caracas, 2013

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **ANÁLISIS TÉRMICOS Y DE VIBRACIONES DE UNA UNIDAD DE CONTROL ELECTRÓNICO DE CAMBIO DE NUEVA GENERACIÓN EMERGENTE DEL ESTUDIO DE LA MATRIZ FMEA**

**(ANALISI TERMICHE E VIBRAZIONALI DI UNA  
CENTRALINA CONTROLLO CAMBIO DI NUOVA  
GENERAZIONE DERIVANTI DALLO STUDIO DELLA  
MATRICE FMEA)**

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Andrea Tonoli  
Politecnico di Torino

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Crisanto Villalobos  
Universidad Central de Venezuela

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Angulo G,  
Daniela del C.  
Para optar al Título de  
Ingeniera Mecánico

Caracas, 2013

**Daniela del Carmen Angulo González**

**ANÁLISIS TÉRMICOS Y DE VIBRACIONES DE UNA UNIDAD DE CONTROL  
ELECTRÓNICO DE CAMBIO DE NUEVA GENERACIÓN EMERGENTE DEL  
ESTUDIO DE LA MATRIZ FMEA**

**Tutor académico: Dr. Crisanto Villalobos**

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2013,163pp.**

**Palabras clave:** método de los elementos finitos, caja de cambio robotizada, ANSYS, Flotherm, Análisis térmico, análisis de vibraciones, FMEA.

**Resumen.** Este trabajo presenta el estudio térmico y de vibraciones a través de programas computacionales de cálculo realizados a una unidad de control electrónico de nueva generación para cajas de cambio robotizadas. El trabajo fue desarrollado en la empresa Magneti Marelli Spa. (Torino, Italia) en colaboración con el Politecnico di Torino.

En la fase de diseño de la unidad de control se ha realizado un análisis de modos y efectos de fallas (FMEA) que ayudó a evidenciar posibles problemas que esta podría presentar durante de su funcionamiento. Para verificar que estos modos de fallas no representaran un riesgo para el cliente final del producto, se han realizados análisis computacionales, reduciendo así los costos y el tiempo del diseño.

Para realizar los análisis se han utilizado dos software, ANSYS y FloTherm, para los análisis estructurales y térmicos respectivamente. Para llevar a cabo dichos análisis se tomaron en consideración la especificaciones del cliente, tales como perfil de vibraciones y condiciones ambientales en las cuales la unidad de control debe trabajar.

Los resultados obtenidos mediante la utilización de los modelos matemáticos fueron comparados con los resultados obtenidos experimentalmente, con el fin de verificar que el modelo creado era aproximado al real, evidenciado así que esto datos son coherentes a los del modelo real y contribuyendo así a las mejoras del diseño.

## RESUMEN

### Introducción

La transmisión manual automatizada (AMT) de la empresa Magneti Marelli es una tecnología de automatización electro-hidráulica de la caja de cambios manual que combina la facilidad de uso, la reducción del consumo de combustible y emisiones siendo adaptable a cualquier transmisión, donde los costos de producción son más bajos que para las transmisiones automáticas convencionales.

El AMT se basa en una unidad de control electrónico y la implementación de un sistema hidráulico que controlan el uso del embrague y el cambio de velocidades, lo que permite al conductor el cambio de velocidad sin el uso del embrague, ya sea secuencialmente o totalmente automático.

El dispositivo de Magneti Marelli trabajar en la caja de cambios manual de un auto en la misma forma que lo haría el conductor, se encarga de abrir y cerrar el embrague y desconecta los engranajes y cuando sea necesario, también controla la selección del modo de transmisión (cambio de velocidades automático o secuencial).

Los componentes de la unidad hidráulica se encuentran en una sola unidad, suministrado al fabricante del vehículo sellado y listo para ser montado en la caja de cambios. Una vez montado en la transmisión la unidad hidráulica se interconectar mecánicamente con el eje de transmisión de la caja de cambios. El sistema hidráulico permite una mayor velocidad de ejecución y como consecuencia mejora del rendimiento y el confort del coche.

La unidad de control electrónico de la transmisión (TCU) es el corazón y la inteligencia del sistema de control de la transmisión, esta gestiona los cambios de velocidades mediante el control del embrague, la caja de cambios y el motor, teniendo en cuenta las demandas del conductor y las condiciones operativas del vehículo.

Lanzado por Magneti Marelli en 1997, la AMT- Selespeed, a través de un proceso de continua evolución tecnológica ha llegado a la generación "mecatrónica", llamada así porque se integra por primera vez en un único equipo la electrónica de control y el sistema hidráulico para la transmisión, lo que permite mejoras significativas de la actuación, tanto en términos de velocidad de cambio de velocidades tanto la comodidad.

Hasta ahora, el AMT tenía una arquitectura distribuida, el sistema hidráulico se encuentra en el eje de control de la caja de cambios y era dirigido de forma remota por la unidad de control electrónica, a través de una conexión física (cables), que podía estar ubicada debajo del asiento del conductor o en el compartimiento del motor. Con la búsqueda constante de mejoras y ahorros de costos se ha desarrollado el sistema llamado mecatrónico, que integra, en un único complejo sistema electrónico y el sistema hidráulico.

La CFC-400 es el TCU diseñado por Magneti Marelli Powertrain para el nuevo sistema mecatrónico. Esta es una unidad de control que interactúa directamente con el circuito hidráulico del sistema de transmisión, logrando una reducción significativa en el cableado y la facilidad de instalación en el vehículo. El TCU interactúa directamente con los solenoides que controlan la selección, acoplamiento y embrague. El control de la posición, el acoplamiento del embrague y la selección de las velocidades se realiza mediante sensores integrados de tipo "3D hall contacless"



Figura 1. CFC400

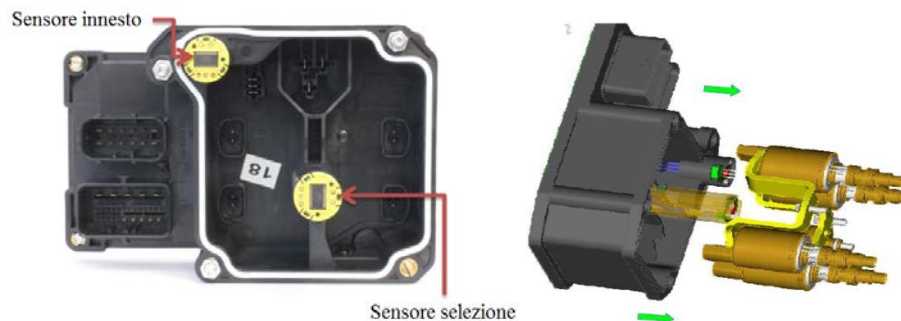


Figura 2. sensores CFC400

Con el nacimiento de este nuevo sistema de AMT, también surgen problemas en el sistema electrónico que no estaban presentes en la arquitectura antigua, como consecuencia de que la unidad trabajara en un entorno caracterizado por altas temperaturas y vibraciones producidas por la transmisión y el motor.

Las vibraciones mecánicas pueden llevar a resonancia a las estructuras que se someten a este tipo de tensiones creando daño no intencional en las mismas, esto lleva a los ingenieros a identificar las frecuencias naturales y los modos de vibración de los cuerpos con el fin de garantizar un funcionamiento correcto.

Basado en las especificaciones y procedimientos previstos por los fabricantes se tendrán que lograr un diseño robusto, teniendo en cuenta los límites de mecánicos y térmicos de los componentes electrónicos de modo que sean capaces de trabajar en condiciones sin causar peligro de rotura y/o apagado repentino (shut down).

Para el adecuado diseño del producto es esencial seguir una serie de pasos que conducen a la obtención de un producto de alta calidad y la optimización de costos. Con esto nace la necesidad de hacer análisis del dispositivo en etapa de diseño a través de programas de cálculo, a fin de reducir tiempo y costos de diseño.

Antes de realizar estos análisis, es necesario identificar todos los modos de falla del proyecto, sus efectos y sus causas, con el fin de identificar los temas críticos y definir las mejoras que se deben introducir para reducir dichos efectos. Para realizar la identificación de los modos de falla manera organizada, se lleva a cabo la metodología de trabajo conocida como “FMEA de proyecto” que permite evaluar los modos, los efectos y la criticidad de la falla

## Objetivo general

Esta tesis de grado tiene como objetivo contribuir al diseño adecuado de la unidad de control electrónico para CFC400 AMT Mecatrónica Magneti Marelli Powertrain destacando a través de análisis térmicos y estructurales los posibles problemas emergidos de la matriz FMEA y proponer las posibles optimizaciones para mejorar el rendimiento funcional, de acuerdo con los parámetros y los costos del proyecto.

## Objetivos Específicos

- Identificar y analizar las especificaciones del cliente, para las condiciones de trabajo para de la CFC400.
- Identificar los posibles modos de falla en alta temperatura y vibración de la unidad de control electrónico a través de la matriz FMEA de la CFC400.
- Identificar las posibles fallas debido a las altas temperaturas a través de simulación térmica.
- Comparar los resultados obtenidos mediante simulación térmica con los obtenidos experimentalmente.
- Proponer mejoras al sistema de refrigeración de la unidad de control electrónico CFC400, derivadas de los resultados obtenidos por simulación térmica.
- Identificar los modos de vibrar del controlador a través de análisis modal y la comparación con los perfiles de vibración suministrados por el cliente.
- Hacer un análisis armónico resultante análisis modal.
- Comparar los resultados obtenidos por análisis vibracional con los obtenidos experimentalmente.
- Proponer las mejoras estructurales en el CFC400, derivadas de los resultados obtenidos por el análisis de vibraciones.

## Metodología de trabajo

La empresa Magneti Marelli emplea las últimas tecnologías integrándolas con la experiencia y los conocimientos adquiridos a lo largo del tiempo.

En particular, dentro del ámbito tridimensional se habla del método de elementos finitos (FEM) y el análisis de elementos finitos (FEA) en el ámbito estructural, magnético, térmico y de los componentes sólidos y de dinámica de fluidos computacional (CFD) en el campo de la mecánica de fluidos.

El principal objetivo de todos estos análisis es obtener información sobre la respuesta de los sistemas físicos bajo condiciones impuestas, comúnmente conocida como cargas y/o condiciones de contorno.

Con el uso generalizado de estas herramientas de análisis el equipo de desarrollo es capaz de verificar si el proyecto propuesto será apto para cumplir con las especificaciones de los clientes antes de que sea un prototipo.

Magneti Marelli utiliza Modelos Matemáticos tanto en la definición del producto, el diseño y el proyecto, como en la etapa de certificación.

Por lo general, en la fase de diseño se realizan una serie de análisis numéricos. Los diseñadores comparan y clasifican proyectos alternativos de acuerdo con los objetivos del cliente. En la fase de certificación se controla que el diseño final cumpla con todos los requisitos definidos.

Para el desarrollo de esta tesis se han llevado a cabo dos tipos de análisis numérico:

Análisis termo-electronicos: a través del software FloTHERM. Este análisis hace permite identificar, dentro de los componentes y estructuras, la distribución de la temperatura y las rutas de transmisión de calor cuando estos están en proximidad a las fuentes de calor.

Análisis de Vibraciones: Usando el ANSYS Workbench. Este análisis permite estimar las características intrínsecas de la vibración de un componente o estructura, análisis modal, respuesta a tensiones armónicas y randomicas.

Definición del tipo de análisis a efectuar derivados del análisis FMEA.

Normalmente, el proceso de diseño se divide en tres fases, prototipo A, B y C. Se puede decir que el Prototipo A es la idea del proyecto, el prototipo B ya es algo físico que satisface con todas las funciones requerida, pero todavía se puede hacer cambios, y el prototipo C es el producto final y es aquel que irá a producción.

Para la parte de análisis del FMEA Mecánica se inició a partir de Proto B a fin de detectar posibles fallas antes de llegar a la construcción del prototipo C.

Los riesgos potenciales asociados con la disipación de la tarjeta electrónica detectados por el análisis FMEA son:

1. El espesor proyectado para el disipador de calor (2,5 mm) no podría asegurar la transferencia eficiente de calor.
2. El graso termoconductor seleccionado no podía asegurar la transferencia de calor eficiente desde el PCB al disipador de calor.

Por otra parte los posibles riesgos asociados a la protección mecánica detectados por el análisis FMEA son:

1. El espesor mínimo del contenedor de la unidad de control podría no proporcionar la protección adecuada para el PCB y el sistema de conexiones.
2. El espesor mínimo del disipador de calor podría no asegurar el correcto sellado de la unidad de control.
3. El espesor de pared de los conectores podría no proporcionar una protección contra grietas.

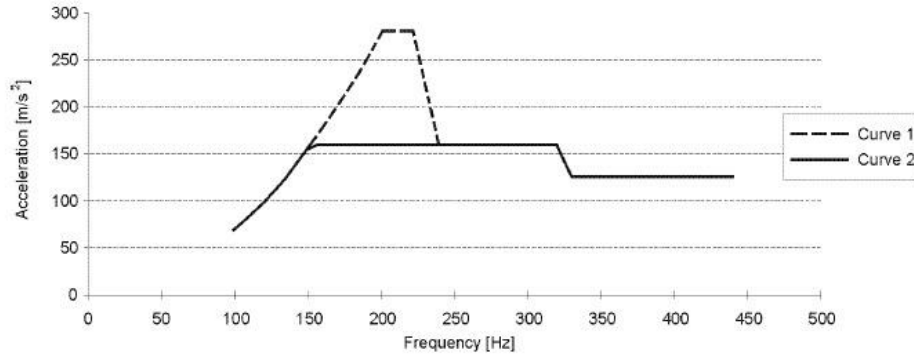
A través del análisis térmico y de vibración y teniendo en cuenta los datos de su proyecto, se podrá detectar si estas nuevas soluciones garantizan el correcto funcionamiento de la unidad de control electrónico.

Especificaciones del cliente.

Las especificaciones de uso y los datos medioambientales a los cuales será expuesta la unidad de control CFC 400 han sido proporcionados por el fabricante:

1. Perfil de temperatura en el cual trabajará la unidad es de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+115\text{ }^{\circ}\text{C}$  con un flujo convectivo a 1 m/s.

2. El perfil de vibración sinusoidal de un cuerpo unido al sistema de motor/transmisión, de acuerdo a la especificación del cliente es GMW3172



Frequency – Hz	Envelope 1		Envelope 2	
	Maximum Displacement – mm	Maximum Acceleration – m/s <sup>2</sup>	Maximum Displacement – mm	Maximum Acceleration – m/s <sup>2</sup>
100	0.177	-	0.177	-
151	-	-	-	160
200	-	280	-	-
220	-	280	-	-
240	-	160	-	-
320	-	160	-	160
340	-	125	-	125
440	-	125	-	125

figura 3. Norma GMW3172.



## Resultados y discusión

### Análisis térmico

- CFC400 Prototipo B

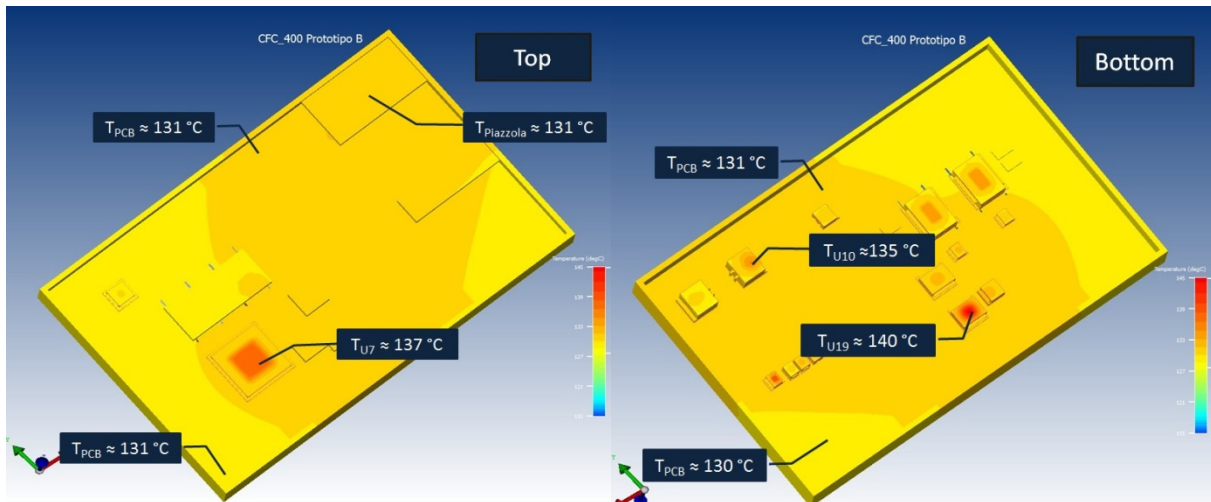


Figura 4. Análisis térmico Proto B

Los resultados obtenidos por simulación para la CFC\_400 proto B fueron compararon con los obtenidos experimentalmente bajo las mismas condiciones,  $T_{amb} = 115\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{conv} = 1\text{ m/s}$  en Y +. Las termocuplas fueron colocadas en los componentes que disipan mayor potencia, el driver de la bomba y fuente de alimentación.

La temperatura más alta obtenido experimentalmente fue la componente de fuente de alimentación,  $142\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Contrastando esta temperatura obtenida en la simulación,  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se observa una diferencia de  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Con este se puede decir que el error del cálculo teórico es menos de 5%, lo que resulta en una excelente aproximación.

- CFC400 Prototipo C

En CFC400 proto C se decidió cambiar algunos de los componentes:

- 1 ° Fuente de alimentación: se h inserido en el mismo componente con un package más amplio para aumentar la superficie de disipación obteniendo una reducción de la densidad de potencia.
- 2 ° los componentes que manejan la bomba, han sido reemplazados con un único dispositivo. Este cambio fue motivado a la simplificación del sistema gracias con posibilidad de eliminar dos condensadores electrolíticos haciendo así una nueva reducción de los costos de producción.
- 3 Se ha definido también la geometría final del disipador.

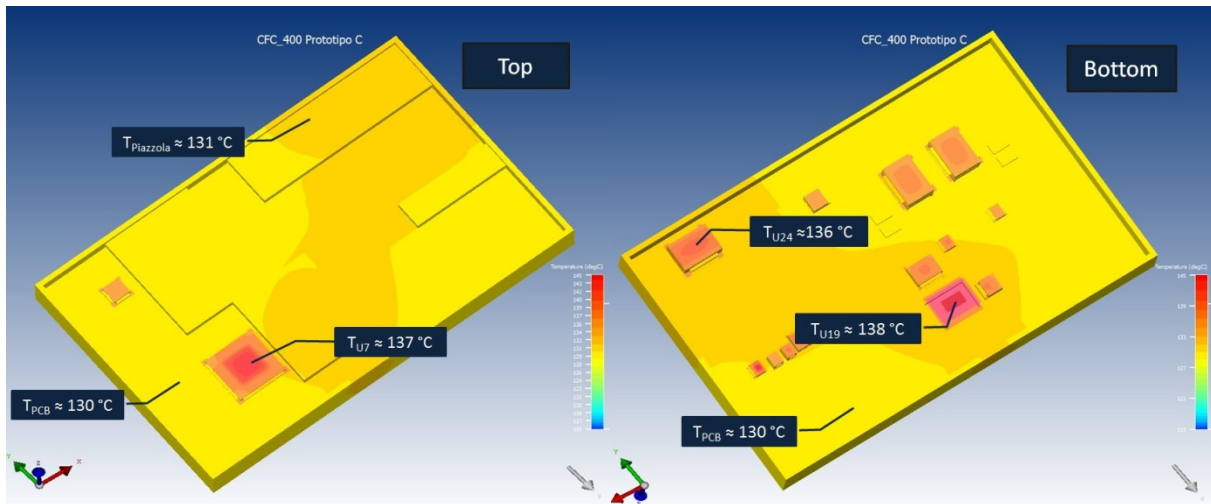


Figura 5. Análisis térmico Proto C

En la simulación con los nuevos dispositivos instalados, se obtiene una reducción de la temperatura del componente de fuente de alimentación a dos grados.

Para el de gestión de la bomba no se observa disminución de la temperatura en contraste con el dispositivo anterior.

Luego de realizar el análisis térmico de los dos prototipos, se obtuvo que los componentes electrónicos del prototipo B entran en el rango de trabajo que asegura un correcto funcionamiento. También hay que destacar que el pequeño margen de seguridad del componente de la fuente de alimentación, puede crear problemas en muy pocos casos. Con la nueva configuración del proto C (con el package del componente de alimentación más amplio y el reemplazo del driver de la bomba) se ha obtenido una reducción adicional de la temperatura a fin de aumentar el margen de seguridad del mismo ( temperatura máxima = 150 ° C).

### El análisis de vibración

- CFC400 Prototipo B (PA66 minerale 40%)

Después de haber llevado a cabo el análisis, se encontró que:

- Análisis Modal

El primer modo de vibrar del cuerpo es a 467 Hz, este se encuentra más allá de la frecuencia máxima especificada por la norma GMW3172 (440 Hz).

A pesar de ello, se decidió ampliar el análisis armónico da 467 Hz debido a los errores de cálculo que puedan producirse por simplificaciones geométricas realizadas en el modelo.

- Análisis armónico

A partir de estos análisis se obtuvo que las tensiones armónicas con la aceleración de 125 m/s<sup>2</sup> a una frecuencia de 467 Hz, crearan en el espaciador de las deformaciones que podrían conducir a daños en la misma.

Es necesario añadir que, a nivel experimental se han llevado a cabo un shock térmico del CFC400 y se han encontrado grietas en el contenedor de plástico.

Debido al pequeño margen que se ha encontrado de la frecuencia de resonancia y los resultados recibidos experimentalmente, se ha aconsejado de cambiar el material del contenedor de la TCU.

- CFC400 Prototipo C (PBT GF30 ASA)

El material elegido para el proto C ha sido el Ultradur® S 4090 G6 ((PBT+ASA)-GF30).

### Análisis Modal

Bajo la mismas condiciones del proto B pero con el nuevo material se ha obtenido que el primer modo de vibrar se encuentra a 752,3 Hz, el segundo a 1200 Hz aproximadamente y un tercero a 1696 Hz.

Se observa que el primer modo de vibrar con el PBT GF30 ASA no se encuentra dentro del rango de vibración de un cuerpo vinculado al sistema motor / transmisión de acuerdo con la norma GMW3172 (100-440 Hz), por lo que se evita llevar a cabo la armónica analiza a estas frecuencias.

Se han llevado a cabo ensayos experimentales del CFC400 y se puede evidenciar en la figura 6, que los resultados obtenidos a través de la simulación son comparables a aquellos obtenidos experimentalmente.

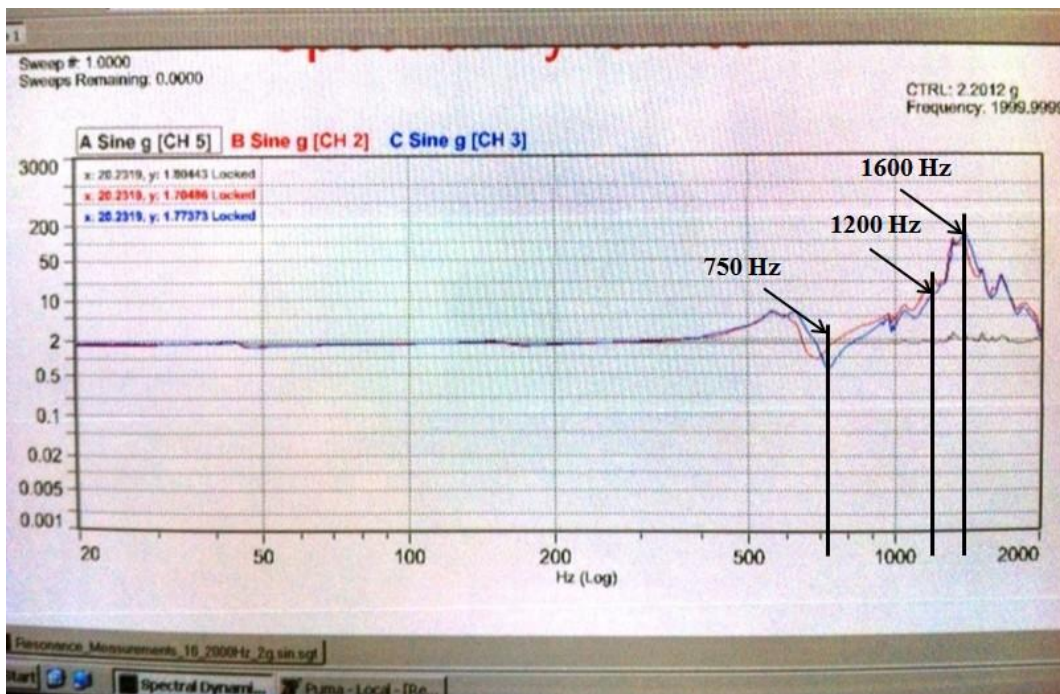


Figura 6. Resultados experimentales CFC400 proto C

## **Conclusiones**

Mediante los análisis térmicos y de vibración que se han llevado a cabo ha sido posible anticipar cualquier posible fallo que pudiera comprometer el proyecto, reduciendo así el tiempo y los costos debido a la implementación de prototipos y banco de pruebas.

A través de los análisis térmicos se encontró que las temperaturas de trabajo están dentro de los valores máximos para el uso de los componentes, asegurando su correcto funcionamiento. Así como también aumentando el margen de seguridad y la vida útil de los componentes, debido a la reducción de la temperatura entre prototipo B y el prototipo C.

Al realizar el análisis modal con el nuevo material (PBT GF30 ASA), se encontró tanto experimentalmente como a través de simulaciones que el material final para la construcción de CFC400 cumple con las necesidades del cliente.

Se puede concluir que los prototipos construidos mediante utilización del análisis de los modelos matemáticos, tanto para el análisis térmico como vibracionales son coherentes con los resultados medidos durante las pruebas experimentales, contribuyendo de esta manera a aportar mejoras de diseño en la fase diseño, disminuyendo el tiempo y costo en fases próximas a la construcción, proporcionando así confiabilidad y seguridad al producto final.

POLITECNICO DI TORINO

III Facoltà di Ingegneria

Corso di laurea in Ingegneria Meccatronica

Tesi di laurea magistrale

ANALISI TERMICHE E VIBRAZIONALI DI UNA  
CENTRALINA CONTROLLO CAMBIO DI NUOVA  
GENERAZIONE DERIVANTI DALLO STUDIO DELLA  
MATRICE FMEA



Relatore accademico:  
Prof. Andrea Tonoli.

Candidato:  
Daniela Del Carmen Angulo González.  
Matricola: 171749

Relatore aziendale:  
Ing. Gianfranco Lo Rito.

Luglio 2013

*Alla mia famiglia*

# INDICE

---

INDICE DELLE FIGURE.....	1
INDICE DELLE TABELLE .....	3
GLOSSARIO .....	4
INTRODUZIONE .....	6
Motivazione .....	6
Obiettivo generale .....	8
Obbiettivi specifici.....	8
Metodologia di lavoro.....	9
Struttura della tesi .....	11
CAPITOLO I .....	13
MAGNETI MARELLI .....	13
1.1 Magneti Marelli.....	13
1.2 Aree di business .....	15
1.2 Magneti Marelli Powertrain .....	18
CAPITOLO II.....	21
TRASMISSIONI ROBOTIZZATE MAGNETI MARELLI.....	21
2.1 Cambi robotizzati.....	21
2.2 Configurazioni .....	22
2.3 Unità di Controllo Elettronico della Trasmissione (AMT ECU) .....	23
2.3.1 AMT TCU CFC3xx .....	24
2.3.2 AMT TCU CFC32x .....	25
2.3.3 AMT TCU CFC300x .....	26
2.3.4 AMT TCU CFC400 .....	27
CAPITOLO III.....	30
FMEA .....	30
3.1 Definizione.....	30
3.2 Organizzazione della FMEA.....	31

3.3 Tipi di FMEA.....	32
3.4 FMEA di progetto .....	33
<b>CAPITOLO IV .....</b>	<b>36</b>
<b>TRASMISSIONE DEL CALORE NEI DISPOSITIVI ELETTRONICI.....</b>	<b>36</b>
4.1 Guasti in dispositivi elettronici associati alla temperatura.....	36
4.1.1 Guasti meccanici .....	36
4.1.2 Guasti corrosivi.....	39
4.1.3 Guasti elettrici .....	39
4.2 Modalità di scambio termico.....	41
4.2.1 Conduzione .....	42
4.2.2 Convezione.....	44
4.2.3 Irraggiamento .....	46
4.2.4 Resistenza termica.....	48
4.3 Tecnologie per il raffreddamento di sistemi elettronici. ....	50
4.3.1 Resistenza termica di contatto e materiali termoconduttivi d'interfaccia. ....	50
4.3.2 Resistenza termica di diffusione .....	54
4.3.3 Alette di raffreddamento .....	56
4.3.4 Circuiti stampati.....	61
4.3.5 Thermal vias.....	63
<b>CAPITOLO V .....</b>	<b>65</b>
<b>VIBRAZIONE DI UN SISTEMI AD N GRADI DI LIBERTÀ .....</b>	<b>65</b>
5.1 Analisi modale .....	65
5.2 Oscillazioni forzate con eccitazione armonica.....	71
<b>CAPITOLO VI .....</b>	<b>72</b>
<b>METODO AD ELEMENTI FINITI .....</b>	<b>72</b>
6.1 Metodo ad Elementi Finiti .....	72
6.1.1 Modellazione della geometria .....	73
6.1.2 Meshing.....	73
6.1.3 Specificazione delle proprietà del materiale .....	74
6.1.4 Specificazione delle condizioni di contorno, condizioni iniziali e sollecitazioni .	74
6.2.Simulazione.....	74
6.2.1 Sistema de equazione discreto.....	74



6.2.2 Risolutore di equazioni .....	75
CAPITOLO VII .....	76
DEFINIZIONE DELLE TIPOLOGIE DI ANALISI DA EFFETTUARE DERIVANTI DALLA MATRICE DI FMEA .....	76
CAPITOLO VIII .....	80
ANALISI TERMICA .....	80
8.1 FloTHERM .....	80
8.2 Albero di progetto in FloTHERM .....	84
8.2.1 Definizione della geometria .....	85
8.2.2 Condizioni per l'analisi del CFC 400 .....	88
8.3 Analisi termica CFC400 PROTO B .....	90
8.3.1 Geometria semplificata PROTO B .....	91
8.3.2 Potenza dissipata per componente .....	92
8.3.3 Risultati ed analisi .....	93
8.4 Analisi termica CFC400 PROTO C .....	96
8.4.1 Geometria semplificata PROTO C .....	97
8.4.2 Potenza dissipata per componente .....	98
8.4.3 Risultati ed analisi .....	99
CAPITOLO IX .....	103
ANALISI VIBRAZIONALI .....	103
9.1 ANSYS Workbench .....	103
9.1.1 L'analisi strutturale con ANSYS Workbench .....	104
9.2 Analisi modale e vibrazionale CFC400 Proto C .....	106
9.2.1 Schema di progetto per CFC400 Proto C in ANSYS Workbench .....	107
9.2.2 Materiali (Engineering Data) .....	107
9.2.3 Albero di progetto per CFC400 Proto C in ANSYS Workbench .....	108
9.2.4 Geometria del CFC400 Proto C .....	108
9.2.5 Contatti .....	111
9.2.6 Mesh CFC400 Proto C .....	113
9.3 Analisi modale (PA66 minerale 40%) .....	116
Risultati dall'analisi modale .....	117
9.4 Risposta armonica (PA66 minerale 40%) .....	118
9.4.1 Risposta armonica in X .....	119

9.4.2 Risposta armonica in Y .....	120
9.4.3 Risposta armonica in Z.....	121
9.5 Analisi dei risultati (PA66 minerale 40%).....	122
9.6 Analisi modale e vibrazionale CFC400 Proto C. con PBT ASA-GF30.....	123
9.7 Analisi modale PBT ASA GF30 .....	123
CONCLUSIONI .....	125
Appendice A .....	127
Derivazione delle equazioni ai volumi finiti.....	127
Appendice B .....	130
Valutazione termica PCB CFC400 PROTO B.....	130
Appendice C .....	143
Thermal Shock CFC400 (PA66 mineral 40%) .....	143
Appendice D .....	145
Analisi FMEA CFC400 .....	145
BIBLIOGRAFIA .....	159
SITOGRAFIA.....	161

## INDICE DELLE FIGURE

---

Figura 1.1 Presenza della MM nel mondo .....	13
Figura 1.2 Contributo sul fatturato fornito da ciascuna area di business.....	15
Figura 1.3. Presenza della MM PWT nel mondo .....	18
Figura 2.1. Configurazione XY .....	22
Figura 2.2. Configurazione S-CAM .....	22
Figura 2.3. Configurazione FLEX S-CAM .....	22
Figura 2.4. Configurazione LSC.....	23
Figura 2.5. Configurazione Mechatronic .....	23
Figura 2.6. AMT TCU CFC3xx.....	24
Figura 2.7. AMT TCU CFC32x.....	25
Figura 2.8. AMT TCU CFC300x.....	26
Figura 2.9. CFC400 .....	27
Figura 2.10. CFC400 più kit idraulico.....	27
Figura 2.11. Montaggio Corpo valvola CFC400 .....	28
Figura 2.12. Corpo valvola CFC400.....	28
Figura 2.13. sensori CFC 400 .....	29
Figura 3.1. Processo FMEA.....	35
Figura 4.1. Schema di package a <i>wire-bonded</i> e package a <i>fli-chip</i> .....	37
Figura 4.2. Conduzione.....	42
Figura 4.3. Convezione .....	44
Figura 4.4. Irraggiamento .....	46
Figura 4.5. Resistenza termica di contatto .....	50
Figura 4.6. Materiale termoconduttivi d'interfaccia di spessore $t$ tra due superfici. ..	52
Figura 4.7. Resistenza termica di diffusione.....	54
Figura 4.8. Alette di raffreddamento .....	57
Figura 4.9. Condizioni ai limiti.....	58
Figura 4.10. Caduta di temperatura in funzione della conduttività .....	60
Figura 4.11. Struttura PCB .....	61
Figura 4.12. conduttività PCB .....	62
Figura 4.13. Thermal vias. ....	63
Figura 5.1. Sistema conservativo in posizione di equilibrio.....	66
Figura 7.1. Vibrazioni sinusoidali, motore/cambio. ....	77
Figura 7.2 Matrice FMEA (DISSIPATION) .....	79
Figura 8.1. Modello assemblaggio FloTHERM .....	82
Figura 8.2. Albero di progetto in FloTHERM .....	84
Figura 8.3. Struttura interna componente elettronico FloTHERM 1. ....	86

Figura 8.4. Struttura interna componente elettronico FloTHERM 2.....	86
Figura 8.5. Vista laterale scheda FloTHERM.....	87
Figura 8.6. System Menu.....	88
Figura 8.7. Location.....	88
Figura 8.8. Layout Bottom scheda elettronica CFC400 Proto B.....	90
Figura 8.9. Layout Top scheda elettronica CFC400 Proto B.....	90
Figura 8.10. Geometria dissipatore CFC400 Proto B.....	91
Figura 8.11. Geometria CFC400 Proto B FloTHERM.....	91
Figura 8.12. Risultati CFC400 Proto B.....	94
Figura 8.13. Layout Bottom scheda elettronica CFC400 Proto C.....	96
Figura 8.14. Geometria dissipatore CFC400 Proto C.....	97
Figura 8.15. Geometria CFC400 Proto C FloTHERM.....	97
Figura 8.16. Risultati CFC400 Proto C.....	100
Figura 8.17. Risultati FMEA CFC400.....	102
Figura 9.1 ANSYS Workbench.....	105
Figura 9.2. Vibrazioni sinusoidali, motore/cambio.....	106
Figura 9.3. schema di progetto ANSYS Workbench.....	107
Figura 9.4. albero di progetto ANSYS Workbench.....	108
Figura 9.5. Geometria CFC400 1.....	109
Figura 9.6. Geometria CFC400 2.....	110
Figura 9.7. Geometria CFC400 3.....	110
Figura 9.8. CFC400 Esploso.....	111
Figura 9.9. Regione di contatto tra Spacer e dissipatore (Regione blu). .....	112
Figura 9.10. Regione di contatto tra Spacer e PCB (Regione blu). .....	112
Figura 9.11. Mesh Canotti.....	115
Figura 9.12. Mesh spacer, dissipatore e scheda elettronica.....	115
Figura 9.13. Vincoli.....	116
Figura 9.14. Vincoli.....	118
Figura 9.15. Risposta armonica in X.....	119
Figura 9.16. Risposta armonica in Y.....	120
Figura 9.17. Risposta armonica in Z.....	121
Figura 9.18. Analisi Sperimentale di vibrazioni.....	124

## INDICE DELLE TABELLE

---

Tabella 4.1. grandezze tipiche per Thermal Vias. ....	63
Tabella 8.1. Conducibilità termica per materiali dei componenti elettronici. ....	85
Tabella 8.2. Conducibilità e spessore .....	87
Tabella 8.3. Potenza componenti Proto B.....	92
Tabella 8.4. Risultati CFC400 Proto B .....	93
Tabella 8.5. Potenza componenti Proto C.....	98
Tabella 8.6. Risultati CFC400 Proto C .....	99
Tabella 9.1. Proprietà dei materiali.....	107
Tabella 9.2. Parti e materiali CFC400 Proto C. ....	109
Tabella 9.3. Tipi di contatti disponibili in ANSYS Workbench.....	111
Tabella 9.4. Quantità di nodi e di elementi della mesh.....	114
Tabella 9.5. Modi di vibrare .....	117
Tabella 9.6. Risposta armonica in X.....	119
Tabella 9.7. Risposta armonica in Y .....	120
Tabella 9.8. Risposta armonica in Z .....	121
Tabella 9.9. Proprietà PBT ASA GF30 .....	123
Tabella 9.10 Modi di vibrare. ....	123

## GLOSSARIO

---

AMT	Automated Manual Transmission
ASA	Acrylonitrile-styrene-acrylate Copolymer
CFC	Controllo Frizione Cambio
CFD	Computational Fluid Dynamics
CTE	Coefficiente di Dilatazione Termica.
DCT	Double Clutch Transmission
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
GF	Glass Fiber
KERS	Kinetic Energy Recovery System
LU	Lower-Upper
MM	Magneti Marelli
NSC	Nox Storage Converter
OEM	Original Equipment Manufacturer
PA	Polyamide
PBT	Polibutilentereftalato
PCB	Printed Circuit Board
PWT	Powertrain

RPN	Risk Priority Number
SCR	Selective Catalytic Reduction
TCU	Transmission Control Unit

# INTRODUZIONE

---

## Motivazione

L'Automated Manual Transmission (AMT, anche noto con il nome commerciale di Freechoice o Selespeed) di Magneti Marelli è una tecnologia di automazione elettro-idraulica del cambio manuale che coniuga comfort di utilizzo, riduzione di consumi ed emissioni, ed è applicabile su qualsiasi trasmissione, con costi di produzione più bassi rispetto ai tradizionali cambi automatici.

L'AMT si basa su una centralina elettronica di controllo e su un sistema idraulico di attuazione che sovrintendono all'uso della frizione ed al cambio delle marce, consentendo al conducente di guidare cambiando marcia senza l'uso della frizione stessa, in modalità sequenziale oppure completamente automatica.

Il dispositivo di Magneti Marelli opera sul cambio manuale di un'automobile allo stesso modo di come agirebbe il guidatore: provvede ad aprire e chiudere la frizione, innesta e disinnesta le marce e, quando necessario, comanda anche la selezione del cambio (modalità di cambio marcia automatica o sequenziale).

I componenti del gruppo idraulico sono raccolti in un unico kit, fornito sigillato al costruttore automobilistico pronto per essere montato sul cambio. Una volta montato sul cambio il kit idraulico interfaccia meccanicamente l'albero di comando del cambio. L'attuazione idraulica permette una maggiore velocità di attuazione e conseguenti migliori prestazioni di sportività e comfort della vettura.

La centralina elettronica di controllo della trasmissione (TCU) è cuore ed intelligenza del sistema di comando della trasmissione, questa gestisce i cambi marcia comandando la frizione, il cambio ed il motore, prendendo in considerazione le richieste del guidatore e le condizioni operative del veicolo.



Lanciato da Magneti Marelli nel 1997, l'AMT-Selespeed, attraverso un processo di continua evoluzione tecnologica è ora giunto alla generazione "meccatronica", così denominata perché integra per la prima volta in un unico kit la parte elettronica di comando e la parte idraulica di attuazione della trasmissione, consentendo significativi miglioramenti della prestazione, sia in termini di velocità sia di comfort di cambio marcia.

Finora l'AMT aveva un'architettura distribuita, il sistema idraulico si trova sull'albero di comando del cambio e veniva gestito remotamente dalla centralina elettronica di controllo, attraverso collegamento fisico (cavi), la quale poteva essere localizzata sotto il sedile del guidatore o nel vano motore. Con la costante ricerca di miglioramenti e riduzioni dei costi è stato sviluppato il sistema detto meccatronico, che incorpora in un unico complesso il sistema elettronico ed il sistema idraulico.

Con la nascita di questo nuovo sistema AMT, nascono anche dei problemi sul sistema elettronico che non erano presenti nell'antica architettura, dal fatto che questa viene spostata in un ambiente caratterizzato per alte temperature e soprattutto vibrazione prodotte dal corpo trasmissione e motore.

Le vibrazioni meccaniche create si possono portare in risonanza tali strutture che sottoposte a questo tipo di sollecitazione possono procurare dei danneggiamenti non voluti sulle strutture stesse, ciò porta agli ingegneri ad identificare le frequenze naturali ed i modi di vibrare dei corpi per garantire il corretto funzionamento.

Partendo da specifiche e delle procedure fornite dalle case costruttrici si dovrà realizzare un progetto robusto tenendo conto anche dei limiti meccanici e termici dei componenti elettronici affinché essi siano in grado di lavorare nelle condizioni richieste senza che si creino pericoli di rottura e/o spegnimento improvviso (Shot down).

Per dare luogo a tali esigenze ed effettuare una corretta progettazione si necessita di fare delle analisi dei dispositivi in fase di progetto tramite programmi di

calcolo, così da portare risparmi di tempo e costi nell'interno della fase di progettazione.

Prima di effettuare queste analisi vi è buona norma identificare tutti i modi di guasto del progetto, gli effetti e le relative cause, al fine di individuare le criticità e di definire gli interventi migliorativi atti a ridurre gli effetti. Per realizzare detta identificazione in modo organizzato viene implementata la metodologia di lavoro conosciuta come FMEA di progetto che permette di valutare i modi, l'effetti e le criticità di guasto.

### Obiettivo generale

Questa tesi di laurea ha la finalità di contribuire alla corretta progettazione della centralina elettronica CFC400 per AMT Meccatronica di Magneti Marelli Powertrain evidenziando attraverso le analisi termiche e strutturali le potenziali problematiche emerse dall'analisi dalla matrice FMEA e proporre le eventuali possibili ottimizzazioni atte a migliorare le performance funzionali nel rispetto dei parametri e costi di progetto.

### Obbiettivi specifici

- Individuare ed analizzare le specifiche del cliente, rispetto alle condizioni di lavoro per la centralina elettronica CFC400.
- Identificare i possibili modi di guasto, relativi ad alta temperatura e vibrazioni, della centralina elettronica CFC400 tramite la matrice FMEA .
- Identificare i possibili guasti dovuti alle alte temperature tramite simulazione termica.
- Confrontare i risultati ottenuti tramite simulazione termica con i risultati sperimentali.
- Proporre eventuali miglioramenti per il sistema di raffreddamento centralina elettronica CFC400, derivati dai risultati ottenuti tramite simulazione termica.

- Identificare i modi di vibrare della centralina tramite analisi modale e confrontare con i profili vibrazionali forniti dal cliente.
- Realizzare eventuali analisi armoniche derivanti dell'analisi modale.
- Confrontare i resultanti ottenuti tramite analisi vibrazionale con i risultati sperimentali.
- Proporre eventuali miglioramenti nell'ambito strutturale per la centralina elettronica CFC400, derivati dai risultati ottenuti tramite l'analisi vibrazionale.

### Metodologia di lavoro

Magneti Marelli impiega le tecnologie più moderne integrandole con le proprie competenze specialistiche e con un back ground di esperienze applicative di assoluto rilievo.

In particolare, in ambito tridimensionale, si parla di Metodo ad Elementi Finiti (FEM) e di Analisi ad Elementi Finiti (FEA) in ambito prevalentemente strutturale, magnetico, termico di componenti solidi e di Fluidodinamica Computazionale (CFD) in ambito di meccanica dei fluidi.

L'obiettivo principale di tutte queste analisi è quello di ottenere informazioni sulla risposta dei sistemi fisici ad alcune condizioni imposte, comunemente indicate come carichi e/o condizioni al contorno.

Con l'uso estensivo di questi strumenti di analisi previsionale un Team di Sviluppo è in grado di verificare se il progetto proposto sarà in grado di rispettare le specifiche del cliente prima che venga realizzato il prototipo.

In Magneti Marelli i modelli matematici sono utilizzati sia nella progettazione/definizione del prodotto/progetto, sia nella sua certificazione.

Solitamente in fase di progettazione vengono eseguite numerose analisi numeriche. I progettisti confrontano e classificano progetti alternativi in accordo con gli obiettivi

cliente. Nella fase di certificazione si esamina che il progetto finale rispetti tutti i requisiti definiti.

Per lo sviluppo di questa tesi di laurea sono stati realizzate due tipi di analisi numeriche:

Analisi termo-elettriche: tramite il software FloTHERM. Questa analisi permette di individuare, all'interno dei componenti e strutture, la distribuzione di temperature e l'entità e le vie di trasmissione del calore, quando questi si trovano in prossimità di sorgenti di calore.

Analisi Vibrazionale: tramite il software ANSYS Workbench. Questa analisi permette di stimare le caratteristiche intrinseche vibrazionali di un componente o struttura ,analisi modale , e le modalità di risposta vibrazionale dello stesso a sollecitazioni di tipo armoniche e randomiche.

## Struttura della tesi

La tesi è strutturata in tre parti, la prima parte formata da due capitoli, il primo (Capitolo 1) è una presentazione dell'azienda dove si è svolta la tesi ed il secondo (Capitolo 2) è la presentazione del prodotto in studio, una seconda parte teorica e la terza ed ultima parte di presentazioni dell'analisi fatte.

La parte teorica è composta di quattro capitoli cominciando dal capitolo 3 fino al capitolo 6.

Il capitolo 3 contiene un'introduzione all'analisi FMEA, composta dalla definizione di FMEA, i tipi di FMEA, ed una spiegazione più profonda della FMEA di Progetto.

Nel capitolo 4 si trova una spiegazione della teoria di trasmissione di calore focalizzata ai dispositivi elettronici. Si presentano i guasti nei dispositivi elettronici associati alla temperatura, suddivisi in guasti meccanici, guasti elettrici e guasti corrosivi. Successivamente si dà una breve introduzione alle modalità di scambio termico, essendo queste conduzione, convezione ed irraggiamento. Per finalizzare questo capitolo si presentano alcune tecnologie utilizzate per il raffreddamento di sistemi elettronici, e si trovano:

- Materiali termoconduttivi d'interfaccia.
- Resistenza termica di diffusione
- Alette di raffreddamento
- Materiale per i circuiti stampati
- Thermal vias.

Il capitolo 5 ha una breve introduzione alla dinamica di vibrazione delle strutture, suddivisa in la spiegazione teorica dell'analisi modale e la spiegazione teorica dell'analisi di oscillazioni forzate con eccitazione armonica.

Il Capitolo 6 chiude la parte teorica e contiene un approccio computazionale del metodo ad elementi finiti.

La terza parte è composta di 3 capitoli dal capitolo 7 fino al capitolo 9.

Il capitolo 7 include principalmente la presentazione dello scopo della tesi di laurea partendo dai criteri di corretta progettazione e dei risultati ottenuti dall'analisi FMEA.

Il capitolo 8 presenta le simulazioni termiche fatte, partendo da un'introduzione di FloTHERM, che è stato il software utilizzato per la realizzazione di queste analisi, seguita dalla presentazione strutturata delle analisi eseguite utilizzando come riferimento il flusso logico fissato dal software, definizione della geometria e materiali, condizioni ambientali e di contorno, ed assegnazione della potenza dissipata, insieme ai rispettivi risultati e opportuni analisi e suggerimenti.

Il capitolo 9 contiene le simulazioni vibrazionali, pari al capitolo 8, questo presenta un'introduzione al software utilizzato, ANSYS Workbench, seguita dalla presentazione strutturata delle analisi eseguite utilizzando come riferimento il flusso logico fissato dal software, definizione dei materiali, definizione della geometria, costruzione della mesh, e l'impostazione delle condizioni iniziali e dei vincoli della struttura, insieme ai rispettivi risultati e opportuni analisi e conclusioni.

## CAPITOLO I

### MAGNETI MARELLI

#### 1.1 Magneti Marelli

Magneti Marelli, nata nel 1919 con il nome FIMM (Fabbrica Italiana Magneti Marelli) per la crescente necessità di magneti d'accensione rivolti al mercato automobilistico e per l'aviazione, è oggi un'azienda leader nel mercato mondiale per quanto riguarda la progettazione e produzione di sistemi e componenti ad alta tecnologia per autoveicoli.

Il gruppo Magneti Marelli, parte del gruppo FIAT Spa, vanta attualmente quasi 35.000 addetti, 83 unità produttive, 12 centri di Ricerca e Sviluppo e 26 Centri Applicativi, è presente in 18 nazioni e fornisce tutti i maggiori produttori automobilistici in Europa, Asia, Nord e Sud America.



Figura 1.1 Presenza della MM nel mondo

Il gruppo Magneti Marelli punta a coniugare qualità, offerta competitiva, tecnologia avanzata e flessibilità, con l'obiettivo di rendere disponibili tecnologie chiave a costi competitivi per l'utente finale. Magneti Marelli punta a valorizzare, attraverso un processo di innovazione continua, il proprio know-how e competenze trasversali per

sviluppare sistemi intelligenti e soluzioni che contribuiscano all'evoluzione della mobilità secondo criteri di sostenibilità ambientale, sicurezza e qualità della vita all'interno dei veicoli.

Per ottimizzare questo processo la Magneti Marelli ha diviso il suo operato in diverse aree di business:

- Automotive lighting;
- Powertrain;
- Electronic systems;
- Suspension systems & shock absorbers;
- Exhaust systems;
- Plastic components and modules;
- Aftermarket parts and services;
- Motorsport.



## 1.2 Aree di business

Come si può vedere dal grafico seguente – rappresentante il contributo di ciascuna di queste divisioni nel fatturato Magneti Marelli nel 2011 – tra i vari reparti quelli più redditizi risultano essere Lighting e Powertrain.

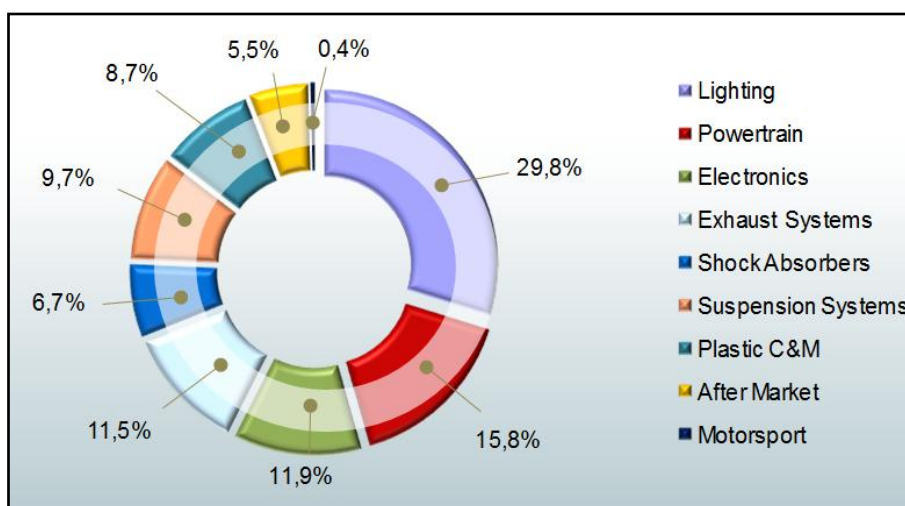


Figura 1.2 Contributo sul fatturato fornito da ciascuna area di business

Tutte queste aree operano in settori ben distinti, qui brevemente descritti:

### 1.2.1 Automotive lighting.

Questa divisione, con sede a Reutlingen in Germania, si occupa dello sviluppo, della produzione e della vendita di prodotti di illuminazione da esterno per le maggiori OEM internazionali.

### 1.2.2 Powertrain.

Magneti Marelli Powertrain è la business line di Magneti Marelli dedicata alla produzione di sistemi di controllo motore e cambio per automobili, motocicli, e veicoli commerciali leggeri.

### 1.2.3 Electronic systems.

Questo ramo, con sede a Corbetta, si occupa di elettronica nell'ambito automotive, principalmente finalizzata ai quadri di bordo/display ed allo sviluppo e conseguente produzione di sistemi infotainment e telematici.

### 1.2.4 Suspension systems & shock absorbers.

Il settore MM Suspension system ha quartier generale situato a Torino ed è rivolto alla progettazione e produzione di moduli e componenti per sospensioni ed ammortizzatori di autoveicoli.

### 1.2.5 Exhaust systems.

Magneti Marelli Exhaust sviluppa e produce sistemi di scarico per veicoli a motore con tecnologie avanzate in termini di prestazioni e qualità. E' attiva sia in ambito del post-trattamento dei gas di scarico per l'abbattimento degli inquinanti (convertitori catalitici, filtri antiparticolato, sistemi SCR e NSC), sia in ambito acustico per la riduzione del rumore.

### 1.2.6 Plastic components and modules.

Questa area di business ha come compito lo sviluppo e la produzione di sistemi complessi in materiale plastico come plance, paraurti, sistemi di alimentazione carburante, ecc. La sua sede è situata a Grugliasco.

### 1.2.7 Aftermarket parts and services.

Magneti Marelli After Market Parts and Services è la divisione commerciale dedicata al settore dei ricambi ed alle reti di officine. Distribuisce ricambi, componenti automotive e fornisce servizi di formazione e know how tecnico all'Independent Aftermarket. Attraverso la propria rete, composta da ca. 5000 officine autorizzate nel mondo con il marchio Magneti Marelli Checkstar Service Network, offre prodotti e servizi di assistenza agli automobilisti.

### 1.2.8 Motorsport.

Questa divisione, con sede a Corbetta, sviluppa sistemi elettronici ed elettromeccanici per veicoli da competizione a due e quattro ruote. Fornisce in particolare sistemi per il controllo motore e l'acquisizione dati (centraline, iniettori, sensori ecc.), sistemi di telemetria, sistemi elettro-idraulici per l'automazione ed il controllo delle scatole cambio sportive, oltre che display, alternatori, regolatori di tensione, bobine di accensione, regolatori di pressione, pompe benzina ed applicativi software. Recentemente Magneti Marelli Motorsport ha iniziato a lavorare anche nell'ambito della progettazione e realizzazione dei sistemi di recupero dell'energia cinetica in frenata (KERS) per la Formula 1 ed altre competizioni motoristiche

## 1.2 Magneti Marelli Powertrain

Come già anticipato MM Powertrain è la business line di Magneti Marelli dedicata alla produzione di componentistica per motori e cambi di automobili, motocicli e veicoli leggeri.

La Powertrain conta oggi due centri di Ricerca e Sviluppo, quattro centri di Ricerca Applicativa ed undici stabilimenti di produzione, dislocati in diversi continenti: in Asia (Cina ed India), Europa (in Francia, Germania, Italia e Slovacchia) e America (Brasile e USA).



Figura 1.3. Presenza della MM PWT nel mondo

Questo ramo dell'azienda è indirizzato principalmente alla progettazione ed allo sviluppo di:

- sistemi di controllo per motori benzina;
- sistemi di controllo per motori diesel;
- sistemi di controllo cambio;
- motori elettrici;
- smart actuators.

### 1.3.1 Sistemi di controllo per motori benzina e diesel.

I sistemi di controllo per motori benzina sono costituiti da centraline elettroniche (ECU – Engine Control Unit), iniettori, corpi farfallati, collettori aspirazione, condotti benzina, sistemi mult carburante e sistemi GDI.

Quelli per motori diesel sono costituiti invece da ECU, corpi farfallati mecatronici, collettori aria con controllo swirl variable, Selective Catalytic Reduction, Diesel Direct Injection.

Le centraline elettroniche rappresentano la parte “intelligente” del controllo; sono in grado di controllare la quantità di carburante iniettato all'interno di ogni cilindro per ciclo, tempi di iniezione, la fasatura d'accensione, tutte le varie periferiche del sistema di controllo, ecc.

Per quanto riguarda le centraline, Magneti Marelli Powertrain produce sia la componente hardware – ovvero la centralina stessa - che pilota il funzionamento del motore, sia il software che le caratterizza.

### 1.3.2 Motori elettrici.

Magneti Marelli Powertrain, spinta dalle nuove norme in ambito ambientale e dalla necessità di trovare nuove fonti di energia efficienti, negli ultimi anni ha rivolto grande attenzione alle energie “pulite”.

Da questo punto di vista i veicoli ibridi, ed ancor più quelli elettrici, rappresentano oggi la miglior soluzione per un trasporto che inquinino meno rispetto ai veicoli classici a benzina. A questo fine la Powertrain si occupa di motogeneratori, power inverter e Vehicle Management Unit.

### 1.3.3 Smart actuators.

Si tratta di un'applicazione mecatronica per il controllo del flusso d'aria nel CAB (collettore aria-benzina).

#### 1.3.4 Sistemi di controllo cambio.

Magneti Marelli è impegnata nello sviluppo e produzione di trasmissioni robotizzate (AMT), a doppia frizione (DCT), centraline elettroniche (TCU – Transmission Control Unit) e gruppi di potenza idraulici.

## CAPITOLO II

### TRASMISSIONI ROBOTIZZATE MAGNETI MARELLI

---

#### 2.1 Cambi robotizzati.

Magneti Marelli Powertrain produce cambi robotizzati o AMT (*Automated Manual Transmission*) che consistono nella trasformazione di una tradizionale scatola cambio, in cui il cambio manuale è sostituito da un kit di Attuazione (plug-in) controllato elettronicamente da una Unità di Controllo Trasmissione (TCU *Transmission Control Unit*).

Questo sistema permette:

- Cambio automatico della marcia
- Innesto automatico della frizione

In questo modo vengono offerte al guidatore:

- Possibilità di cambio in modo Manuale o Automatico
- Modalità di cambio manuale sia tramite joystick che con cambio al volante
- Soppressione del pedale frizione

Inoltre tutte le informazioni possono poi essere riportate sul cruscotto per maggiore consapevolezza di chi guida.

## 2.2 Configurazioni

Cinque diverse soluzioni per trasmissioni longitudinali, trasversali o transasse di vetture di ogni potenza.

### 2.2.1 XY

- Installazione semplice sulla trasmissione esistente.
- Nessun vincolo meccanico nel disegno della trasmissione.
- La soluzione migliore per le trasmissioni trasversali a 3 leveraggi.

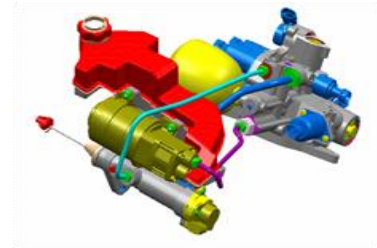


Figura 2.1. Configurazione

XY

### 2.2.2 S-CAM

- Soluzione compatta ed integrata nella trasmissione.
- E' vincolante per il disegno della trasmissione.
- E' la soluzione migliore per le trasmissioni longitudinali di veicoli commerciali leggeri.

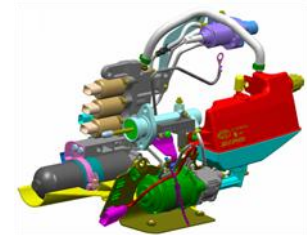


Figura 2.2. Configurazione S-CAM

### 2.2.3 FLEX XY e FLEX S-CAM

- Le configurazioni Flex sono adattamenti delle soluzioni XY e S-CAM nel caso di trasmissioni transasse, utilizzate specialmente per le top car.



Figura 2.3. Configurazione FLEX S-CAM



#### 2.2.4 LSC

- E' di semplice installazione sulla trasmissione esistente.
- Nessun vincolo meccanico nel disegno della trasmissione.
- La struttura è modulare per una facile installazione nei diversi vani motore. La soluzione migliore per un adattamento nelle attuali trasmissioni trasversali a 4 leveraggi

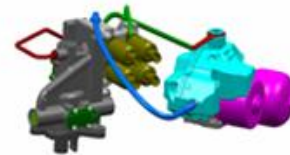


Figura 2.4. Configurazione LSC

#### 2.2.5 MECHATRONIC

- Unità di Controllo della Trasmissione (TCU) integrata nel circuito idraulico.
- Il solenoide delle valvole è direttamente connesso alla TCU.
- Un corto cablaggio (fornito ed assemblato da Magneti Marelli) connette i sensori del sistema e la pompa olio alla TCU.
- Il sistema completo è rilasciato pre riempito e completamente testato, con modalità “plug & play”.



Figura 2.5. Configurazione  
Mechatronic

### 2.3 Unità di Controllo Elettronico della Trasmissione (AMT ECU)

Le Unità di Controllo Elettronico della Trasmissione (AMT ECU) permettono la gestione della trasmissione automatica, assicurando le prestazioni della vettura e la riduzione del consumo carburante, mediante l'ottimizzazione del rapporto di cambio.

### 2.3.1 AMT TCU CFC3xx



Figura 2.6. AMT TCU CFC3xx

#### Descrizione

L'unità di controllo trasmissione CFC3XX permette di gestire un cambio robotizzato che assicura l'alta prestazione del veicolo ed una riduzione dei consumi attraverso l'ottimizzazione dei cambi di marcia.

Attuatori di valvole di controllo di alta precisione per applicazioni multiple (tipo x-y, s-cam). Controllo di posizione frizione e cambio con interfaccia sensore tipo “senza contatto”.

#### Vantaggi

- Montaggio vano motore
- Alta integrazione elettronica
- Dimensioni ridotte
- Possibilità di adattamento del software e della logica di base per soddisfare le richieste del cliente

### 2.3.2 AMT TCU CFC32x



Figura 2.7. AMT TCU CFC32x

#### Descrizione

L'unità di controllo trasmissione CFC32X permette di gestire un cambio robotizzato che assicura l'alta prestazione del veicolo ed una riduzione dei consumi attraverso l'ottimizzazione dei cambi di marcia.

Attuatori di valvole di controllo di alta precisione per applicazioni multiple (tipo x-y, s-cam).

Controllo di posizione frizione e cambio con interfaccia sensore tipo "senza contatto".

#### Vantaggi

- Montaggio vano motore
- Alta integrazione elettronica
- Dimensioni ridotte
- Possibilità di adattamento del software e della logica di base per soddisfare le richieste del cliente.

### 2.3.3 AMT TCU CFC300x



Figura 2.8. AMT TCU CFC300x

#### Descrizione

L'unità di controllo trasmissione CFC300X permette di gestire un cambio robotizzato che assicura l'alta prestazione del veicolo ed una riduzione dei consumi attraverso l'ottimizzazione dei cambi di marcia in modalità automatica o manuale sequenziale.

Il sistema consente un prodotto di dimensioni compatte. Connessioni elettriche integrate con elettrovalvole e sensori a pressione idraulica. Controllo guida motore attraverso una pompa idraulica integrata. Controllo ad alta precisione degli attuatori delle elettrovalvole per le trasmissioni di tipo s-cam. Controllo di posizione frizione e cambio con interfaccia sensore di tipo "senza contatto".

#### Vantaggi

- Montaggio della scatola del cambio
- Cablaggio ridotto nel veicolo
- Alta integrazione elettronica
- Dimensioni ridotte
- Possibilità di adattamento del software e della logica di base per soddisfare le richieste del cliente.

### 2.3.4 AMT TCU CFC400



Figura 2.9. CFC400

L'unità di controllo trasmissione CFC400 è l'oggetto di studio di questa tesi di laurea. Questo permette di gestire un cambio robotizzato che assicura elevate prestazioni del veicolo ed una riduzione dei consumi attraverso l'ottimizzazione dei cambi di marcia in modalità automatica o manuale sequenziale, per trasmissioni di tipo Meccatronico.

#### Caratteristiche

È una centralina che si interfaccia direttamente sul circuito idraulico del sistema del cambio, riuscendo ad ottenere una notevole riduzione del cablaggio e la maggiore semplicità di installazione sul veicolo.

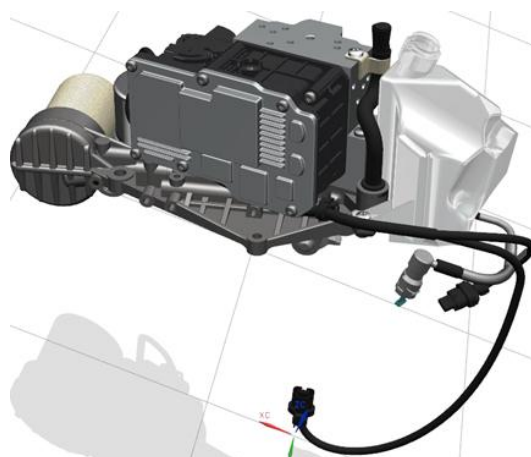


Figura 2.10. CFC400 più kit idraulico.

La nostra TCU si interfaccia direttamente con il solenoide delle singole valvole che gestiscono la selezione, l'innesto e la frizione.

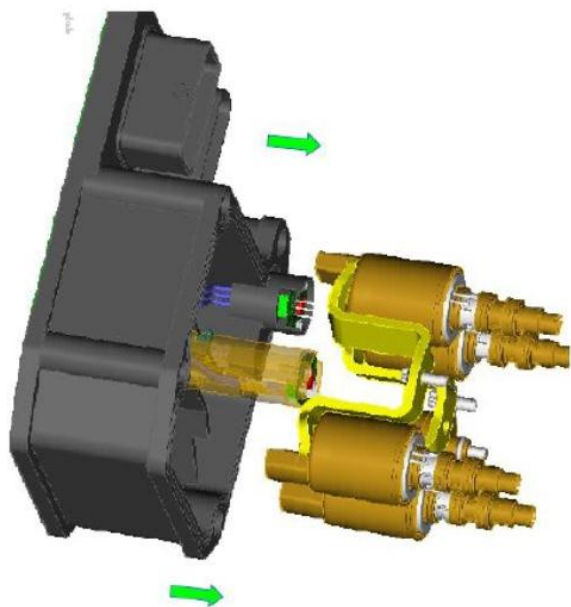


Figura 2.11. Montaggio Corpo valvola CFC400

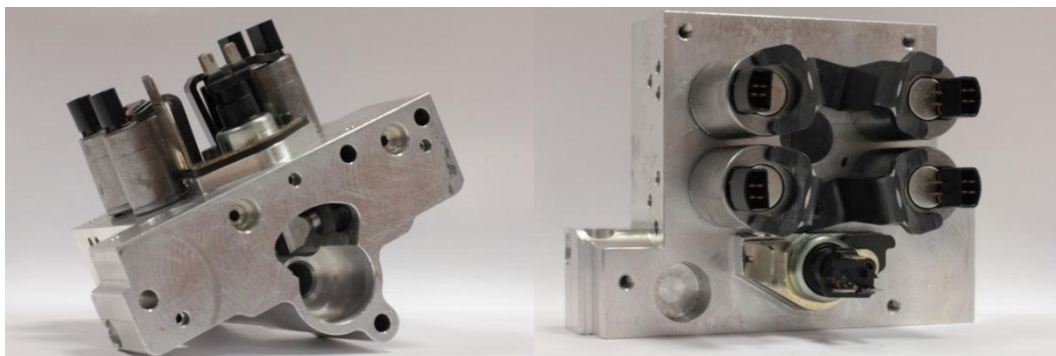


Figura 2.12. Corpo valvola CFC400

Il controllo della posizione frizione e di innesto e selezione marce è realizzato tramite sensori integrati di tipo “3D Hall contacless”.

Il controllo della posizione frizione e di innesto e selezione marce è realizzato tramite sensori integrati di tipo “3D Hall contacless”.

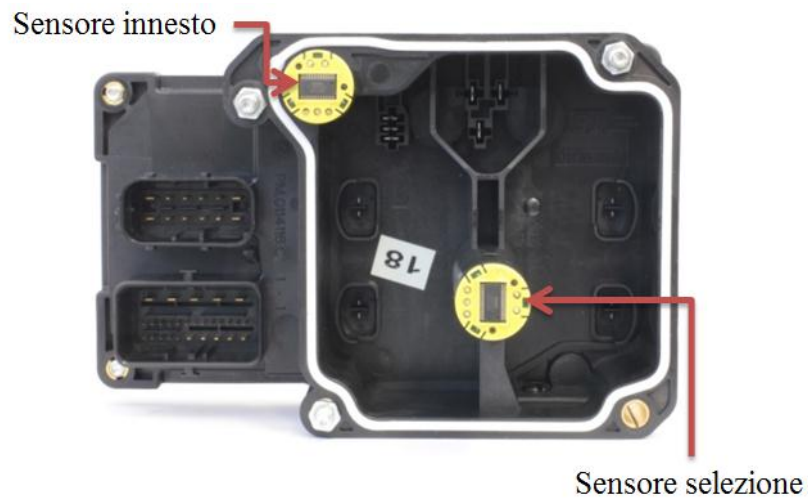


Figura 2.13. sensori CFC 400

### Vantaggi

- Cablaggio ridotto del veicolo
- Alta integrazione elettronica
- Dimensione ridotte
- Possibilità di adattamento del software e della logica di base per soddisfare le richieste del cliente.

## CAPITOLO III

### FMEA

---

#### 3.1 Definizione

*“A failure mode and effect analysis (FMEA) is an engineering technique used to define, identify, and eliminate known and/or potential failure, problems, errors, and so on from the system, design, process, and/or service before they reach the customer (Omdahl 1988; ASQC 1983).”*

D'accordo con STAMATIS (1993), l'analisi dei modi di guasto e degli effetti (FMEA) è una tecnica di progettazione utilizzata per definire, identificare, ed eliminare potenziali guasti, problemi, errori, dal sistema, progetto o processo prima di che questi raggiungano il consumatore.

La FMEA fornisce un metodo sistematico per esaminare tutte le forme di guasto possibili. Per ogni modo di guasto, è stimato il suo effetto in tutto il sistema, progetto o processo, la sua severità, la frequenza ed il suo rilevamento.

La FMEA identificherà le azioni correttive necessarie per prevenire tali guasti, assicurando così la massima durata, qualità ed affidabilità possibile.

Per definizione la FMEA è una metodologia per massimizzare la soddisfazione del cliente finale eliminando e/o riducendo potenziali problemi o problemi già presenti. Per fare questo la FMEA deve essere impostata fin dalle fasi iniziali del progetto nonostante la mancanza di alcune informazioni. La FMEA dà una guida per un progressivo miglioramento del progetto.

La FMEA è un documento sempre vivo che deve essere continuamente aggiornato per seguire le modifiche di progetto, per accogliere informazioni rese disponibili durante lo sviluppo e per recepire l'esperienza di altri prodotti analoghi già sul campo. Bisogna dunque prevedere sessioni di aggiornamento in funzione dei risultati



di validazione e sperimentazione sul sistema, progetto o processo e dei risultati di qualità ed affidabilità ottenuti durante il periodo di produzione: si formalizza così la memoria storica sul progetto originario e si crea un supporto formale accessibile ai nuovi progetti. La FMEA può considerarsi finita o completata solo quando il sistema, progetto, prodotto, processo, è considerato completo.

Identificare i potenziali modi di guasti presenti, è un compito importante della FMEA. Utilizzando la data e le conoscenze del progetto, ogni modo di guasto ed il suo effetto è valutato in tre fattori:

- *Severity* (Gravità): la gravità dell'effetto quando si verifica il modo di guasto;
- *Occurrence* (Probabilità): la probabilità o la frequenza con la quale si verifica il modo di guasto.
- *Detection* (Rilevabilità): la probabilità di che il modo di guasto sia rilevato prima che l'impatto sia evidenziato.

Questi tre fattori sono combinati in un solo numero chiamato *risk priority number* (RPN) che rifletta la priorità di un modo di guasto in particolare. Questo numero è semplicemente calcolato facendo il prodotto di questi tre fattori.

$$RPN = Severity * Occurrence * Detection$$

### 3.2 Organizzazione della FMEA

La FMEA è un'attività che deve essere eseguita in gruppo e non può essere fatta individualmente. Tipicamente una sola persona è responsabile di coordinare la FMEA, con l'obiettivo di formare un FMEA *team* e di portare dentro il progetto differenti prospettive ed esperienze.

Il *team* deve essere definito appropriatamente per ogni progetto specifico, non funziona un gruppo di FMEA universale o per l'azienda. Le conoscenze richieste per un problema specifico sono univoche dallo stesso problema.

### 3.3 Tipi di FMEA

Secondo YANG (2007), la FMEA può essere classificata in tre categorie secondo il livello di analisi: FMEA di sistema, FMEA di processo e FMEA di progetto. Esistono altri tipi di FMEA che possono essere considerate come una stensione di queste tre.

- FMEA di sistema: questo tipo di FMEA è chiamata anche FMEA di concetto, perché l'analisi è fatta in fase di sviluppo dell'idea. È una FMEA ad alto livello che può essere eseguita ed utilizzata per analizzare e prevenire guasti relativi a tecnologia e configurazione del sistema.  
Questa aiuta ad identificare i modi di guasto provocati da deficienze nella configurazione del sistema e l'interazione con alti sistemi e sottosistemi.  
FMEA di sistema consente di realizzare azioni volte a garantire la soddisfazione del cliente da prendere già in fase di disegno concettuale, ed è uno input importante alla FMEA si disegno.
- FMEA di progetto: è uno strumento di analisi che è usato per individuare i potenziali modi di guasti, valutare il rischio, ed a prevedere azioni correttive prima di inviare il disegno in produzione. Gli output della FMEA di disegno sono gli input per la FMEA di processo. Il processo per realizzare la FMEA di disegno sarà sviluppato in dettaglio nel prossimo paragrafo, perché questo tipo di FMEA sarà lo strumento di partenza per lo sviluppo della tesi.
- FMEA di processo: è un'analisi sistematica e logicamente strutturata destinata ad individuare i potenziali modi di guasti, valutare il rischio, ed a prevedere azioni correttive prima che il primo ciclo produttivo avvenga. Il potenziale modo di guasto di un processo è definito come il modo in cui il processo potesse fallire per soddisfare i requisiti di processo e/o la finalità di progettazione. La FMEA di processo risponde ai problemi scoperti nella FMEA di disegno relativi ai processi di manifattura ed assemblaggio.

### 3.4 FMEA di progetto

La FMEA di disegno, anche chiamata FMEA di disegno, è una metodologia di lavoro utilizzata per valutare a priori tutti i modi di guasto del prodotto, gli effetti (sul sistema e sul cliente) e le relative cause, al fine di definire, in modo organizzato, gli interventi migliorativi atti a ridurre gli effetti sull'utente finale.

Un prodotto può essere analizzato utilizzando vari approcci metodologici dipendenti sia dalla tipologia di analisi che deve essere effettuata, sia dal Cliente al quale è destinato il prodotto stesso. La metodologia di base è sostanzialmente sempre la stessa, ma variano gli elementi di partenza per l'analisi, alcuni indici utilizzati per la valutazione quantitativa, i criteri di assegnazione dei valori agli indici, alcune informazioni richieste per l'analisi.

Nella realizzazione della FMEA si possono prendere due percorsi d'azione per effettuare la valutazione. Il primo, utilizza data storica, che può essere l'analisi di dati di progetti simili, dati delle garanzie, reclami dei consumatori, e qualsiasi informazione appropriata disponibile per definire guasti. Nel secondo, calcolo delle tolleranze, modelli matematici, simulazione, progettazione condivisa, ed affidabilità ingegneristica possono essere utilizzati per definire ed identificare i guasti.

In funzione del Cliente al quale è destinato il prodotto, possono invece variare, in parte marginalmente, alcuni indici utilizzati per la valutazione quantitativa e/o i criteri di assegnazione dei valori ad alcuni apparentemente simili e/o alcune informazioni richieste per l'analisi.

L'esecuzione di una FMEA comincia con la definizione del sistema di studio. L'interazione tra il sistema e gli altri dovrebbe essere completamente capita per determinare gli effetti e come avvengono i modi di guasto.

Una volta che lo scopo dello studio della FMEA è definito, tutte le funzioni dei componenti di più basso livello del sistema sono analizzate, ogni funzione dovrebbe essere tecnicamente specificata, ed anche la sua modalità di guasto. Il passo

successivo sarà identificare i modi di guasto del componente. Questo passo è seguito per il rilevamento di ogni effetto prodotto da ogni modo di guasto e la valutazione della gravità (*severity*) associata all'effetto. Per ogni modo di guasto, è determinato il meccanismo di guasto e la probabilità che questo avvenga (*occurrences*). Il seguente passo è sviluppare un piano di controllo che aiuta evitare o rilevare i meccanismi, i modi, o gli effetti di guasto. L'effettività di ogni piano di controllo è valutata con la probabilità di rilevamento del modo di guasto (*detection*). Il passo successivo è valutare il rischio complessivo del modo di guasto. Questo rischio è calcolato per il *risk priority number* (RPN), che è il prodotto della gravità, il rilevamento e la frequenza del modo di guasto. Un alto RPN indica un alto rischio di guasto. Appropriate azioni correttive dovrebbero implementarsi per ridurre questo rischio. Nella figura 3.1 si può osservare uno schema di questo processo, infine, i risultati della FMEA di progetto sono documentati utilizzando un formato standardizzato. Nella figura si può osservare uno schema di questo processo.

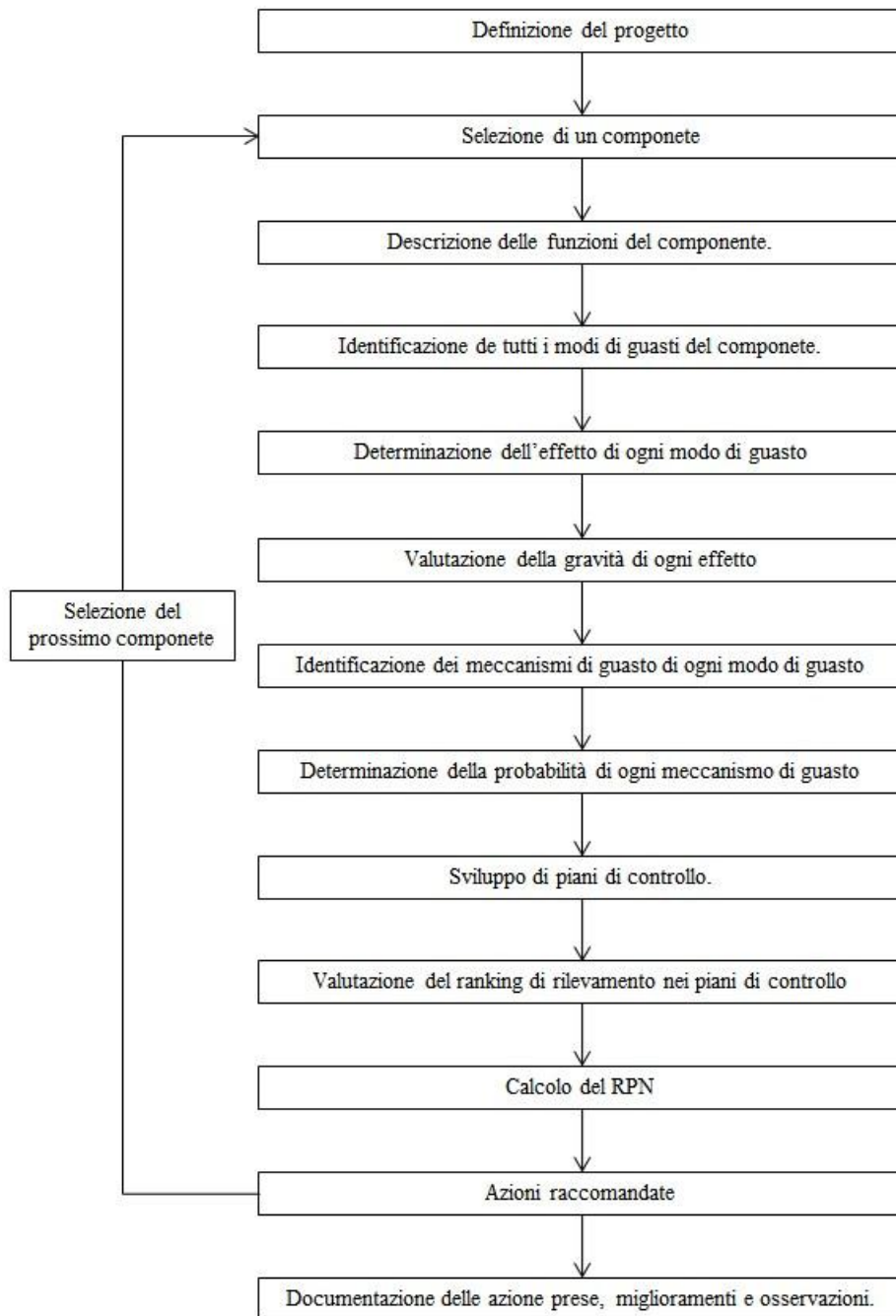


Figura 3.1. Processo FMEA

# CAPITOLO IV

## TRASMISSIONE DEL CALORE NEI DISPOSITIVI ELETTRONICI

---

### 4.1 Guasti in dispositivi elettronici associati alla temperatura.

L'alta temperatura è il fattore più critico per il fallimento di microelettronica. Se il calore generato dentro un dispositivo non è efficientemente dissipato, la temperatura aumenterà, se questa temperatura va oltre certi limiti il dispositivo può bruciarsi o prendere fuoco. Anche se l'aumento di temperatura non è sufficientemente grande per provocare fuoco o bruciare il dispositivo, i guasti possono ancora essere generati a causa delle alte temperature. I guasti in dispositivi microelettronici sono spesso classificati in guasti meccanici, corrosivi, ed elettrici.

#### 4.1.1 Guasti meccanici

Come guasto meccanico è definito qualsiasi tipo di deformazione eccessiva, spostamento, crepa o frattura in un materiale o la separazione della giunzione tra due pezzi. Questo succede quando le forze che si applicano al materiale creano delle sollecitazioni, che sono più elevate della tensione di snervamento del materiale, allora la giunzione tra due parti non può tollerare lo sforzo di taglio, rottura, o forze che possono portare a rottura per fatica.

I materiali si espandono e si contraggono così come la temperatura aumenta o diminuisce. Il coefficiente di dilatazione termica (CTE) è definito come il divario di espansione o contrazione per unità di lunghezza di un materiale, per unità di cambio di temperatura.

$$\alpha = \frac{1}{L} * \left( \frac{\partial L}{\partial T} \right)_P \quad (4.1)$$

L'indice P indica che la pressione è costante durante la misurazione di  $\alpha$  tale che il cambio di lunghezza sia solo dovuto alla variazione di temperatura. Il CTE è misurato in ppm/°C.

Se due materiali vincolati con distinti CTE sono attaccati l'uno all'altro, e sono sottoposti a differenti temperature, il vincolo è sottoposto a sforzo di taglio. Se questo sforzo è più grande di quello che può tollerare il vincolo, quest'unione si romperà.

Nei circuiti integrati i componenti più importanti dentro il package sono il *die* ed il substrato. Nei package a *wire-bonded*, la connessione elettrica tra il *die* ed il substrato è fatta attraverso fili di oro o alluminio, il fissaggio meccanico è fatto attraverso una sorte di *die attach*. Il *die* può essere protetto dall'ambiente con un coperchio. Nei package a *fli-chip*, il collegamento elettrico e meccanico tra il *die* e substrato è fatto attraverso *solder bumps*, uno strato di *underfill* è usato per aumentare la resistenza meccanica del fissaggio. I package a *fli-chip*, possono essere a *die* scoperto o avere un coperchio di plastica o metallo. Tra il *die* ed il coperchio, si utilizza delle paste conduttive (*thermal paste*) per migliore la trasmissione di calore verso l'esterno.

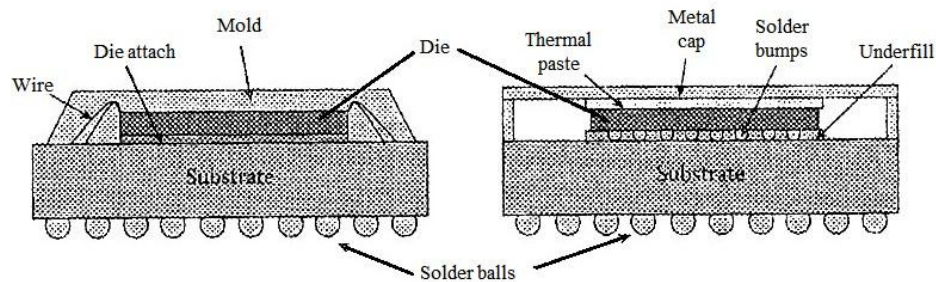


Figura 4.1. Schema di package a *wire-bonded* (sinistra) e package a *fli-chip* (destra).

Il *die*, il substrato, il *die attach*, i fili, il *solder bump*, il *underfill* ed il coperchio hanno coefficienti di dilatazione termica differenti. I guasti meccanici dipendenti della temperatura aumentano con la differenza tra questi coefficienti.

I più comuni guasti meccanici dovuti alle variazioni di temperatura sono descritti in continuazione:

- Fatica dei fili di collegamento: i fili che collegano il *die bond pads* al substrato o *leads* possono fallire dovuto ai cambi ciclici di temperatura. Questo guasto risulta dallo stress ciclico applicato ai fili, prodotto dalla differenza tra i coefficienti di dilatazione termica dei fili ed il materiale del package, al variare della temperatura.
- *Wire bond* fatica: un *wire bond* sottoposto a cambiamenti ciclici di temperatura genera sforzi di taglio ciclici tra i *wire* ed il *bond pad*, e tra il *bond pad* ed il substrato.
- Frattura del Die: i die sono fatti usualmente di silicio, germanio, arseniuro di gallio, o fosforo d'indio. Il substrato è tipicamente alluminio, berillio, nitruro di alluminio, con un coefficiente di dilatazione termica distinto dal die. Come la magnitudine dei cambi di temperature incrementano durante i cicli di potenza, le tensioni interne sono generate nel centro del die e sforzi di taglio sono generati nel bordo del die. Tale fenomeno può generare una frattura del die improvvisa, senza nessuna deformazione.
- Fatica di aderenza tra die e substrato: il die, il die attach, ed il substrato hanno differenti coefficienti di dilatazione termica, il vincolo tra il die ed il substrato può generare guasti di fatica.
- Frattura del package: il coefficiente di dilatazione termica del silicio e dei tipici coperchi sono circa 3 ppm/°C e 20 ppm/°C, rispettivamente. Un tipico processo di packaging coinvolge il fissaggio del die a temperature di 270°C per Poliammide adesive e 170°C per resina epossidica, seguito per l'incapsulamento a 170°C. A basse temperature, l'incapsulamento impone sforzi di compressione nel die e delle sotto tensioni nel coperchio. Quindi, si possono generare cricche nel coperchio.



#### 4.1.2 Guasti corrosivi.

La corrosione è definita come la reazione chimica di un materiale con l'ambiente circostante. La corrosione può essere divisa in due tipi: corrosione secca che avviene in assenza di acqua ed è associata alle alte temperature, e corrosione umida alla presenza di acqua ed è associata alle basse temperature. I due guasti di corrosione dipendenti della temperatura sono:

- Corrosione dei *bond pads* e parti metallici: questa è una corrosione di tipo umida, che capita alla presenza di un contaminante ionico come per esempio il  $\text{Cl}^-$  o  $\text{Na}^+$  ed umidità che possono creare percorsi conduttivi per perdite elettriche tra conduttori adiacenti. La corrosione comincia tipicamente quando la temperatura dentro del package è inferiore al punto di rugiada permettendo così la condensazione dentro il package. In operazione, il calore dissipato per il die è spesso sufficiente per elevare la temperatura ed evaporare l'elettrolita e ridurre l'umidità. Pertanto, le alte temperature dovute alla potenza del dispositivo attuano come un meccanismo lento di corrosione.
- Tensocorrosione in package: questo guasto viene dall'accelerazione del processo di fatica per corrosione della cricca. Questo tipo di guasto inizia circa a  $300^\circ\text{C}$ , e capita predominantemente in dispositivi di potenza.

#### 4.1.3 Guasti elettrici

Guasti elettrici possono influenzare la robustezza del dispositivo. Questi guasti possono essere intermittenti o permanenti. Alcune dei più comuni guasti elettrici dipendenti della temperatura sono:

- *Thermal runaway*: la resistenza in conduzione dei transistori di potenza incrementa con la temperatura. Se la potenza in questi transistori non è appropriatamente dissipata, la sua temperatura incrementerà, questo alla sua volta provocherà un incremento della resistenza in conduzione, e come risultato si otterrà una dissipazione di potenza più alta ed una temperatura anche più alta.

- Overstress elettrico: la resistenza elettrica del silicio si riduce con l'aumento di temperatura. Come nei die di silicio, l'aumento di temperatura e così la bassa resistenza, provocano grandi flussi di corrente. Alla sua volta, le giunzioni si riscaldano. Se il materiale raggiungesse la sua temperatura di fusione, si potrebbe provocare un danneggiamento permanente.
- Contaminazione ionica: questa può capitare durante il processo di produzione, assemblaggio, e prova. La mobilità degli ioni dipende della temperatura. Le cariche ioniche creano delle correnti non controllabili e degenerano le prestazioni dei dispositivi.
- Elettromigrazione: è il risultato del trasferimento della quantità di moto tra elettroni, che si muovono in un campo elettrico di ioni o atomi di un conduttore. Questo provoca che gli atomi e gli ioni si trasferiscano alla sua posizione originaria e creano dei vuoti. Se un significativo numero di atomi si trasferisse alla sua posizione originaria, i vuoti potrebbero crescere e collegarsi tra di loro producendo una discontinuità elettrica o un circuito aperto. L'elettromigrazione può anche provocare che gli atomi di un conduttore si accumulino e comincino a migrare ad altri conduttori vicini, creando un corto circuito. I guasti per elettromigrazione usualmente accadono ad alte densità di corrente ed alte temperature.

## 4.2 Modalità di scambio termico

Migliorare le prestazioni ed incrementare l'affidabilità sono due ragioni importanti per un appropriato trasferimento del calore in dispositivi elettronici.

Ogni dispositivo elettronico si scalda durante il funzionamento a causa degli spostamenti di cariche elettriche associate ad ogni transizione di stato; questo produce perdite ohmiche e capacitive. Una parte di questa energia è dissipata per conduzione termica dal die attraverso le connessioni interne ai piedini o alle pareti del package e poi al circuito stampato. Un'altra parte è condotta nella parte superiore del package. Nel circuito stampato il calore è poi condotto e distribuito con una legge che dipende dai materiali e dalla tecnologia realizzativa. Dalla superficie della scheda e dei componenti un'altra parte dell'energia è ceduta all'aria e pertanto abbandona il corpo solido. Il trasporto di energia attraverso i moti ascensionali di aria calda è noto come convezione libera o naturale. Nella convezione forzata, si trova un flusso d'aria ad alta velocità che investe la scheda consentendo così un migliore asporto del calore. Completamente senza mezzi si produce invece l'irraggiamento, che rimuove calore sotto forma di radiazione infrarossa. Tutti e tre i meccanismi trasportano simultaneamente calore da un'area calda ad una più fredda. Se questo trasporto di energia è efficiente, si ottiene un abbassamento di temperatura del dispositivo, altrimenti si assiste ad un suo innalzamento.

La scelta di un particolare modo di scambio termico per componenti elettronici dipende della potenza con cui si genera il calore, dalle esigenze di affidabilità, dalle condizioni ambientali e dal costo.

### 4.2.1 Conduzione

La conduzione avviene all'interno di un corpo o fra due corpi in contatto fra loro a causa dell'agitazione termica degli atomi, ed è il meccanismo più efficiente di trasmissione del calore.

Il meccanismo di trasferimento di energia avviene in maniera differente per materiali differenti. Nei gas e liquidi la conduzione di calore è dovuto alla collisione e diffusione delle molecole durante il loro movimento. Nei metallici la conduzione è dovuta al trasferimento di energia tra elettroni. Per i cristallini la conduzione avviene grazie all'intercambio di energia tra le molecole che vibrano nel reticolo cristallino. Matematicamente il processo di conduzione è descritto dalla legge di Fourier:

$$\dot{Q}_{cond} = -\kappa A \frac{dT}{dx}. \quad (4.2)$$

Dove

$\dot{Q}_{cond}$  è la potenza termica (quantità di calore per tempo).

$\kappa$  è il coefficiente di conducibilità termica.

$A$  è l'area della superficie di scambio termico.

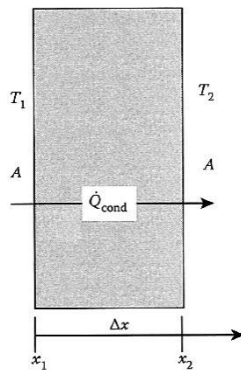


Figura 4.2. Conduzione

Il segno meno indica che il calore è trasferito in direzione opposta a quella del gradiente di temperatura.

La conduttività termica  $k$  è una proprietà fisica del materiale. Essa rappresenta la quantità di calore che nell'unità di tempo attraversa l'unità di superficie, con un

gradiente di temperatura unitario normale alla superficie stessa. Data una distribuzione di temperatura all'interno del corpo, quanto maggiore è il valore di  $k$ , tanto più grande sono i flussi termici che vi si stabiliscono; al contrario, bassi valori di  $k$  distinguono i cattivi conduttori del calore. Le corrispondenti unità nel sistema SI sono  $[k]=W/m^{\circ}C=W/mK$ .

Come regola, si osserva che la conduttività termica nei solidi è maggiore che nei fluidi; tra i solidi hanno maggiore conduttività i metalli, un po' minore i non metallici cristallini e minore ancora i solidi non cristallizzati. Tra i fluidi, i liquidi sono più conduttivi degli aeriformi, in questi ultimi la conduttività termica cresce al diminuire della massa molecolare.

Una certa influenza sul valore di  $k$  è esercitata dalla temperatura; all'aumentare di questa la conduttività termica cresce o diminuisce a seconda della natura del materiale e del suo stato termodinamico; nei gas  $k$  cresce al crescere la temperatura. La conduttività termica nella maggior parte dei metalli diminuisce leggermente con l'aumento della temperatura sopra una temperatura di  $25^{\circ}C$ . Tuttavia, il cambiamento della conduttività termica nei metallici è usualmente trascurato se il cambio di temperatura non è molto grande.

#### 4.2.2 Convezione

D'accordo con CENGEL (1998), la convezione è il trasferimento di energia tra una superficie solida ed il liquido o gas adiacente in movimento ed implica gli effetti combinati di conduzione e trasporto di massa.

In assenza di trasporto di massa, la trasmissione de calore tra una superficie ed il fluido adiacente viene per conduzione e la presenza di trasporto di massa aumenta la quantità di calore trasmesso tra superficie solida ed il fluido. La convezione è chiamata forzata se il fluido è forzato a fluire sulla superficie da dispositivi esterni come un ventilatore, una pompa, o il vento. Al contrario si parla, di convezione naturale se il movimento del fluido è causato da forze ascensionale indotte da differenze di densità legate alle variazioni di temperatura nel fluido.

La potenza termica trasmessa per convezione è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura come evidenziato dalla legge di Newton per la convezione:

$$\dot{Q}_{conv} = h A(T_s - T_\infty) \quad (4.3)$$

Dove

$h$  è il coefficiente convettivo [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ].

$A$  è l'area della superficie di scambio termico.

$T_s$  è la temperatura della superficie.

$T_\infty$  è la temperatura del fluido.

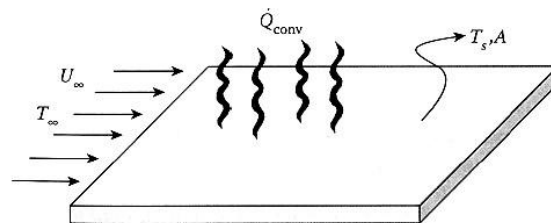


Figura 4.3. Convezione

Il coefficiente convettivo  $h$  è un parametro determinato sperimentalmente, il cui valore dipende dalla geometria della superficie, la natura del moto, le proprietà e la velocità del fluido.

I sistemi elettronici di bassa potenza possono essere raffreddati per convezione naturale. Nel raffreddamento per convezione naturale quando un fluido è riscaldato, si espande e diventa meno denso, per cui, all'interno di un campo gravitazionale, le particelle più leggere tendono a muoversi verso l'alto determinando moti convettivi naturali. Il raffreddamento per conduzione naturale è più efficiente quando il percorso del fluido è relativamente libero di ostacoli, lo è meno quando il fluido è costretto a muoversi attraverso stretti passaggi ed a superare molti ostacoli.

Quando il raffreddamento per convezione non è sufficiente, si può ricorrere alla convezione forzata, utilizzando un ventilatore che soffia aria all'interno del contenitore in cui si trovano i componenti elettronici, in modo che aumentando la velocità, e quindi la portata di fluido, aumenti anche la potenza termica trasmessa. In questa maniera, poiché il coefficiente di scambio termico può aumentare fino a dieci volte in base alle prestazioni del ventilatore, si ha una potenza termica trasmessa molto più grande, oppure, a parità di potenza dissipata, una temperatura superficiale dei componenti considerevolmente inferiore.

Il flusso di un fluido su di un corpo, è detto flusso esterno, mentre si dice flusso interno quello che si svolge all'interno di uno spazio confinato. Nei sistemi elettronici s'incontrano entrambi tipi di flusso.

Il flusso di un fluido viene anche suddiviso in laminare e turbolento. Nella trasmissione del calore il flusso turbolento comporta coefficienti di scambio termico molto più grande di quelli che si hanno in condizioni di flusso laminare, ma richiede anche ventilatori, pompe nel caso di liquidi, di maggior potenza a causa della maggiore resistenza al moto.

### 4.2.3 Irraggiamento

L'irraggiamento è l'energia emessa da una sostanza sotto forma di onde elettromagnetiche o fotoni come risultato delle modificazioni nelle configurazioni elettroniche degli atomi o delle molecole.

La trasmissione di calore per irraggiamento non richiede la presenza di un mezzo interposto diversamente dalla conduzione o dalla convezione, avviene alla velocità della luce e non subisce attenuazione del vuoto.

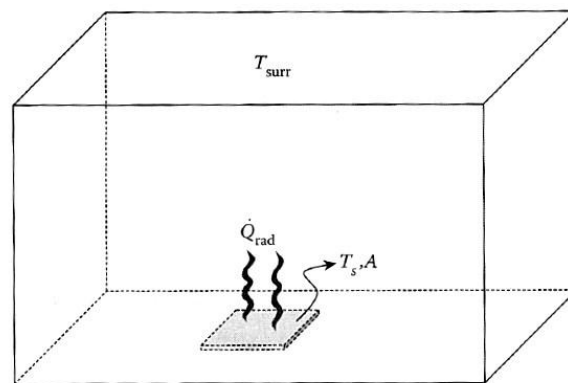


Figura 4.4. Irraggiamento

Nella trattazione sulla trasmissione del calore per irraggiamento interessa la radiazione emessa dai corpi a causa della loro temperatura, la radiazione termica. Tutti i corpi a temperatura sopra lo zero assoluto emettono una radiazione termica, la cui massima quantità, riferita alla superficie di area unitaria, alla temperatura assoluta  $T_s$  è data dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$\dot{q}_{max} = \sigma T_s^4 \quad (4.4)$$

Dove

$\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann. ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)]$ ).

La superficie ideale che emette per irraggiamento tale potenza massica è detto corpo nero. La radiazione emessa da qualsiasi superficie è minore di quella emessa dal corpo nero a parità di temperatura e può essere calcolata come  $\dot{q} = \varepsilon \sigma T_s^4$ . Dove  $\varepsilon$  è



l'emissività della superficie, il cui valore, compreso nell'intervallo  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , è una misura di quanto il comportamento di una superficie si approssima a quello del corpo nero per  $\varepsilon=1$ .

La differenza tra la potenza termica radiante emessa e quella assorbita da una superficie è la potenza termica netta trasmessa per irraggiamento. Quando la potenza termica radiante assorbita è maggiore di quella emessa, si dice che la superficie guadagna energia per irraggiamento; in caso contrario, si dice che la superficie perde energia per irraggiamento. La determinazione della potenza termica netta scambiata per irraggiamento tra due superfici dipende dalla proprietà delle superfici, dal loro orientamento relativo e dalle caratteristiche del mezzo tra le due superfici che irraggiano.

Nel caso di due superfici, separate da un gas che non interferisce con la radiazione, di cui una di emissività  $\varepsilon$  ed area  $A$ , a temperatura assoluta  $T_s$ , completamente contenuta dall'altra di area molto più grande (o nera); a temperatura assoluta  $T_c$ , la potenza termica netta scambiata per irraggiamento è data dalla relazione.

$$\dot{Q}_{irr} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_c^4) \quad (4.5)$$

La potenza termica netta scambiata per irraggiamento anche può essere scritta come:

$$\dot{Q}_{irr} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_c^4) = \varepsilon\sigma A(T_s^2 + T_c^2)(T_s + T_c)(T_s - T_c). \quad (4.6)$$

Si definisce

$$h_{irr} = \varepsilon\sigma(T_s^2 + T_c^2)(T_s + T_c). \quad (4.7)$$

Allora

$$\dot{Q}_{irr} = h_{irr}A(T_s - T_c). \quad (4.8)$$

Questa equazione è simile a quella descritta per la legge di Newton per la trasmissione di calore per convezione e  $h_{irr}$  è chiamato coefficiente d'irraggiamento termico.

#### 4.2.4 Resistenza termica

La resistenza termica e l'analogia elettrica possono essere usate anche per risolvere problemi di scambio termico stazionario.

Nella trasmissione di calore per conduzione per uno strato di spessore  $L$  ed area  $A$ , con una parete ad alta temperatura e l'altra a bassa temperatura abbiamo:

$$\dot{Q}_{cond} = \kappa A \frac{T_1 - T_2}{L}. \quad (4.9)$$

O

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_1 - T_2}{L/\kappa A}. \quad (4.10)$$

Possiamo fare l'analogia con la legge di ohm ed otteniamo

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond}}. \quad (4.11)$$

Dove  $R_{cond} = L/\kappa A$  è chiamata resistenza termica di conduzione e viene misurata con l'unità  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ .

La resistenza termica anche può essere definita per trasmissione di calore per convezione ed irraggiamento. Dalla legge di Newton per la trasmissione di calore

$$\dot{Q}_{conv} = h A (T_s - T_{\infty}). \quad (4.12)$$

Può essere scritta come

$$\dot{Q}_{conv} = \frac{(T_s - T_{\infty})}{1/h A}. \quad (4.13)$$

L'analogia con la legge di ohm

$$\dot{Q}_{conv} = \frac{(T_s - T_{\infty})}{R_{conv}}. \quad (4.14)$$

$R_{conv} = 1/h A$  sarà chiamata resistenza termica di convezione. Si può osservare che la resistenza termica è inversamente proporzionale al coefficiente convettivo ed all'area superficiale esposta.

Finalmente per la trasmissione di calore per irraggiamento tra due superfici, separate da un gas che non interferisce con la radiazione, una a temperatura assoluta  $T_s$ , completamente contenuta dall'altra di area molto più grande (o nera); a temperatura assoluta  $T_c$

$$\dot{Q}_{irr} = h_{irr}A(T_s - T_c). \quad (4.15)$$

Dove  $h_{irr} = \epsilon\sigma(T_s^2 + T_c^2)(T_s + T_c)$

$$\dot{Q}_{irr} = \frac{(T_s - T_c)}{1/h_{irr}A}. \quad (4.16)$$

Se viene scritta come

$$\dot{Q}_{irr} = \frac{(T_s - T_c)}{R_{irr}}. \quad (4.17)$$

Con  $R_{irr} = 1/h_{irr}A$  chiamata resistenza termica d'irraggiamento.

### 4.3 Tecnologie per il raffreddamento di sistemi elettronici.

#### 4.3.1 Resistenza termica di contatto e materiali termoconduttivi d'interfaccia.

Il perfetto contatto tra due strati richiede che ogni punto del primo strato sia in contatto con un corrispondente punto nella superficie del secondo strato. Questo è solo possibile se entrambe le superfici sono perfettamente lisce o se ci sono vincoli tipo chimico che creano un vincolo molecolare tra le particelle di entrambi gli strati. Nonostante, non importa quanto possano sembrare due superfici lisce di essere in perfetto contatto, ci sono rugosità microscopiche che fanno sì che questo contatto non avvenga di questa maniera. Di fatto, nel contatto tra due superfici si trovano spazi di aria. Si sa che l'aria è un povero conduttore di calore, quest'aria tra le due superfici crea una resistenza termica in contro il trasferimento di calore. La resistenza per unità di area di contatto è chiamata resistenza termica di contatto,  $R_c$ , ed è misurata in  $(^{\circ}\text{C}/\text{W})/\text{m}^2$  o  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ .

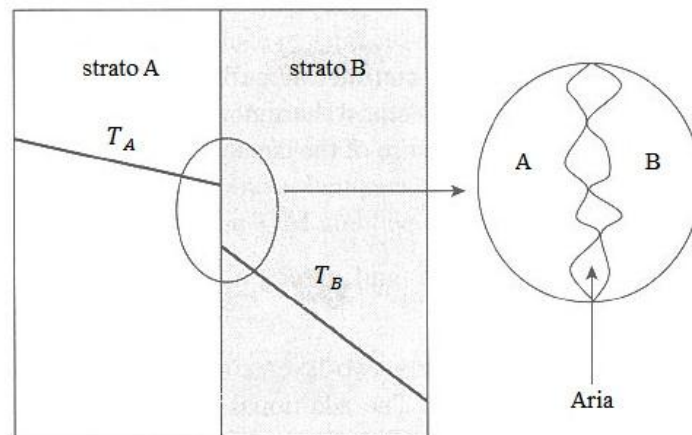


Figura 4.5. Resistenza termica di contatto

In un contatto reale tra due superfici la variazione di temperatura tra uno strato e l'altro presenta una discontinuità, a differenza di un contatto ideale, dove le superfici sono perfettamente in contatto dove i due strati hanno la stessa temperatura nel punto di contatto. Se  $R_c$  e  $A$  sono la resistenza termica di contatto e l'area superficiale d'interfaccia, la resistenza termica d'interfaccia è definita come:

$$R_{int} = \frac{R_c}{A} \quad (4.18)$$

E la variazione di temperatura attraverso l'interfaccia è

$$\Delta T_{int} = \dot{Q} \cdot R_{int} = \dot{Q} \cdot \frac{R_c}{A} \quad (4.19)$$

Dove  $\dot{Q}$  è la potenza termica trasmessa attraverso l'interfaccia.

La potenza termica trasmessa attraverso l'interfaccia può essere espressa per un'equazione simile a quella della legge di raffreddamento di Newton:

$$\dot{Q} = h_c A \Delta T_{int} \quad (4.20)$$

Dove  $h_c$  è chiamata la conduttanza termica di contatto dell'interfaccia ed è misurata in  $W/^\circ C \cdot m^2$ .

D'accordo con SHABANY (2010), la resistenza termica d'interfaccia riduce significativamente la potenza trasmessa ed incrementa la differenza di temperatura tra due strati e questo è un fenomeno non voluto in applicazioni per il raffreddamento di dispositivi elettronici. Una maniera per ridurre questa resistenza termica è inserire materiali morbidi, adattabilità, e con alta conduttività termica tra le due superfici in contatto. Tali materiali, chiamati materiali termoconduttivi d'interfaccia (*thermal interface materials*, TIM), rimpiazzano la maggioranza degli spazi d'aria tra le due superfici. Dato che la conduttività termica dei materiali d'interfaccia è più grande da uno o due ordini di grandezza che la conduttività termica dell'aria, questo porterà ad una riduzione della resistenza termica d'interfaccia.

I materiali termoconduttivi d'interfaccia sono fatti a base di materiali morbidi che sono riempiti di particelle termicamente conduttive. La tipica base di questi materiali sono silicio, olii d'idrocarburo, gomme, resina epossidica, e cere. Normalmente, i ripieni sono ossido d'alluminio, ossido di magnesio, nitrato di alluminio, nitrato di boro, e diamante. Esempi comuni di questi materiali sono i grassi e paste termoconduttive, tappetini termoconduttivi, nastri termicamente conduttivi, *phase-*

*change materials*, adesivi termicamente conduttivi, saldatura e leghe di bassa fusione.

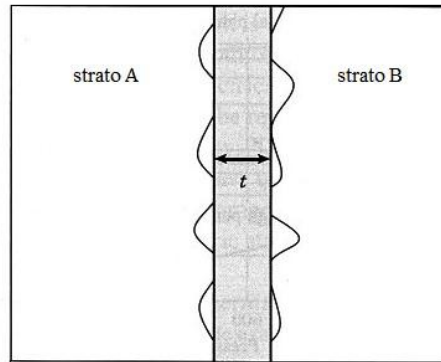


Figura 4.6. Materiale termoconduttivo d'interfaccia di spessore  $t$  tra due superfici.

I materiali termoconduttivi d'interfaccia riducono gli spazi d'aria tra due superfici. Tuttavia, loro non eliminano completamente questi spazi. Infatti, ci saranno delle resistenze d'interfaccia nelle due facce del TIM dovute agli spazi tra questo e le superfici alle quali è attaccato. Quindi, la resistenza termica effettiva di un materiale termoconduttivo d'interfaccia inserito tra due strati è la somma della resistenza termica del TIM,  $R_{bulk}$ , che è una resistenza termica conduttiva, e le resistenze tra il TIM ed i due strati,  $R_{int,1}$  e  $R_{int,2}$ :

$$R_{TIM} = R_{bulk} + R_{int,1} + R_{int,2} \quad (4.21)$$

$$R_{TIM} = t/kA + R_{int,1} + R_{int,2} \quad (4.22)$$

$t$ ,  $k$  e  $A$  sono lo spessore compreso (*bond-line thickness*), conduttività termica e l'area del TIM.

Le principali caratteristiche dei materiali termoconduttivi d'interfaccia sono:

- Conduttività termica: si scelgono materiali d'interfaccia con alta conduttività termica per ridurre la resistenza termica d'interfaccia. La resistenza termica di un TIM è inversamente proporzionale alla conduttività termica.

- Adattabilità: materiali d'interfaccia più morbidi e più malleabili si adattano meglio con le rugosità della superficie, lasciando meno spazi d'aria, e le resistenze d'interfaccia ( $R_{int}$ ) sono più basse.
- Spessore: la conduzione o la resistenza termica di un TIM è proporzionale allo spessore allora materiali più sottili sono richiesti per ridurre la resistenza termica.
- Modulo di elasticità: è la misura della resistenza meccanica di un materiale d'interfaccia e la quantità di pressione richiesta per comprimere questo materiale. Se il modulo di elasticità del TIM è basso, questo richiede una pressione minore per il riempimento degli spazi d'aria tra le superfici in contatto. Pressioni più basse riducono il rischio di danneggiamento dei dispositivi.
- Rigidità dielettrica: I materiali termoconduttivi d'interfaccia possono o no essere elettricamente isolanti. La rigidità dielettrica è la misura isolamento elettrico di un materiale d'interfaccia. Se una o entrambe le superficie sono caricate elettricamente, queste devono essere isolate elettricamente una dall'altra, in questo caso è richiesta una rigidità dielettrica alta del TIM.
- Stabilità nel tempo ed affidabilità: I materiali termoconduttivi d'interfaccia sono sottoposti a cicli di temperatura e devono sopravvivere a condizioni di operazioni severe. I TIM devono mantenere le sue proprietà come la conduttività termica, il modulo di elasticità e la rigidità dielettrica entro limiti accettabili lungo la loro vita.
- Semplice di usare e riutilizzabili: I materiali termoconduttivi d'interfaccia devono essere facile da usare ed applicare. Se un processo di riparazione richiedesse l'accesso ad una delle superficie, sarebbe piacevole poter rimuovere il materiale d'interfaccia e riporlo alla fine del processo.

### 4.3.2 Resistenza termica di diffusione

L'assunzione di trasmissione di calore unidirezionale è una buona approssimazione quando la dimensione nella direzione di trasmissione di calore è piccola in comparazione con le dimensioni nelle altre due direzioni, e la fonte di calore ed il dissipatore hanno la stessa area. Inoltre, nella maggioranza delle situazioni il calore è trasmesso da una piccola fonte di calore ad un dissipatore molto più grande. Il flusso di calore in questa situazione è fortemente tri direzionale, ed un'analisi unidirezionale introdurrebbe errori significativi. Tuttavia, anche in questa situazione, è utile se è definita una resistenza termica equivalente unidirezionale. Questa resistenza è una resistenza termica di conduzione basata nello spessore, la conduttività termica, è l'area superficiale del dissipatore. Questa resistenza addizionale è chiamata resistenza termica di diffusione o resistenza termica di costrizione, dipendendo da se il dissipatore è più grande o più piccolo della sorgente di calore.

Se consideriamo il caso di una fonte di calore circolare di radio  $r_1$  attaccata ad una piazzola circolare (dissipatore), di radio  $r_2$ , spessore  $t$  e conduttività termica  $k$ . Il calore esce dalla superficie superiore del dissipatore che è esposta ad un flusso di temperatura  $T_\infty$  ed ad un coefficiente di trasmissione di calore per convezione uniforme  $h$ . tutte le altre superfici sono isolate. Se  $T_{max}$  e  $T_\infty$  sono la massima temperatura della sorgente di calore e temperature dell'ambiente rispettivamente e  $\dot{Q}$  è la potenza dissipata dalla sorgente, la resistenza termica tra sorgente ed ambiente è definita come

$$R_{tot} = \frac{T_{max} - T_\infty}{\dot{Q}} \quad (4.23)$$

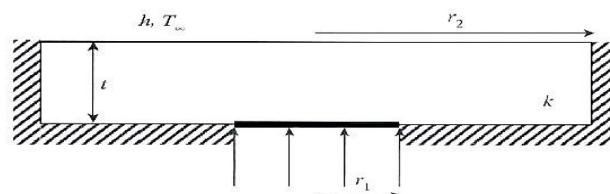


Figura 4.7. Resistenza termica di diffusione



La resistenza termica totale è considerata la somma de la resistenza termica per conduzione unidirezionale della piazzola di dissipazione, la resistenza termica di diffusione della piazzola e la resistenza termica per convezione,

$$R_{tot} = R_{cond} + R_{diff} + R_{conv}, \quad (4.24)$$

$$R_{tot} = \frac{t}{\pi k r_2^2} + R_{diff} + \frac{1}{\pi h r_2^2} \quad (4.25)$$

Dove  $\pi r_2^2$  è l'area superficiale della piazzola di dissipazione. LEE (1995) mostra la seguente approssimazione per la resistenza termica di diffusione

$$R_{diff} = \frac{(1-\varepsilon)\phi}{\pi k r_1} \quad (4.26)$$

Dove

$$\phi = \frac{\tanh(\lambda\tau) + \frac{\lambda}{Bi}}{1 + \frac{\lambda}{Bi} \tanh(\lambda\tau)}, \quad \lambda = \pi + \frac{1}{\varepsilon\sqrt{\pi}}, \quad Bi = \frac{h r_2}{k}, \quad \tau = \frac{t}{r_2}, \quad \varepsilon = \frac{r_1}{r_2}. \quad (4.27)$$

L'equazione è stata derivata per sorgente di calore e dissipatore circolari, questa può essere usata per calcolare la resistenza termica di diffusione di una fonte di calore quadrata con area superficiale  $A_c$  e piazzola de dissipazione con area superficiale  $A_s$  se  $r_1$  e  $r_2$  sono definiti come

$$r_1 = \sqrt{\frac{A_c}{\pi}} \quad e \quad r_2 = \sqrt{\frac{A_s}{\pi}} \quad (4.28)$$

È importante risaltare che queste equazioni per la resistenza termica di diffusione sono valide solo per la geometria e condizioni di contorno imposte per questa deduzione.

### 4.3.3 Alette di raffreddamento

La strada comunemente più impiegata per incrementare l'area della superficie di scambio è di installare delle superfici estese chiamate alette. Trattasi di solidi di forma geometrica ben definita che protendono dalla superficie primaria verso l'ambiente. Esse possono essere diritte o circolari: le prime sono dei solidi generati da una semplice traslazione di una superficie piana, le seconde sono solidi generati dalla rotazione di una superficie piana intorno ad un asse in generale coincidente con quello del corpo cui è attaccata l'aletta. Questi dispositivi, prodotti per estrusione, saldatura o avvolgendo un sottile foglio metallico su una superficie, favoriscono lo scambio termico esponendo allo scambio termico una superficie di area maggiore.

La trattazione dei sistemi alettati si basa generalmente sulle seguenti ipotesi semplificative:

1. flusso termico e distribuzione di temperatura indipendenti dal tempo (regime stazionario);
2. materiale omogeneo ed isotropo con conducibilità termica uniforme;
3. assenza di generazione di energia termica;
4. conduttanza superficiale unitaria  $h = h_{conv} + h_{irr}$  costante ed uniforme lungo tutta la superficie di scambio;
5. temperatura dell'ambiente circostante uniforme e costante;
6. temperatura uniforme alla base dell'aletta;
7. resistenza di contatto superficie-aletta trascurabile

Si consideri pertanto un'aletta diritta a sezione costante  $A_c$  esposta ad un ambiente uniforme alla temperatura  $T_\infty$ .

Nonostante le ipotesi semplificative, la presenza di scambi termici convettivo-radiativi sulla superficie esterna dell'aletta determina la presenza di una componente trasversale conduttiva non nulla all'interno della stessa. Tuttavia, assumendo un'elevata conducibilità termica del materiale costituente, il sistema è possibile ritenere nulli tali apporti in modo tale che il problema di trasmissione di calore si riduca all'individuazione di un campo stazionario monodimensionale.

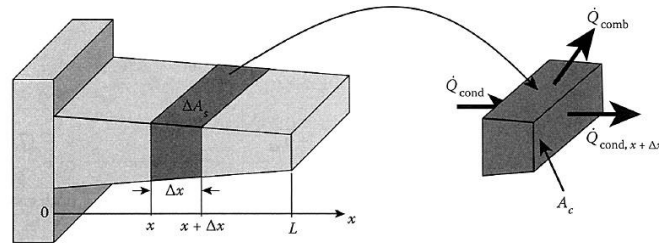


Figura 4.8. Alette di raffreddamento

Consideriamo il tratto della sbarra compreso tra la sezione trasversale all'ascissa  $x$  e quella, infinitamente vicina, all'ascissa  $x+\Delta x$ . Utilizzando il principio della conservazione dell'energia, scriviamo il bilancio dell'energia a regime, supponendo che non vi siano nella sbarra sorgenti termiche:

$$\dot{Q}_{cond,x} = \dot{Q}_{cond,x+\Delta x} + \dot{Q}_{comb}. \quad (4.29)$$

Dove  $\dot{Q}_{cond,x}$  e  $\dot{Q}_{cond,x+\Delta x}$  indicano il flusso termico conduttivo nella sbarra all'ascissa  $x$  e all'ascissa  $x+\Delta x$ , e  $\dot{Q}_{comb}$  il flusso termico attraverso la superficie laterale compresa tra le due sezioni e rappresenta la combinazione tra il flusso convettivo e quello dovuto all'irraggiamento.

Se  $A$  è la superficie laterale compresa tra le due sezioni, abbiamo:

$$\dot{Q}_{cond,x+\Delta x} - \dot{Q}_{cond,x} + h\Delta A(T - T_\infty) = 0. \quad (4.30)$$

Dividendo questa equazione tra  $\Delta x$

$$\frac{\dot{Q}_{cond,x+\Delta x} - \dot{Q}_{cond,x}}{\Delta x} + h \frac{\Delta A}{\Delta x} (T - T_\infty) = 0. \quad (4.31)$$

Prendo il limite dell'equazione come  $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{d\dot{Q}_{cond}}{dx} + h \frac{dA}{dx} (T - T_\infty) = 0. \quad (4.32)$$

Con  $\dot{Q}_{cond} = -kA_c dT/dx$

$$\frac{d}{dx} \left( kA_c \frac{dT}{dx} \right) - h \frac{dA}{dx} (T - T_\infty) = 0. \quad (4.33)$$

Consideriamo un caso semplificato, dove la conduttività termica e la sezione trasversale sono costanti. Assumendo il perimetro anche costante  $A=PL$  e  $\frac{dA}{dx} = P$ , otteniamo:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hP}{kA_c}(T - T_\infty) = 0. \quad (4.34)$$

Poniamo una variabile indipendente  $\theta = T - T_\infty$  ed introduciamo un nuovo parametro  $a = \sqrt{hP/kA_c}$ , otteniamo la seguente forma semplificata:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - a^2\theta = 0. \quad (4.35)$$

Questa è l'equazione per una sbarra con conduttività termica, a sezione trasversale e perimetro costante. L'equazione è un'equazione differenziale lineare, omogenea e del secondo ordine. La soluzione per questa è:

$$\theta = C_1 e^{ax} + C_2 e^{-ax}, \quad (4.36)$$

Per particularizzare la soluzione si devono applicare le condizioni ai limiti, che permettono determinare le due costanti  $C_1$  e  $C_2$ .

$$T(x=0) = T_b \quad \text{o} \quad \theta(x=0) = \theta_b = T_b - T_\infty$$

$$T(x=L) = T_\infty \quad \text{o} \quad \theta(x=L) = 0 \quad \text{con} \quad L \rightarrow \infty$$

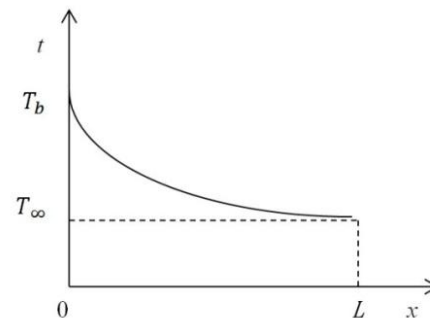


Figura 4.9. Condizioni ai limiti

La seconda condizione comporta la nullità della costante  $C_1$ .

Dalla prima condizione otteniamo:

$$\theta_b = C_2 e^{-ax} \Rightarrow C_2 = \theta_b \quad (4.37)$$

La soluzione per una sbarra di lunghezza infinita con conduttività termica, a sezione trasversale e perimetro costante che è sottoposta ad un ambiente con temperatura e coefficiente di trasmissione costante è:

$$\theta = \theta_b e^{-ax} \quad \text{o} \quad T - T_\infty = (T_b - T_\infty) e^{-ax} \quad (4.38)$$

È possibile ora determinare un'espressione per il flusso termico che complessivamente la barra disperde verso l'ambiente. Per l'ipotesi fatta di regime permanente questo flusso termico è uguale al flusso termico entrante nella sbarra attraverso la sezione di radice ( $x=0$ ). Nel caso della sbarra di lunghezza infinita troviamo

$$\dot{Q}_{sbarr} = -KA_c \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = (T_b - T_\infty) \sqrt{hPkA_c} \quad (4.39)$$

#### 4.3.3.1 Effettività ed efficienza della sbarra

La presenza delle alette ha l'effetto di accrescere la superficie attraverso la quale avviene la trasmissione del calore e quindi di accrescere la potenza trasmessa, a parità di salto di temperatura e di coefficiente di convezione

$$\dot{Q} = hA\Delta T \quad (4.40)$$

Questa equazione indica grossolanamente l'effetto della presenza delle alette sul flusso termico scambiato. Al crescere della lunghezza delle alette e quindi della superficie  $A$ , questa indica, a parità delle altre condizioni, un aumento di  $\dot{Q}$ . Però si deve osservare che il salto di temperatura  $\Delta T$  tra l'aletta ed il fluido è variabile e va diminuendo dalla radice all'apice dell'aletta; se si considera il valore medio sull'intera superficie dell'aletta, si riconosce che esso va diminuendo al crescere dell'altezza delle alette.

Per un'aletta prismatica indefinita che rispetti le ipotesi fatte al paragrafo precedente, il flusso termico disperso verso l'ambiente dall'intera aletta:

$$\dot{Q}_{sbarr} = (T_b - T_\infty) \sqrt{hPkA_c} \quad (4.41)$$

Per giudicare gli effetti della presenza dell'aletta, si può confrontare questo flusso termico col flusso termico  $\dot{Q}_p$  che della parete si disperderebbe in assenza dell'aletta attraverso la stessa superficie

$$\dot{Q}_p = hA_c(T_b - T_\infty) \quad (4.42)$$

Dove  $h$  è il coefficiente convettivo della parete non allettata, supposto uguale a quello sull'aletta. Risulta:

$$\frac{\dot{Q}_{sbarr}}{\dot{Q}_p} = \sqrt{\frac{kP}{hA_c}} \quad (4.43)$$

Può accadere che questo rapporto risulti minore di uno; in tal caso la presenza dell'aletta è svantaggiosa.

L'aletta è costruita di materiale con conduttività termica finita, tale come alluminio e rame. La figura 4.10 evidenzia che la caduta di temperatura in un'aletta sarà più ripida per una bassa conduttività termica e più graduale per un'alta conduttività termica. Se la conduttività termica di un'aletta fosse infinita, tutta la temperatura dell'aletta sarebbe la stessa di quella della base. Questo sarà il risultato del flusso termico massimo dell'aletta:

$$\dot{Q}_{sbarr,max} = hA_f(T_b - T_\infty) \quad (4.44)$$

Dove  $A_f$  è l'area di trasmissione di calore.

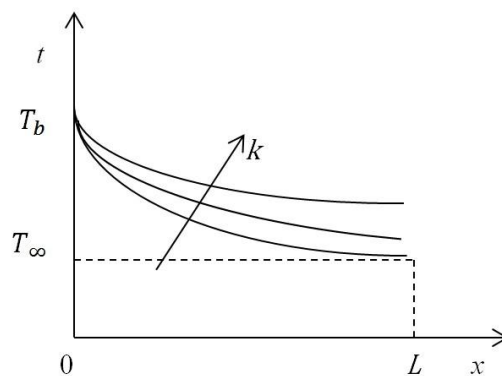


Figura 4.10. Caduta di temperatura in funzione della conduttività

L'efficienza dell'aletta è definita come:

$$\eta_{sbarr} = \frac{\dot{Q}_{sbarr}}{\dot{Q}_{sbarr,max}} = \frac{\dot{Q}_{sbarr}}{hA_f(T_b - T_\infty)} \quad (4.45)$$

Utilizzando l'equazione (4.41), per una sbarra di lunghezza infinita otteniamo:

$$\eta_{sbarr} = \frac{\dot{Q}_{sbarr}}{\dot{Q}_{sbarr,max}} = \frac{(T_b - T_\infty)\sqrt{hPkAc}}{hA_f(T_b - T_\infty)} \quad (4.46)$$

$$\eta_{sbarr} = \frac{1}{aL} \cdot \quad (4.47)$$

#### 4.3.4 Circuiti stampati

I dispositivi elettronici sono piazzati su schede di circuito stampato (PCB) e collegati attraverso gli strati a livelli del circuito stampato.

I PCB hanno una struttura a multistrati complessa con strati di rame con alta conduttività termica intramezzati tra strati di dielettrici e vetroresina epossidica di bassa conduttività termica.

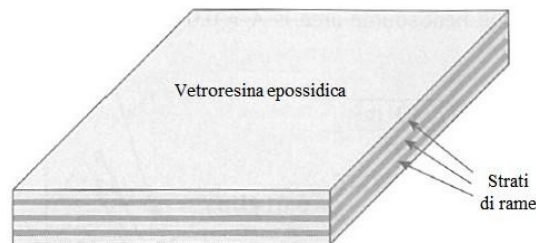


Figura 4.11. Struttura PCB

La conduttività termica del rame è mille volte più grande dalla conduttività termica della vetroresina epossidica. Questa differenza tra le conduttività termica d'entrambi materiali fa sì che la conduttività termica dell'intero PCB sia fortemente anisotropa. Questa proprietà viene dal fatto che la maggior parte del calore che arriva ad uno strato di rame è trasmesso in direzione laterale dentro lo strato di rame stesso invece di essere trasmesso direttamente attraverso gli strati di rame e FR4. Questo evidenzia

la proprietà di trasmissione di calore ortotropica del PCB, e la differenza tra la conduttività termica in direzione planare e quella in direzione normale

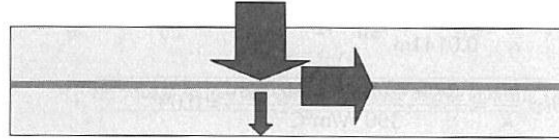


Figura 4.12. conduttività PCB

Con quello che rispetta alla costruzione, il circuito stampato avrà sempre uno spessore complessivo di 1,6 mm. Come valori di conduttività termica per il rame prendiamo  $k_{Cu} = 390 \text{ W/mK}$  e per il dielettrico  $k_{FR4} = 0,5 \text{ W/mK}$ . La conduttività termica delle lacche è compresa tra 0,2 e 0,3 W/mK (da 20 a 30 $\mu$ ). Ogni strato in rame ha uno spessore di 35 $\mu$ m. Gli strati segnale sono rivestiti di rame solo in parte, per via delle strutture a pista dei conduttori. I circuiti stampati moderni hanno una componente di Cu di circa 60%. Per ogni strato calcoliamo un valore misto della conduttività termica

$$k = p \cdot k_{Cu} + (1 - p) \cdot k_{FR4} \quad (4.48)$$

Dove  $p$  è la quota di massa (inferiore al 1) di Cu nello strato. Poiché  $k_{Cu}$  è tanto superiore a  $k_{FR4}$  negli strati segnale, il secondo addendo può essere tralasciato. Gli strati di alimentazione e di massa hanno fino al 90% di Cu. I circuiti stampati sono costruiti simmetricamente, per evitare tensioni termiche.



### 4.3.5 Thermal vias

Per migliorare la trasmissione di calore attraverso lo spessore della scheda di circuito stampato possono essere aggiunti dei thermal vias, questi sono fori che percorrono tutta la scheda e sono riempiti in parte o completamente di rame. Le grandezze tipiche, secondo la tecnologia di produzione, sono indicate nella tabella 4.1.

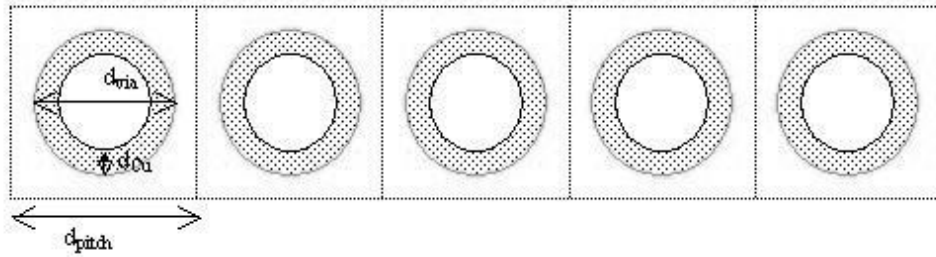


Figura 4.13. Thermal vias.

Tecnologia	$d_{via}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{Cu}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{pitch}$ [ $\mu\text{m}$ ]
Foratura meccanica	200-300	>35	500-1000
Micro Vias Laser	25-50	35	>50
Micro Vias Plasma	20-50	10-35	>20

Tabella 4.1. grandezze tipiche per Thermal Vias.

Possiamo calcolare la resistività termica attraverso lo spessore di una Via come collegamento in parallelo del campo FR4 e della superficie di rame. Questo supponendo che il foro non sia completo e che tra i fori vi sia dello FR4

$$R_{via}^{-1} = \frac{k_{FR4} \left( d_{pitch}^2 - \frac{d_{via}^2}{4} \right) \pi}{t_{board}} + \frac{k_{Cu} \left( \frac{d_{via}^2}{4} - \frac{(d_{via} - 2d_{Cu})^2}{4} \right) \pi}{t_{board}} \quad (4.49)$$

Dove  $t_{board}$  è lo spessore del circuito stampato.

Per il calcolo dell'effettiva conducibilità di un campo Via  $k_{via}$  sull'asse attraverso lo spessore si valuta

$$\frac{k_{via} d_{pitch}^2}{t_{board}} = \frac{k_{Cu} \left( \frac{d_{via}^2}{4} - \frac{(d_{via} - 2d_{Cu})^2}{4} \right) \pi}{t_{board}} \quad (4.50)$$

E si ottiene

$$k_{via} = \frac{k_{cu} \left( \frac{d_{via}^2}{4} - \frac{(d_{via} - 2d_{cu})^2}{4} \right) \pi}{d_{pitch}^2} \quad (4.51)$$

# CAPITOLO V

## VIBRAZIONE DI UN SISTEMI AD N GRADI DI LIBERTÀ

---

Uno degli aspetti caratteristici delle strutture è il suo comportamento dinamico. Le frequenze e modi propri di una struttura sono gli aspetti intrinseci della stessa che ne definiscono il suo comportamento di fronte a sollecitazione esterne. Inoltre, sé noto che, se una struttura è sottoposta a sollecitazioni armoniche di frequenza simile ad una delle sue frequenze proprie si può presentare un collasso della stessa. Per questo nasce la necessità della determinazione di queste frequenze e modi di vibrare delle strutture.

### 5.1 Analisi modale

L'analisi modale è il processo di determinare le caratteristiche dinamiche inerenti ad un sistema in forma di frequenze naturali, fattori di smorzamento e forme modale, e l'utilizzo di queste per la formulazione di un modello matematico per il suo comportamento dinamico. Questa analisi può essere realizzata in maniera sperimentale o teorica.

Nella ingegneria automobilistica, aspetti di sicurezza e di commercializzazione associati con il disegno di un veicolo obbligano a capire il meglio possibile le proprietà dinamiche di una struttura veicolare e la ripercussione di ogni cambio nel progetto. Un vivo interesse è stato posto nella combinazione di analisi modali sperimentali ed attraverso elementi finiti per componentistica automotive. Per lo sviluppo di questa tesi di laurea è d'interesse conoscere le tecniche teoriche per la realizzazione di un'analisi modale.

Di seguito è presentato l'approccio teorico per l'analisi modale un sistema conservativo ad n gradi di libertà.

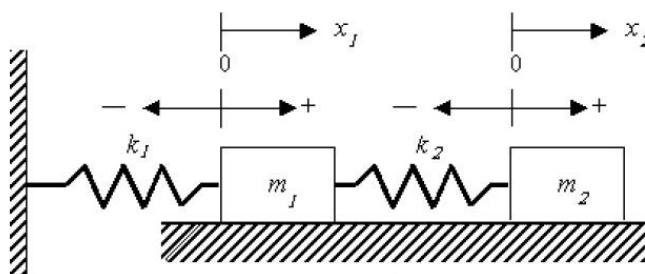


Figura 5.1. Sistema conservativo in posizione di equilibrio

L'equazione omogenea che definisce il moto libero è

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (5.1)$$

L'equazione è un sistema di equazione differenziale omogenea del secondo ordine. Queste equazione sono accoppiate, poiché almeno una delle matrice M o K si solito non è diagonale.

M è la matrice di massa del sistema.

K è la matrice di rigidezza.

x è il vettore delle coordinate generalizzate del sistema.

Si assumi una soluzione simile a quella dell'equazione omogenea nei sistemi ad un grado di libertà

$$x(t) = x_0 e^{st} \quad (5.2)$$

e si consideri un autoproblema dello stesso tipo. Poiché il sistema non è smorzato, tutte le soluzioni s sono immaginarie e l'uso della soluzione nel dominio della frequenza è opportuno.

$$x(t) = x_0 e^{i\omega t} \quad (5.3)$$

Dove  $\omega$  è la frequenza di oscillazioni e l'accelerazione è definita come

$$\ddot{x}(t) = -x_0\omega^2 e^{i\omega t} \quad (5.4)$$

Allora si ottiene la seguente equazione omogenea

$$x_0(K - \omega^2 M) = 0 \quad (5.5)$$

L'equazione caratteristica dell'autoproblema è quindi

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (5.6)$$

Che può essere ridotta in forma canonica in uno dei seguenti modi

$$\det\left(K^{-1}M - \frac{1}{\omega^2}I\right) = 0, \quad \det(M^{-1}K - \omega^2 I) = 0. \quad (5.7)$$

Entrambe le matrici  $K^{-1}M$  e  $M^{-1}K$  sono spesso definite matrice dinamica e viene usato per indicare il simbolo  $D$ .

Queste equazioni algebriche di grado  $n$  in  $\omega^2$  (or in  $1/\omega^2$ ) le cui soluzioni sono gli  $n$  valori delle frequenze proprie del sistema. Gli autovettori danno la forma modale, cioè le ampiezze di oscillazione delle varie masse alle corrispondenti frequenze proprie. Tutti gli autovettori sono reali e positivi; le frequenze proprie sono quindi reali e le oscillazioni libere del sistema non sono smorzate. Anche gli autovettori  $q_i$  sono reali, il che significa che tutte le masse si muovono in fase oppure pure con un ritardo di  $180^\circ$ . Dal momento che gli autovalori sono  $n$ , è possibile formare una matrice quadrata, la matrice degli autovettori

$$\Phi = [q_1, q_2, \dots, q_n] \quad (5.8)$$

Dove ogni colonna è uno degli autovettori.

Trasformando gli esponenziali con argomento immaginario in funzioni trigonometriche, la soluzione completa dell'equazione del moto è

$$x = \sum_{i=1}^n [\Re(K_i^*)q_i \cos(\omega_i t) - \Im(K_i^*)q_i \sin(\omega_i t)] \quad (5.9)$$

Dove le  $n$  costanti complesse  $K_i^*$  possono essere determinate dalle  $2n$  condizioni iniziali. Se al tempo  $t=0$  le posizioni  $x_0$  e le velocità  $\dot{x}_0$  sono note, si ha

$$\Re(K_i^*) = \Phi^{-1}x_0, \quad \Im(\omega_i K_i^*) = -\Phi^{-1}\dot{x}_0 \quad (5.10)$$

### PROPRIETÀ DELLE AUTOVETTORI

Gli autovettori sono ortogonali rispetto alle matrici di rigidità e di massa. Questa proprietà può essere dimostrata semplicemente scrivendo l'equazione di equilibrio dinamico nelle oscillazioni armoniche per l' $i$ -esimo modo

$$Kq_i = \omega_i^2 Mq_i \quad (5.11)$$

Può essere premoltiplicata per la trasposta del  $j$ -esimo autovettore

$$q_j^T Kq_i = \omega_i^2 q_j^T Mq_i \quad (5.12)$$

Nello stesso modo l'equazione per il  $j$ -esimo modo viene scritta e premoltiplicata per l' $i$ -esimo autovettore:

$$q_i^T Kq_j = \omega_j^2 q_i^T Mq_j \quad (5.13)$$

Sottraendo le equazioni 12 e 13 otteniamo

$$q_j^T Kq_i - q_i^T Kq_j = \omega_i^2 q_j^T Mq_i - \omega_j^2 q_i^T Mq_j \quad (5.14)$$

Ricordando che, data la simmetria delle matrici K e M

$$q_j^T K q_i = q_i^T K q_j \quad (5.15)$$

e

$$q_j^T M q_i = q_i^T M q_j \quad (5.16)$$

Ne consegue che

$$(\omega_i^2 - \omega_j^2) q_j^T M q_i = 0 \quad (5.17)$$

Nello stesso modo, si può dimostrare anche

$$\left(\frac{1}{\omega_i^2} - \frac{1}{\omega_j^2}\right) q_j^T K q_i = 0 \quad (5.18)$$

Delle equazioni 17 e 18 ne consegue che, se  $i \neq j$

$$q_i^T M q_j = 0 \quad , \quad q_i^T K q_j = 0$$

che sono le relazione che definiscono la proprietà di ortogonalità degli autovettori rispetto alle matrici rispettivamente di massa e rigidità. Se  $i = j$  i risultati degli stessi prodotti non si annullano:

$$q_i^T M q_i = \bar{M}_i \quad , \quad q_i^T K q_i = \bar{K}_i \quad (5.19)$$

Le costanti  $\bar{M}_i$  e  $\bar{K}_i$  sono rispettivamente la massa modale e la rigidità modale. Esse sono legate alle frequenze proprie della relazione

$$\omega_i = \sqrt{\frac{\bar{K}_i}{\bar{M}_i}} \quad (5.20)$$

La quale stabilisce che la  $i$ -esima frequenza propria coincide con la frequenza propria di un sistema ad un grado di libertà la cui massa è la  $i$ -esima massa modale e la cui

rigidezza è la  $i$ -esima rigidezza modale. La matrice modale delle masse e la matrice modale di rigidezza possono essere ottenute dalla seguente relazione basata sulla matrice degli autovettori  $\Phi$

$$\begin{cases} \Phi^T M \Phi = \text{diag}[\bar{M}_i] = \bar{M} \\ \Phi^T K \Phi = \text{diag}[\bar{K}_i] = \bar{K} \end{cases} \quad (5.21)$$



## 5.2 Oscillazioni forzate con eccitazione armonica

Analisi di oscillazione forzata viene eseguita per prevedere il comportamento di una struttura sotto le azioni esterne che variano secondo la legge armonica.

L'eccitazione armonica e la risposta di un sistema può essere scritta nella forma

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{f}_0 e^{i\omega t}, \quad x(t) = x_0 e^{i\omega t} \quad (5.22)$$

Introducendo la soluzione (22) dentro l'equazione (1) si ottiene

$$K_{dyn} x_0 = \mathbf{f}_0, \quad (5.23)$$

dove

$$K_{dyn} = -\omega^2 M + K. \quad (5.24)$$

È la matrice di rigidezza dinamica, che è reale e simmetrica però può essere non positiva.

$$\begin{bmatrix} K - \omega^2 M & 0 \\ 0 & K - \omega^2 M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathcal{R}(x_0) \\ \mathcal{I}(x_0) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathcal{R}(\mathbf{f}_0) \\ \mathcal{I}(\mathbf{f}_0) \end{Bmatrix} \quad (5.25)$$

Un sistema a n gradi di libertà può essere eccitato usando n forze armoniche generalizzate corrispondenti a le m coordinate generalizzate, e per ogni forza di eccitazione n risposte possono essere ottenute. La risposta in frequenza è

$$H_{ij}(\omega) = \frac{x_{0i}(\omega)}{f_{0j}} \quad (5.26)$$

E la soluzione dell'equazione del moto è:

$$x = \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{\omega_{ni}^2 - \omega^2} q_i q_i^T \right) \mathbf{f}_0 \quad (5.27)$$

# CAPITOLO VI

## METODO AD ELEMENTI FINITI

---

### 6.1 Metodo ad Elementi Finiti

il metodo degli elementi finiti, FEM, è una tecnica di discretizzazione generale per la soluzione approssimata di equazioni differenziali o integrali. Tale metodo è utilizzato in molti campi, per problemi dell'ingegneria strutturale, resistenza meccanica, meccanica dei fluidi, conduzione del calore, processi di convezione-diffusione, circuiti integrati, ingegneria del petrolio ed anche in molte altre aree.

In un corpo continuo, il numero di incognite sono infiniti. Il metodo ad elementi finiti riduce tali incogniti in un numero finito dividendo la soluzione in piccole regioni chiamati elementi ed esprimendo queste incognite in termini di funzioni approssimate dentro ogni elemento. Le funzione approssimate sono definiti in termini del campo delle variabili da un specifico punto chiamato nodo.

Il metodo degli elementi finiti coinvolge molti calcoli numerici. Perciò questo metodo non è adatto per calcoli a mano. Questo metodo è idealmente adatto per applicazioni informatiche e sono state sviluppate con lo sviluppo in computer technology. Lo sviluppo di programmi di elementi finiti richiede molto tempo. Molte università ed aziende di software hanno speso molti ore uomo per sviluppare package general purpose di elementi finiti. Questi pacchetti sono aggiornati continuamente, incorporando sempre più elementi ed aggiungendo nuovi moduli come analisi non lineari, analisi dinamiche e tecniche di ottimizzazione.

Secondo LIU, G.R (2003), la procedura di modellazione computazionale utilizzando FEM consiste sostanzialmente in quattro fasi:

1. Modellazione della geometria
2. Discretizzazione (Meshing)

3. Specificazione delle proprietà del materiale
4. Specificazione delle condizioni di contorno, condizioni iniziali e sollecitazioni.

#### 6.1.1 Modellazione della geometria

Dipendendo del software utilizzato, ci sono molti modi per creare una geometria appropriata per realizzare la discretizzazione. Interfacce grafiche sono spesso utilizzate per aiutare nella creazione e manipolazione di oggetti geometrici. Ci sono numerosi pacchetti software di Computer Aided Design (CAD) utilizzate per la progettazione in ingegneria in grado di produrre file che contengano la geometria progettata. Questi file possono solitamente essere letti dai pacchetti di analisi a FEM, che possono risparmiare significativamente tempo durante la creazione dei modelli. Tuttavia, in molti casi, modelli complessi letti direttamente da un file CAD possono avere bisogno di essere modificati e semplificati prima di eseguire la discretizzazione.

Conoscenza, esperienza ed ingegneristica sono molto importanti nel modellare la geometria di un sistema. In molti casi, le caratteristiche geometriche finemente dettagliate giocano soltanto un ruolo estetico, e hanno effetti trascurabili sulle prestazioni del sistema ingegneristico. Queste caratteristiche possono essere cancellati, ignorati o semplificate.

#### 6.1.2 Meshing

Il meshing è eseguito per discretizzare la geometria creata in piccoli pezzi chiamati elementi o celle

La generazione della mesh è un compito molto importante e può prendere molto tempo per essere realizzata ed è necessario avere l'esperienza per produrre una mesh credibile per un problema complesso. Il dominio deve essere discretizzato in forme specifiche come triangoli e quadrilateri. Informazione, tale come la connessione tra elementi, dovrebbe essere creata durante la discretizzazione per dopo essere utilizzata per la generazione dell'equazione.

### 6.1.3 Specificazione delle proprietà del materiale

Molti sistemi ingegneristici sono costituiti da più di un tipo di materiale. Le proprietà dei materiali possono essere definite per gruppo di elementi o per ogni elemento. Per simulare differenti fenomeni e sono richiesti differenti set di proprietà dei materiali. Per esempio, per analisi di stress nei solidi e strutture è necessario il modulo di Young ed il modulo di taglio, mentre per analisi termiche è richiesto il coefficiente di conduttività termica.

### 6.1.4 Specificazione delle condizioni di contorno, condizioni iniziali e sollecitazioni

Condizioni di contorno, condizioni iniziali e sollecitazioni giocano un ruolo decisivo in la soluzione del problema. Di nuovo, per simulare accuratamente queste condizioni è necessaria l'esperienza, conoscenze e giudizio ingegneristico.

## 6.2.Simulazione

### 6.2.1 Sistema de equazione discreto

Basato nella mesh generata, un set di sistemi simultanei di equazioni discreti sono formulati utilizzando approcci esistenti. Ci sono pochi tipi di approcci per stabilire queste equazioni. Il primo è basato in principi dell'energia, come il principio di Hamilton, il principio della minima energia potenziale, ecc. Il secondo approccio è basato sul metodo dei residui pesati. Il terzo è basato sulle serie di Taylor, del quale deriva il tradizionale metodo delle differenze finite. Il quarto approccio è basato sul controllo delle leggi di conservazione su ogni volume finito in un dominio. Nel metodo dei volumi finiti è utilizzato quest'approccio. Altro approccio è la rappresentazione integrale. Nella pratica ingegneristica i due primi metodi sono utilizzati spesso in solidi e strutture, mentre che gli altri due sono utilizzati in simulazione del flusso dei fluidi. Si può fare menzione ma senza entrare in dettaglio che il fondamento matematico di questi tre approcci ed il metodo dei residui.

### 6.2.2 Risolutore di equazioni

Dopo che il modello computazionale è stato creato, questo è inserito dentro un solver per la soluzione del sistema discretizzato. Questo è il processo più esigente per l'hardware. I vari programmi utilizzano differenti algoritmi, che dipendono del tipo di fenomeno fisico ad essere simulato. Ci sono due considerazioni molto importanti quando si deve scegliere un algoritmo per la soluzione di un sistema di equazioni: la memoria richiesta ed il CPU time richiesto.

Ci sono due tipi principali di metodi per la soluzione dei sistemi di equazioni: metodi diretti e metodi iterativi. I metodi diretti comunemente utilizzati sono il metodo di eliminazione di Gauss ed il metodo di decomposizione LU. Questi metodi funzionano bene per sistemi di equazione relativamente piccoli. Metodi diretti lavorano in sistemi di equazioni completamente assemblati, quindi richiedono di uno spazio grande di memoria. Si può codificare il sistema in maniera che l'assemblaggio dell'equazione sia fatto solo negli elementi coinvolti dentro dell'attuale fase della soluzione, riducendo così i requisiti di memoria.

I metodi iterativi utilizzati sono il metodo di Gauss-Jacobi, il metodo Gauss-Seidel, il metodo SOR, il metodo dei residui coniugati, e così via. Questi metodi lavorano bene con sistemi relativamente grandi.

## CAPITOLO VII

### DEFINIZIONE DELLE TIPOLOGIE DI ANALISI DA EFFETTUARE DERIVANTI DALLA MATRICE DI FMEA

---

La centralina di controllo CFC 400 per il sistema meccatronico rappresenta una nuova sfida nell'ambito della progettazione di questa tipologia di sistemi, dovuta ai possibili problemi emergenti dal fatto che il sistema viene spostato in un ambiente caratterizzato da alte temperature e soprattutto da vibrazioni prodotte dal corpo trasmissione e motore.

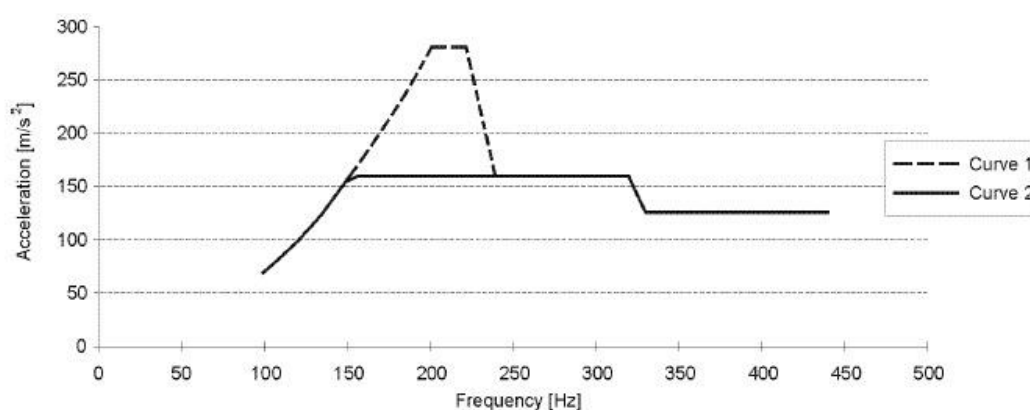
Per la corretta progettazione del prodotto è fondamentale seguire una serie di passi che portano ad ottenere un prodotto di alta qualità ed ottimizzazione dei costi. Con questo si genera la necessità di fare delle analisi del dispositivo in fase di progetto tramite programmi di calcolo, così da ridurre le tempistiche ed i costi di progettazione ed ottimizzazione.

Lo scopo della tesi di laurea è contribuire alla corretta progettazione della centralina elettronica CFC400 per AMT Meccatronica evidenziando attraverso le analisi termiche e strutturali le potenziali problematiche emerse dall'analisi della matrice di FMEA e proporre le eventuali possibili ottimizzazioni atte a migliorare le performance funzionali nel rispetto di parametri e costi di progetto.

Per realizzare queste analisi sono stati messi a disposizione da Magneti Marelli Powertrain due software, FloTHERM e ANSYS Workbench, rispettivamente per l'analisi termica e per l'analisi di vibrazione.

Le specifiche di utilizzo ed i dati ambientali alle quali sarà sottoposta la centralina CFC 400, sono fornite dalla casa costruttrice:

1. Profilo Temperatura al quale sarà sottoposta la centralina è  $-40^{\circ}\text{C} + 115^{\circ}\text{C}$  con flusso convettivo a  $1 \text{ m/s}$ .
2. Il profilo di vibrazione sinusoidale per un corpo vincolato al sistema motore/cambio, secondo la specifica **GMW3172** è:



Frequency – Hz	Envelope 1		Envelope 2	
	Maximum Displacement – mm	Maximum Acceleration – $\text{m/s}^2$	Maximum Displacement – mm	Maximum Acceleration – $\text{m/s}^2$
100	0.177	-	0.177	-
151	-	-	-	160
200	-	280	-	-
220	-	280	-	-
240	-	160	-	-
320	-	160	-	160
340	-	125	-	125
440	-	125	-	125

Figura 7.1. Vibrazioni sinusoidali, motore/cambio.

Inoltre, dall'analisi FMEA sono stati rilevati possibili rischi associati alla dissipazione nella scheda elettronica del CFC400 (Figura 7.2). Questi rischi sono legati ai seguenti aspetti:

- Spessore del dissipatore: si deve garantire che lo spessore scelto in fase di progetto (2.5 mm), riesca a trasferire efficientemente il calore .
- Thermal resin: per il CFC400 è stato selezionato un grasso termoconduttivo d'interfaccia che non era stato utilizzato prima.

Attraverso le analisi termiche e prendendo in considerazione i dati di progetto, si potrà rilevare se questi garantiscano il corretto funzionamento della centralina.



MECHANICAL DESIGN FMEA PROJECT: CFC400X - AMT												
FUNCTION REFERENCE	ELEMENTARY FUNCTION	POTENTIAL FAILURE MODE	POTENTIAL EFFECTS ON VEHICLE	POTENTIAL FAILURE CAUSES	MISSING DESIGN CHARACTERISTICS or ITEMS CAUSE FAILURE	DESIGN CRITERIA USED and VALUES ASSIGNED	VALIDATION LEVEL	KEY CHARACTERISTICS	CURRENT STATE			
									S	D	RPN	
E-1	to guarantee the DISSIPATION (HEATSINK provides the heat transfer from PCB to environment)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive temperature due to insufficient dissipation	vehicle stop (hydraulic pump never activated)	Unable to dissipate sufficient power due to inappropriate HEATSINK thickness specified	HEATSINK thickness dimension	2,5 mm. [MM cod. PM.0113768]	NEW SOLUTION		Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR_MTA.R01) Dimensional verify	8	2	48
										8	3	72
F-1	to guarantee the DISSIPATION (THERMAL RESIN ensures the thermal transfer to the heatsink of the heat generated by the PCB components)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive temperature due to insufficient dissipation	vehicle stop (hydraulic pump never activated)	Unable to dissipate sufficient power due to incorrect contact between PCB and HEATSINK due to incorrect HEATSINK-PCB air gap unable to achieve good contact with PCB	THERMAL RESIN thickness	0,2 (0 / -0,2mm) [MM cod. 00103009]	NEW SOLUTION		Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR_MTA.R01)	8	3	72
										8	3	72
				Inappropriate material specified; unable to dissipate sufficient power	THERMAL RESIN material	THERMAL RESIN [MM cod. MI.0116257]			Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR_MTA.R01)	8	3	72
				Inappropriate material specified; dry out at high temperature					Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR_MTA.R01)	8	3	72

Figura 7.2 Matrice FMEA (DISSIPATION)

## CAPITOLO VIII

### ANALISI TERMICA

---

Partendo dalle norme di corretta progettazione per la centralina di controllo CFC 400, dei indici di criticità ottenuti dalla FMEA e delle richieste fornite dalle case costruttrici, e con il fine di ridurre costi e future problematiche dopo la fase di costruzione, è stata realizzata l'analisi termica della TCU CFC 400, utilizzando come software di simulazione FloTHERM.

#### 8.1 FloTHERM

FloTHERM è uno strumento di analisi di modelli termici, progettato per simulare gli scambi termici nei sistemi elettronici, sub-sistemi e package. Tale simulazione può essere utilizzata durante la prima fase di sviluppo per osservare gli effetti termici del componente/prodotto, prima di costruire e testare il prototipo, riducendo così i cicli di progettazione, migliorando il rendimento ed ottenendo prodotti più affidabili.

FloTHERM utilizza le tecniche conosciute come Computational Fluid Dynamics (CFD) per analizzare flussi conduttivi, convettivi e radiazione del trasferimento di calore.

L'obiettivo del CFD è fornire all'ingegnere uno strumento predittivo che consente l'analisi dei processi dei flussi d'aria che si verificano all'interno ed intorno delle apparecchiature elettroniche, con l'obiettivo di migliorare ed ottimizzare la progettazione di dispositivi nuovi o esistenti.

Come visto prima ci sono tre meccanismi di trasmissione del calore:

- Conduzione - il trasferimento di calore attraverso un fluido o solido stazionario.

- Convezione - il trasferimento di calore da una superficie in un fluido, che può essere naturale o forzata (ventole).
- Radiazione - il trasferimento di calore da una superficie all'altra.

Il flusso d'aria ed il trasferimento di calore sono regolati da leggi di conservazione che possono essere espressi in modo di equazione a derivate parziale, di conseguenza la simulazione matematica del flusso e fenomeni di scambio termico comporta la soluzione di una serie di equazioni lineare, non lineare, del secondo ordine, e derivate parziali.

FloTHERM utilizza ciò che è noto come il trattamento di variabili primitive, le variabili utilizzate sono:

- $U, v$  e  $w$ , le velocità in coordinate cartesiane nelle direzioni  $x, y$  e  $z$ .
- La pressione  $p$ .
- La temperatura  $T$  del fluido e / o di materiali solidi.

Queste variabili sono funzioni di  $x, y, z$  e del tempo.

Le equazioni differenziali che soddisfano queste variabili sono indicati come equazioni conservative. Per esempio  $u, v$  e  $w$  soddisfanno le equazioni di conservazione di quantità di moto nelle tre direzioni cartesiane. La Temperatura soddisfa l'equazione di conservazione di energia termica. La pressione non si soddisfa un'equazione di conservazione, ma è derivata dall'equazione di continuità che è una dichiarazione in forma differenziale dell'equazione della conservazione della massa (Appendice A).

Le equazioni di conservazione e le condizioni al contorno associate non possiedono una soluzione generale analitica. Esistono soluzioni particolari di equazioni per situazioni semplici (per esempio, il flusso laminare in un canale). Ma per la stragrande maggioranza dei casi d'interesse pratico, le equazioni possono essere

risolto mediante integrazione numerica. Lo CFD fornisce i mezzi d'integrazione numerica.

Nella tecnica CFD utilizzato FloTHERM, le equazioni di conservazione vengono discretizzati suddivisione il dominio d'integrazione in un insieme di non sovrapposte, volumi contigui finiti, su ciascuno dei quali sono espresse le equazioni di conservazione in forma algebrica. Questi volumi finiti sono denominati «celle della griglia», "cellule di controllo" o semplicemente come "celle".

Durante soluzione di programma, FloTHERM integra le equazioni differenziali di conservazione appartenenti su ciascuna cella della griglia computazionale, assemblando un insieme di equazioni algebriche che riguardano il valore di una variabile in una cella al suo valore nel suo vicino più prossimo.

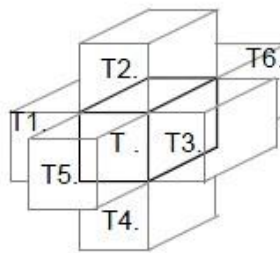


Figura 8.1. Modello assemblaggio FloTHERM

Il programma risolve le equazioni algebriche, utilizzando procedure iterative per convergere ad una soluzione dopo un numero finito d'iterazioni successive.

L' algoritmo è riassunto nel seguente esempio per una simulazione 3D del flusso ed il trasferimento di calore:

1. Inizializzare i campi di pressione, temperatura e velocità
2. Aumentare il numero d'iterazioni esterno di 1
3. Impostare coefficienti (cioè, il Cs) per il campo di temperatura, T
4. Linearizzati risolvere equazioni algebriche per il valore di T in ogni cella eseguendo un numero d'iterazioni interne
5. Ripetete 3 e 4 per le variabili di campo u, v e w

6. Risolvere le equazioni di continuità in un modo simile ed apportare le correzioni associate alla pressione e velocità
7. Verificare la presenza di convergenza e tornare al 2 se necessario.

## 8.2 Albero di progetto in FloTHERM

Il seguente albero mostra il flusso logico per la realizzazione dell'analisi.

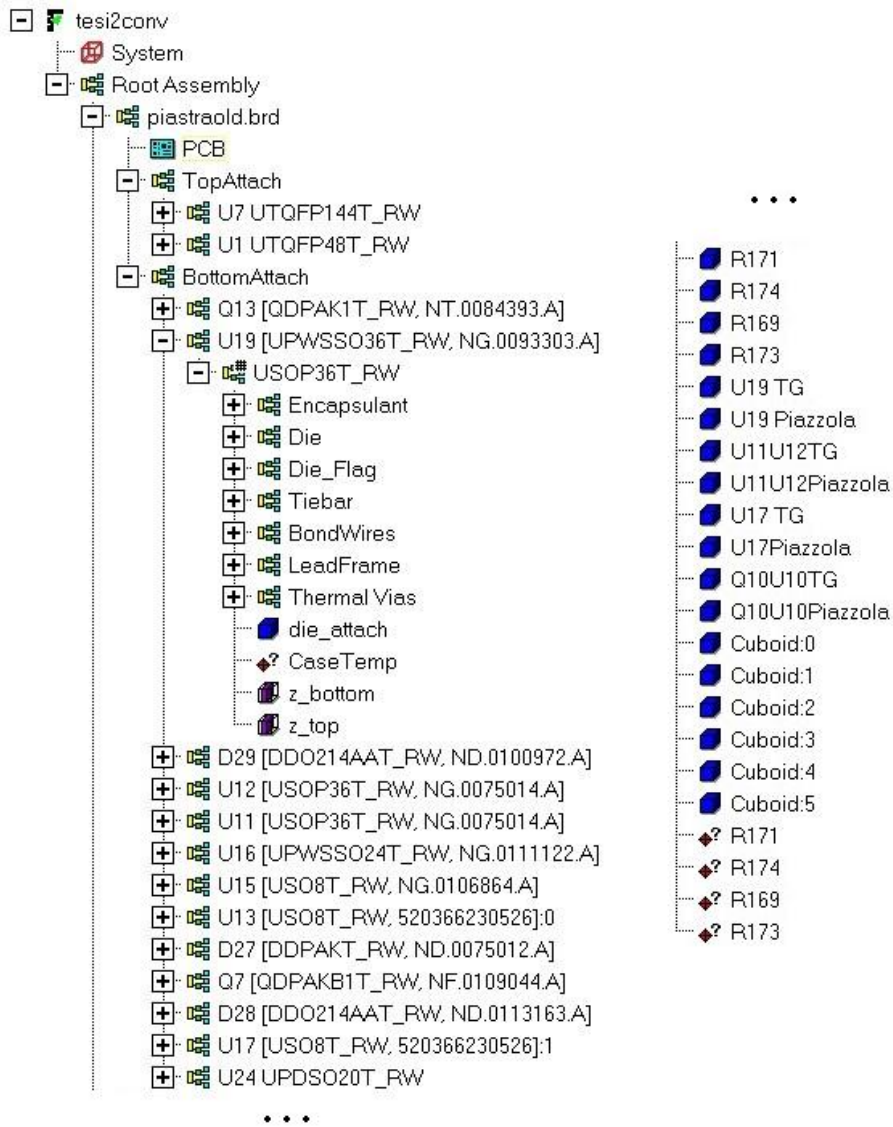


Figura 8.2. Albero di progetto in FloTHERM

### 8.2.1 Definizione della geometria

Il primo passo nella realizzazione dell'analisi in FloTHERM è la costruzione del modello. Sia dal punto di vista meccanico che elettronico. Il modello base dell'elettronica è stata fornita dai progettisti hardware, tale modello è stato importato tramite un tool specifico in FloTHERM. La parte meccanica è stata realizzata direttamente utilizzando il CAD di FloTHERM così da realizzare una geometria adatta alle nostre esigenze di calcolo.

Quando questo modello è caricato ogni componente nella geometria del PCB, rappresenta solo un cubetto solido ed è carente delle sue proprietà e struttura interna. FloTHERM ha a disposizione delle librerie che contengono dei componenti più commerciali, però nella maggioranza dei casi non sono disponibili quelli più utilizzate in questo campo di lavoro automotive e devono essere creati. L'ente di calcolo di Magneti Marelli PowerTrain nel tempo ha creato delle sue librerie aventi dei componenti necessari per l'esecuzione delle analisi.

La proprietà più importante nelle analisi termiche è la conducibilità termica dei materiali. Nella tabella 8.1 s'individua per un componente generico (Figura 8.3 e 8.4) e ogni una delle sue parti, questa proprietà

<b>Parte</b>	<b>Conducibilità [W/mK]</b>
<b>Encapsulant</b>	0,68
<b>Die</b>	117
<b>Die attach</b>	2,5
<b>Die flag</b>	157,8
<b>Tie bar</b>	157,8
<b>BondWires</b>	12
<b>Leadframe</b>	83,3

Tabella 8.1. Conducibilità termica per materiali dei componenti elettronici.

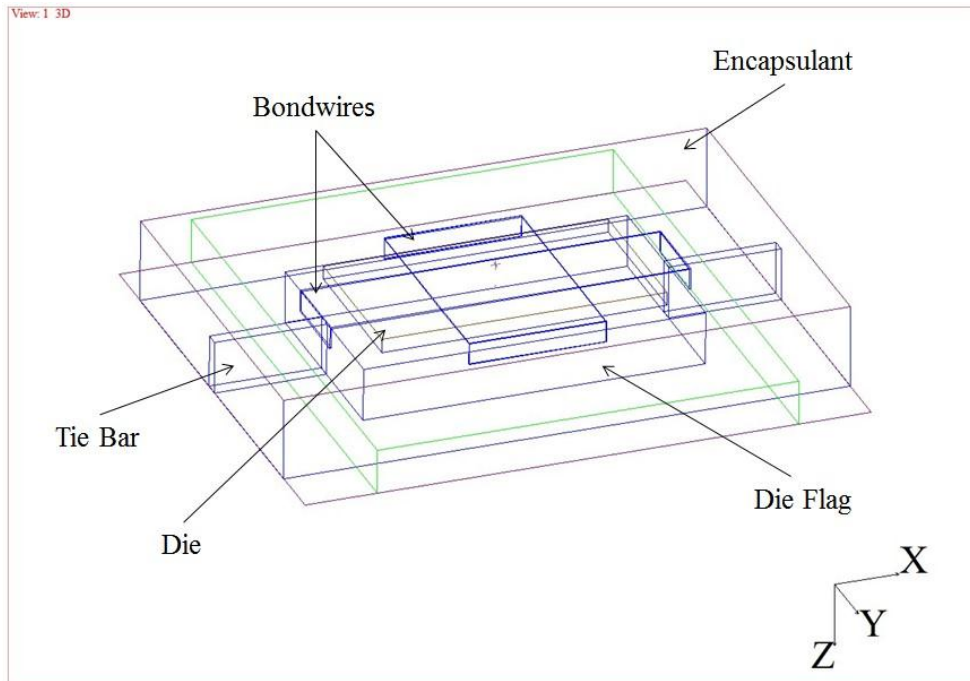


Figura 8.3. Struttura interna componente elettronico FloTHERM 1.

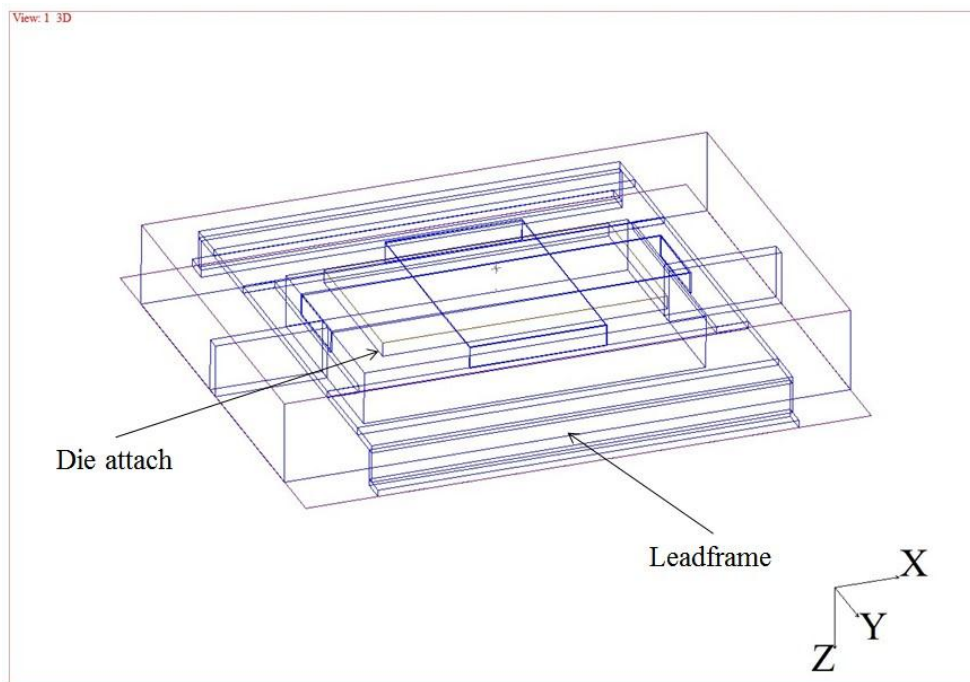


Figura 8.4. Struttura interna componente elettronico FloTHERM 2.



Questi componenti sono assemblati su di un circuito stampato e si utilizzano delle tecniche appropriate per evitare il suo riscaldamento. Per il raffreddamento della scheda elettronica del CFC 400 è stato progettato un dissipatore di alluminio che funziona anche da coperchio per la centralina, avente delle piazzole di dissipazione per i componenti che generano maggior potenza e che tendono ad avere alte temperature di funzionamento. Tra queste piazzole ed il PCB è inserito un materiale termococonduttivo d'interfaccia (Thermal Grease) per riempire i gap di aria così da aumentare la conducibilità termica. Per ultimo, sotto questi componenti sono stati progettati anche dei Thermal vias per completare il sistema di raffreddamento della scheda elettronica (figura 8.5). Nella Tabella 8.2 è riportata la conducibilità termica per ogni elemento del sistema di dissipazione e lo suo spessore, lo stesso per i materiali che compongono il PCB.

	Conducibilità [W/mK]	Spessore [mm]
<b>Dissipatore + piazzole</b>	137	2,5
<b>Thermal Grease</b>	2,3	0,2
<b>Thermal via</b>	9,1	1,634
<b>PCB</b>	<b>FR4</b>	1,634
	<b>Rame</b>	

Tabella 8.2. Conducibilità e spessore

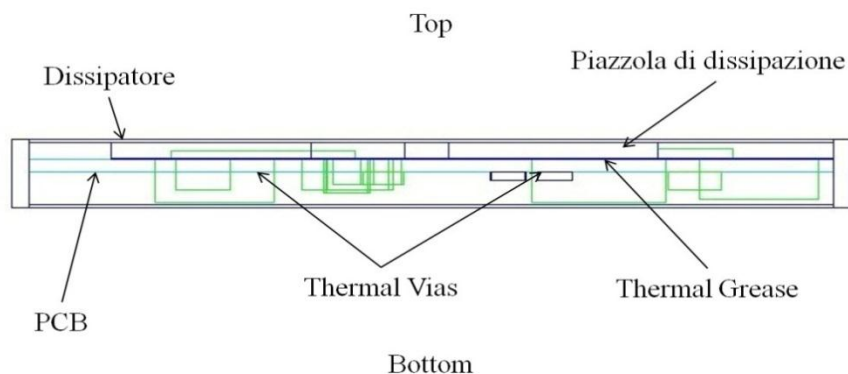


Figura 8.5. Vista laterale scheda FloTHERM.

## 8.2.2 Condizioni per l'analisi del CFC 400

Il secondo passo per l'esecuzione dell'analisi è ricreare al meglio possibile le condizioni dell'ambiente dove lavora il dispositivo e così ottenere risultati più accurati. Il menu system permette di impostare in maniera organizzata le condizioni per la soluzione.

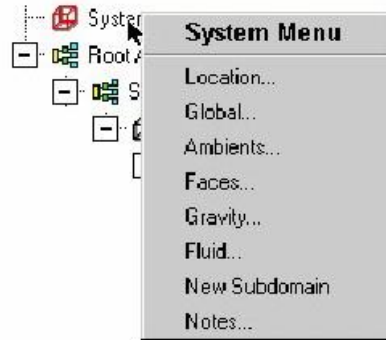


Figura 8.6. System Menu.

1. Location: è stato definito il dominio per la soluzione. Il dominio è rappresentato per lo spazio delimitato con la gabbia gialla (figura 8.7), le cui dimensioni sono riportate di seguito.

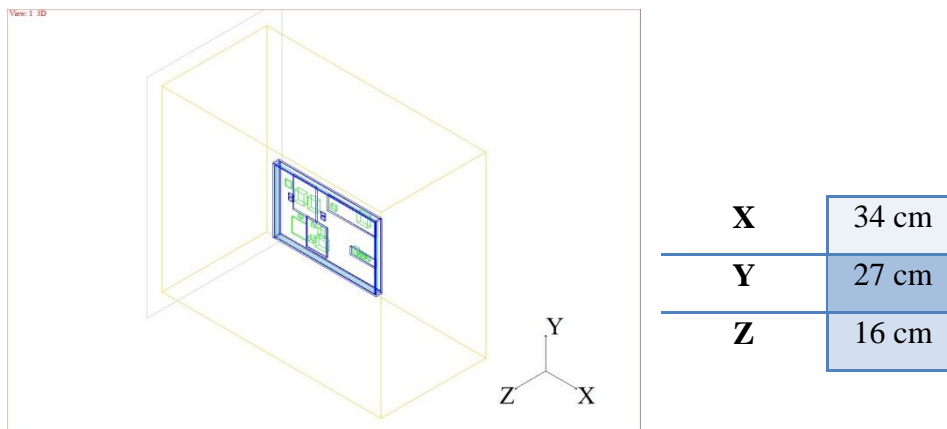


Figura 8.7. Location.

2. Global: qui sono stati definiti le condizioni ambientali globali, che sono i valori di riferimento per la soluzione.

<b>Pressione</b>	1 Atm
<b>Temperatura radiante esterna</b>	115 °C
<b>Temperatura ambiente esterna</b>	115°C

3. Ambients: sono le condizioni di contorno, valori che sono stati definiti sempre d'accordo con le specifiche fornite, sono

<b>Pressione manometrica</b>	0 Atm
<b>Temperatura ambiente</b>	115 °C
<b>Temperatura radiante</b>	115 °C

Velocità del flusso convettivo

<b>X</b>	0 m/s
<b>Y</b>	1 m/s
<b>Z</b>	0 m/s

4. Gravity: è stato necessario anche definire il valore della forza di gravità e la direzione d'incidenza.

**Gravità** 9.81 m/s<sup>2</sup> (in -Y)

5. Fluid: le proprietà del fluido, in questo caso aria a 115°C, anche sono state definite

<b>Conducibilità</b>	0,0320 W/mK
<b>Viscosità</b>	2,23e-5 N s/m <sup>2</sup>
<b>Densità</b>	0,91 Kg/m <sup>3</sup>

### 8.3 Analisi termica CFC400 PROTO B

Il layout della scheda elettronica progettata per il CFC400 PROTO B è presente di seguito:

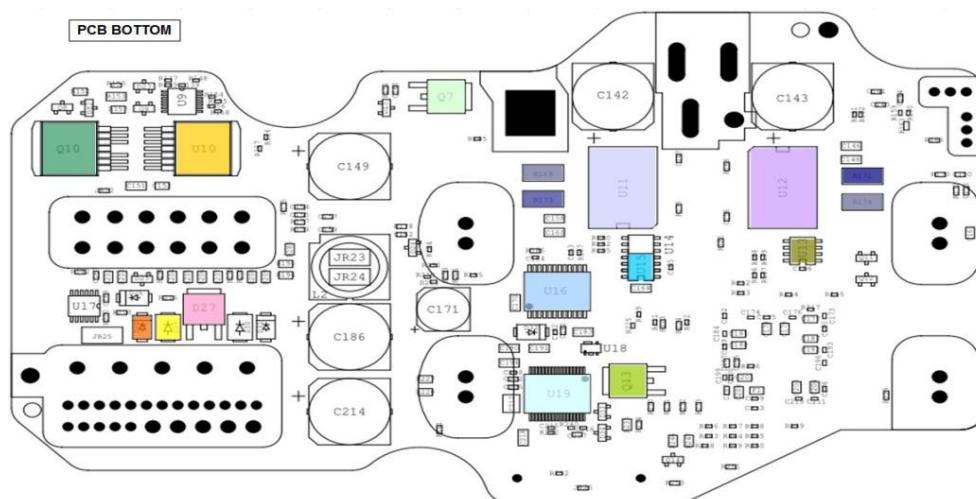


Figura 8.8. Layout Bottom scheda elettronica CFC400 Proto B

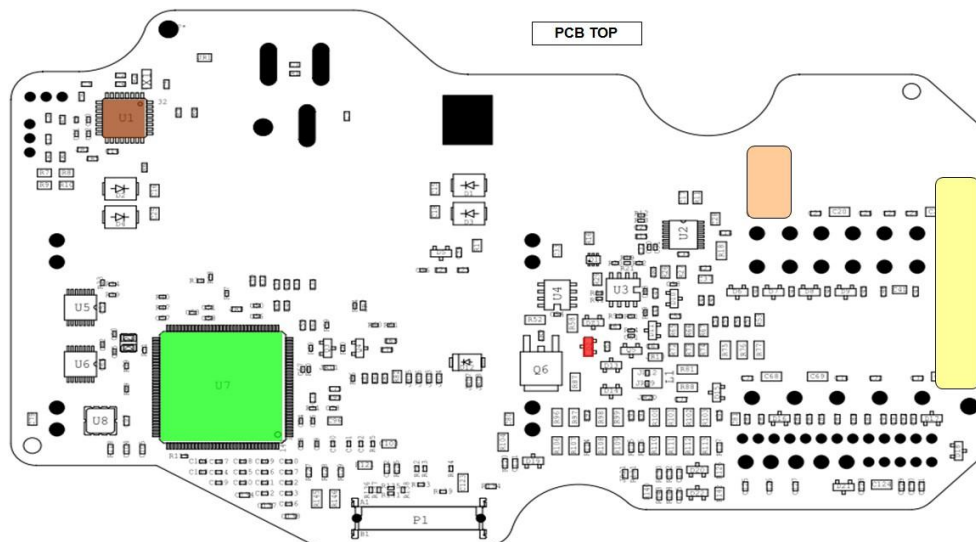


Figura 8.9. Layout Top scheda elettronica CFC400 Proto B

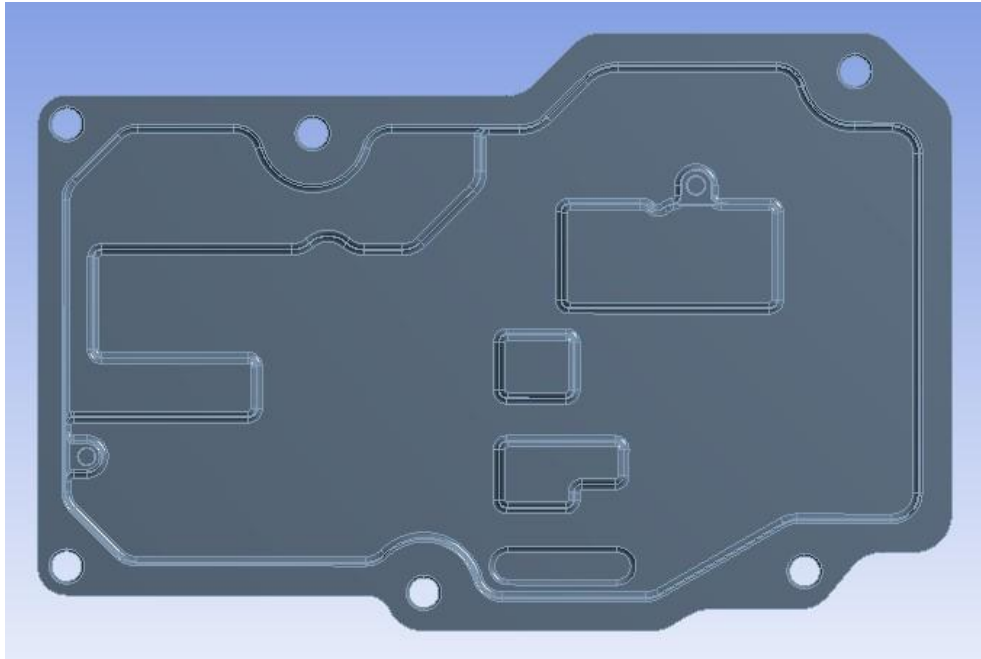


Figura 8.10. Geometria dissipatore CFC400 Proto B

### 8.3.1 Geometria semplificata PROTO B

Dopo di essere stato importato il modello del CFC400 PROTO B e fare le dovute semplificazioni, ed assegnazione dei componenti, la geometria che è stata ottenuta si mostra in figura 8.11.

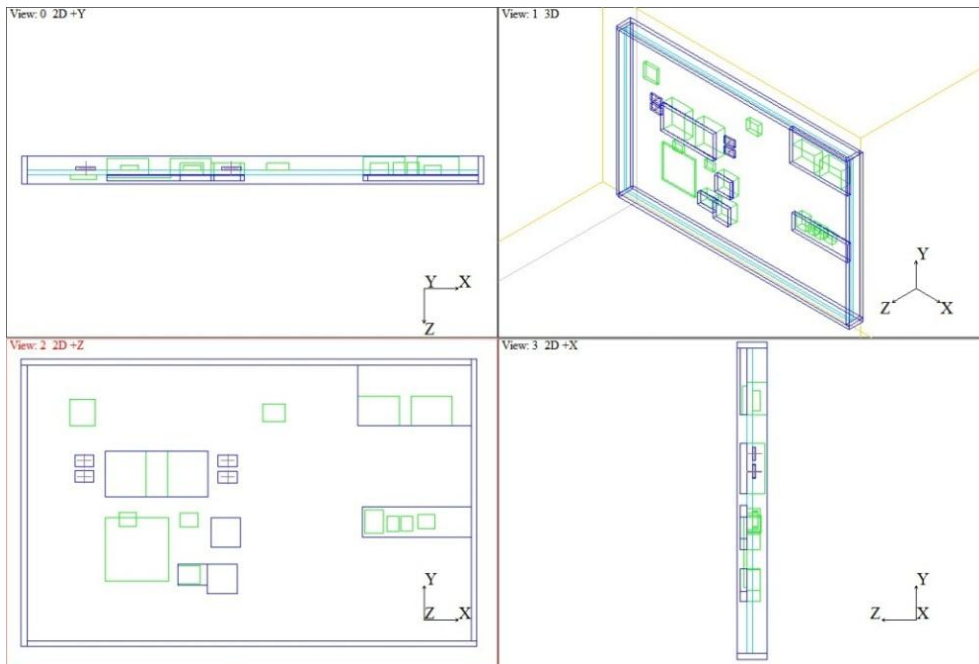


Figura 8.11. Geometria CFC400 Proto B FloTHERM.

### 8.3.2 Potenza dissipata per componente

L'ultimo passo prima di avviare il solver, è stato l'assegnazione della potenza dissipata per ogni componente, valore fornito sempre dai progettisti hardware.

<b>Componente</b>	<b>Potenza (Valore medio) [W]</b>
<b>P(D27)</b>	0,5899
<b>P(D28)</b>	0,0166
<b>P(D29)</b>	0,1303
<b>P(Q7)</b>	0,0698
<b>P(GIGA - U19)</b>	2,1276
<b>P(L9144 - U16)</b>	0,3361
<b>P (Q13)</b>	0,2812
<b>P(IPB180...- Q10)</b>	0,4088
<b>P(BTN7971 - U10)</b>	1,7034
<b>P(speedy1 - U12)</b>	0,3827
<b>P(speedy2 - U11)</b>	0,3263
<b>P(sh1 - R171)</b>	0,0844
<b>P(sh2 - R174)</b>	0,0562
<b>P(sh3 - R173)</b>	0,028
<b>P(sh4 - R169)</b>	0,0562
<b>P(MMP - U7)</b>	0,5388
<b>P(CAN - U15)</b>	0,035
<b>P(EEPROM - U13)</b>	0,0025
<b>P(SMP - U1)</b>	0,02
<b>P(U17)</b>	0,17

Tabella 8.3. Potenza componenti Proto B

### 8.3.3 Risultati ed analisi

La temperatura di giunzione ottenuta dall'analisi per ogni componente in studio del CFC400 PROTO B, è riportata in tabella 8.4.

<b>Componente</b>	<b>Potenza (Valore medio) [W]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
<b>P(D27)</b>	0,5899	132,561
<b>P(D28)</b>	0,0166	130,442
<b>P(D29)</b>	0,1303	131,715
<b>P(Q7)</b>	0,0698	130,43
<b>P(GIGA - U19)</b>	2,1276	140,189
<b>P(L9144 - U16)</b>	0,3361	132,074
<b>P (Q13)</b>	0,2812	131,195
<b>P(IPB180...- Q10)</b>	0,4088	131,528
<b>P(BTN7971 - U10)</b>	1,7034	135,091
<b>P(speedy1 - U12)</b>	0,3827	131,152
<b>P(speedy2 - U11)</b>	0,3263	131,192
<b>P(sh1 - R171)</b>	0,0844	129,797
<b>P(sh2 - R174)</b>	0,0562	129,83
<b>P(sh3 - R173)</b>	0,028	130,404
<b>P(sh4 - R169)</b>	0,0562	130,359
<b>P(MMP - U7)</b>	0,5388	137,898
<b>P(CAN - U15)</b>	0,035	131,447
<b>P(EEPROM - U13)</b>	0,0025	130,152
<b>P(SMP - U1)</b>	0,02	130,292
<b>P(U17)</b>	0,17	134,324

Tabella 8.4. Risultati CFC400 Proto B.

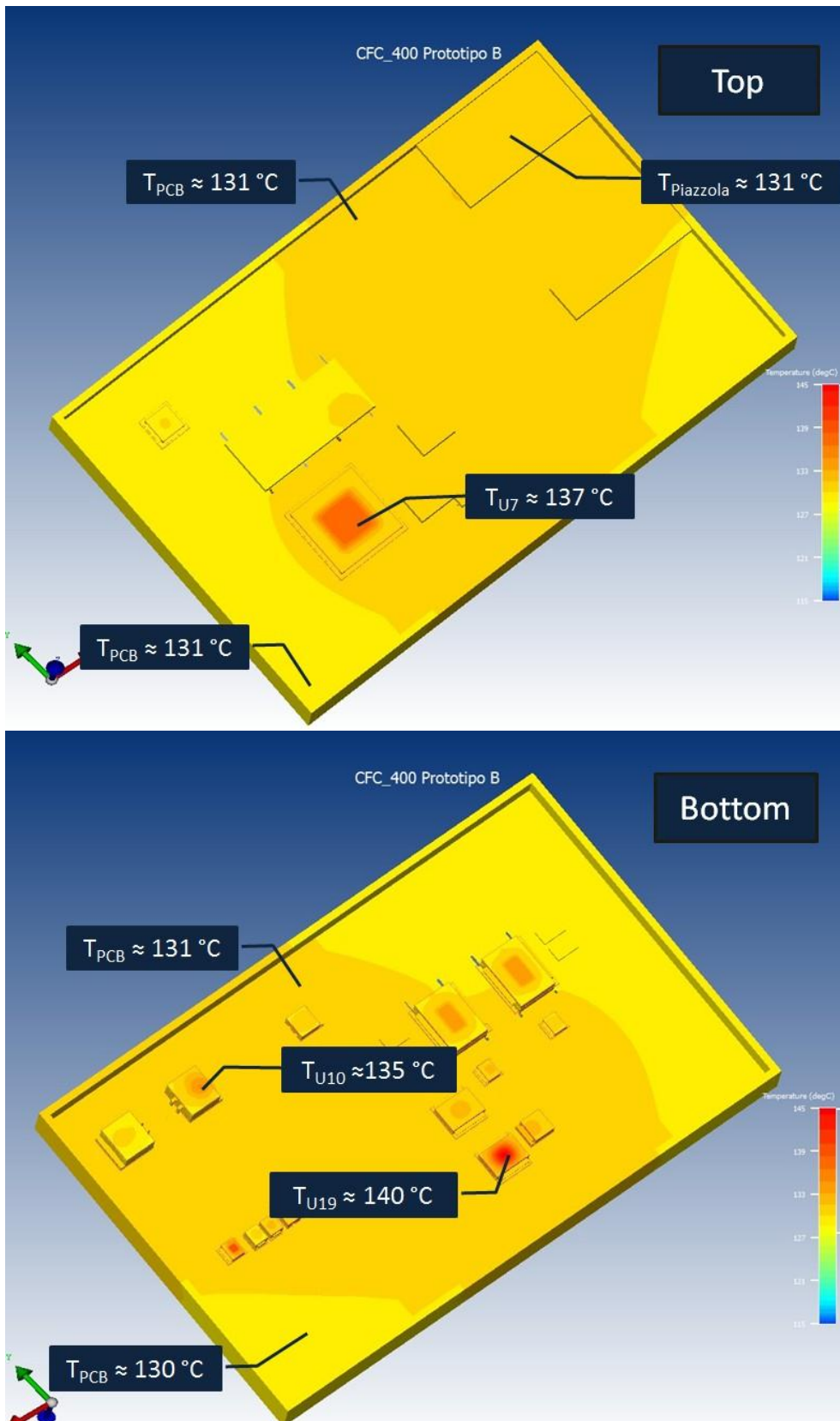


Figura 8.12. Risultati CFC400 Proto B.



I risultati ottenuti attraverso la simulazione per il CFC\_400 proto B sono stati confrontati con quelli ottenuti sperimentalmente sotto le stese condizioni (Appendice B),  $T_{amb}=115^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{conv}=1\text{m/s}$  in  $Y+$ . Sono state disposte delle termocoppie nei posti più critici, sul driver pompa (U10) e power supply (U19).

La temperatura più critica ricavata sperimentalmente è stata quella sul componente di power supply (U19), essendo questa di  $142^{\circ}\text{C}$ . Contrapponendo questa temperatura con quella ottenuta in simulazione,  $140^{\circ}\text{C}$ , si evidenzia una differenza di  $2^{\circ}\text{C}$ . Con questo si può affermare che l'errore del calcolo teorico è inferiore del 5%, dando come risultato un'ottima approssimazione.

## 8.4 Analisi termica CFC400 PROTO C

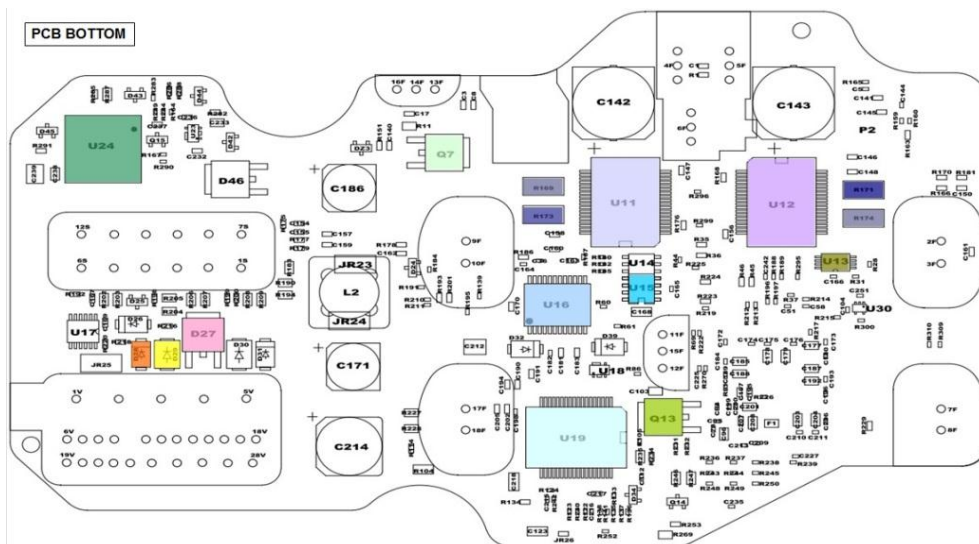
Nel CFC400 proto C è stato deciso di cambiare alcuni componenti:

1° il U19: è stato inserito lo stesso componente su un package più grande per aumentare la superficie di dissipazione affinché si ottenesse una riduzione della densità di potenza.

2° I componenti U10 e Q10 che si occupano di gestire la pompa, sono stati sostituiti con un unico dispositivo U24. Questo cambio è stato motivato per rendere il sistema più semplice grazie al fatto di essere riuscite ad eliminare anche due condensatori elettrolitici apportando così un'ulteriore riduzione dei costi di produzione.

Nel CFC400 Proto C è stata definita anche la geometria definitiva per il dissipatore (Figura 8.14).

Come per il proto B, il layout della nuova configurazione della scheda elettronica progettata per il CFC400 PROTO C è presente di seguito:



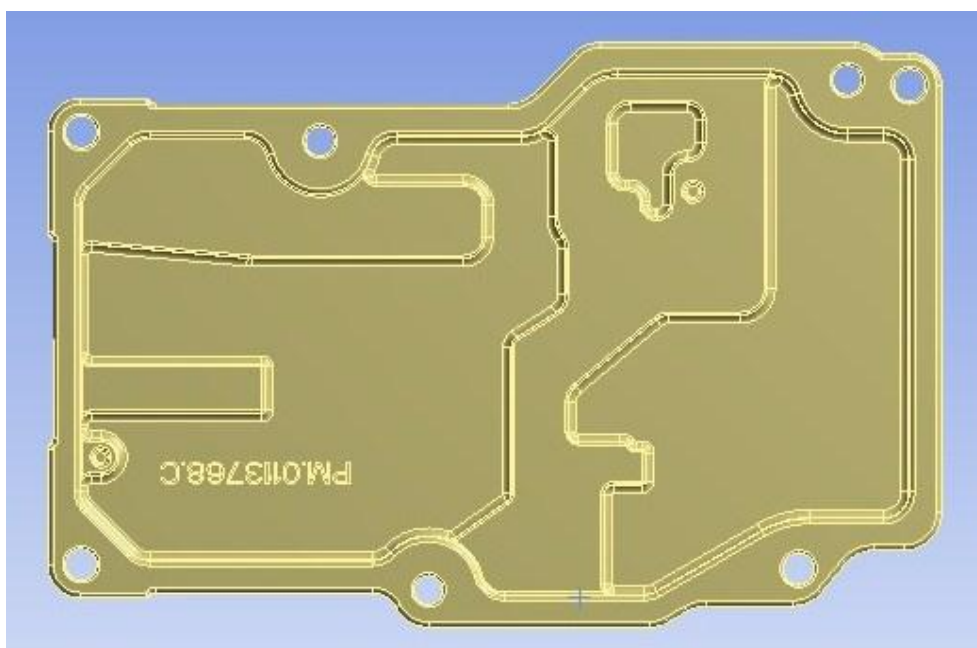


Figura 8.14. Geometria dissipatore CFC400 Proto C

#### 8.4.1 Geometria semplificata PROTO C

In egual maniera per il CFC400 PROTO C sono state fatte le dovute semplificazioni ed assegnazione dei componenti. La geometria che è stata ottenuta si mostra in figura 8.15.

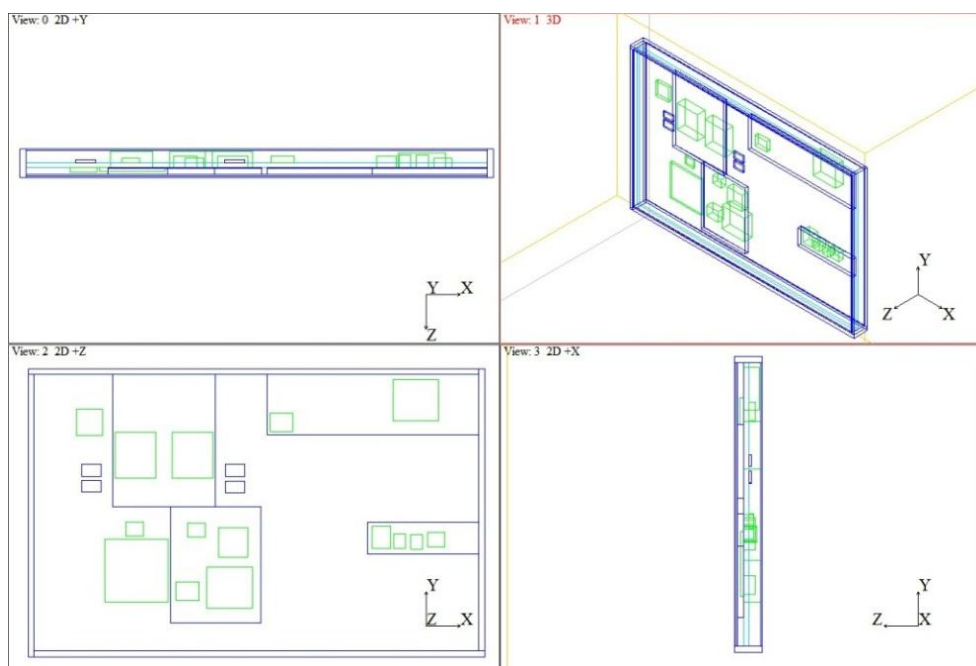


Figura 8.15. Geometria CFC400 Proto C FloTHERM.

#### 8.4.2 Potenza dissipata per componente

Anche per il proto C si è assegnata la potenza dissipata per ogni componente, valore fornito sempre dai progettisti.

<b>Componente</b>	<b>Potenza (Valore medio)[W]</b>
<b>P(D27)</b>	0,5899
<b>P(D28)</b>	0,0166
<b>P(D29)</b>	0,1304
<b>P(Q7)</b>	0,0698
<b>P(GIGA – U19)</b>	2,1276
<b>P(L9144 – U16)</b>	0,3361
<b>P (Q13)</b>	0,2812
<b>P(VND5004 – U24)</b>	2,0441
<b>P(speedy1 – U12)</b>	0,3827
<b>P(speedy2 – U11)</b>	0,3263
<b>P(sh1 – R171)</b>	0,0844
<b>P(sh2 – R174)</b>	0,0562
<b>P(sh3 – R173)</b>	0,0280
<b>P(sh4 – R169)</b>	0,0562
<b>P(MMP – U7)</b>	0,5388
<b>P(CAN – U15)</b>	0,0350
<b>P(EEPROM – U13)</b>	0,0025
<b>P(SMP – U1)</b>	0,0200
<b>P(U17)</b>	0,17

Tabella 8.5. Potenza componenti Proto C

#### 8.4.3 Risultati ed analisi

La temperatura di giunzione ottenuta dall'analisi per ogni componente in studio del CFC400 PROTO C, è riportata in tabella 8.6

<b>Componente</b>	<b>Potenza (Valore medio)[W]</b>	<b>Temperatura[°C]</b>
<b>P(D27)</b>	0,5899	132,341
<b>P(D28)</b>	0,0166	130,163
<b>P(D29)</b>	0,1304	131,459
<b>P(Q7)</b>	0,0698	129,954
<b>P(GIGA – U19)</b>	2,1276	138,481
<b>P(L9144 – U16)</b>	0,3361	131,68
<b>P (Q13)</b>	0,2812	131,371
<b>P(VND5004 – U24)</b>	2,0441	135,567
<b>P(speedy1 – U12)</b>	0,3827	130,854
<b>P(speedy2 – U11)</b>	0,3263	130,849
<b>P(sh1 – R171)</b>	0,0844	129,503
<b>P(sh2 – R174)</b>	0,0562	129,529
<b>P(sh3 – R173)</b>	0,0280	129,971
<b>P(sh4 – R169)</b>	0,0562	129,943
<b>P(MMP – U7)</b>	0,5388	137,308
<b>P(CAN – U15)</b>	0,0350	130,889
<b>P(EEPROM – U13)</b>	0,0025	129,726
<b>P(SMP – U1)</b>	0,0200	129,337
<b>P(U17)</b>	0,17	134,097

Tabella 8.6. Risultati CFC400 Proto C.

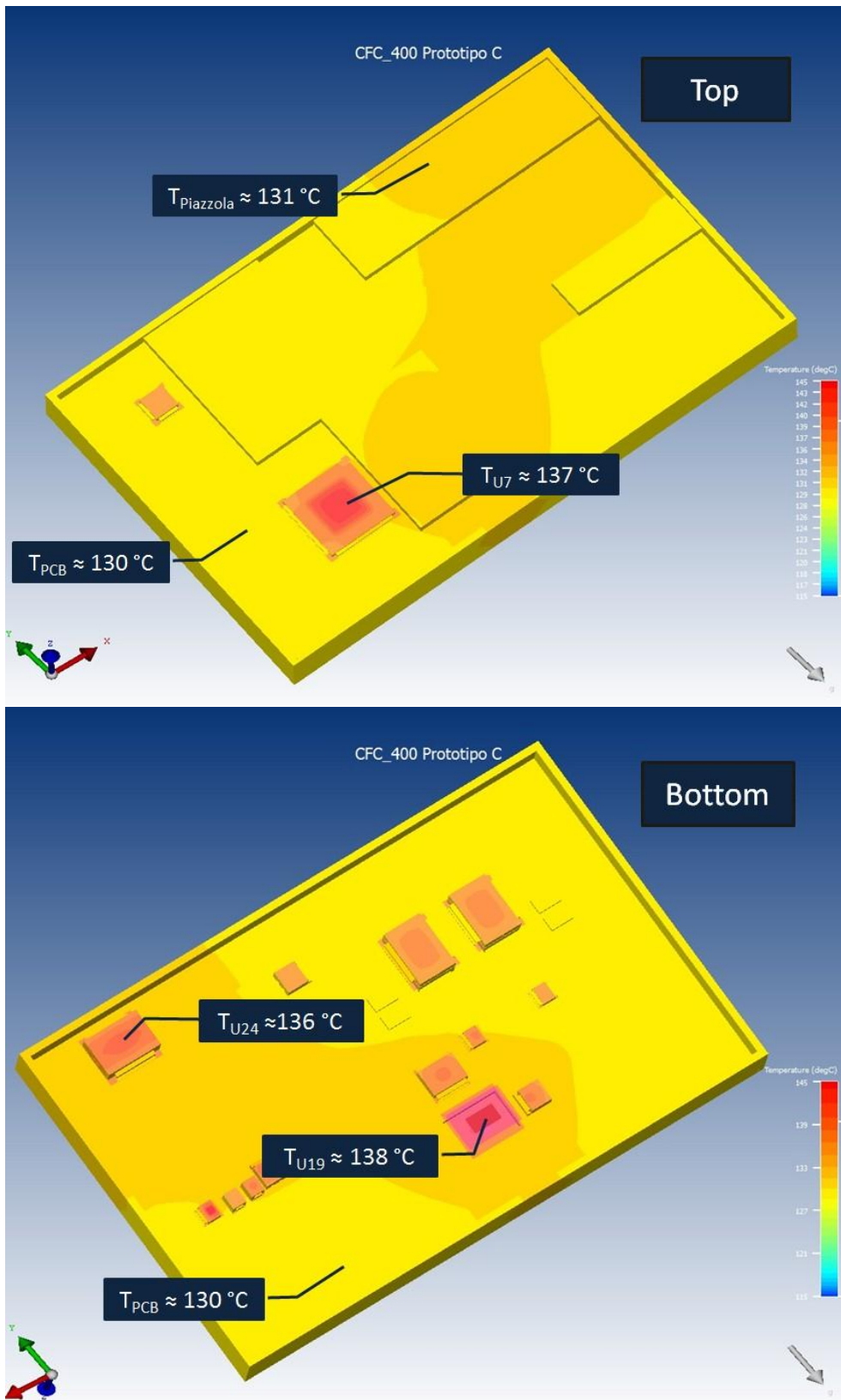


Figura 8.16. Risultati CFC400 Proto C.

Nella simulazione con i nuovi dispositivi installati, si ottiene una riduzione della temperatura del componente di power supply di due gradi.

Per il componente che riguarda alla gestione della pompa non si osserva diminuzione di temperatura contrapponendo con quello che aveva la temperatura più alta (U10).

Dopo aver eseguito le analisi termiche dei due prototipi, si è ottenuto che i componenti presenti sul proto B rientrano nel range di utilizzo. Vi è altresì da evidenziare che il piccolo margine di sicurezza che si ha sul U19, potrebbe creare dei fault in rari casi. Nella nuova configurazione del proto C (sostituzione componente U19 con package maggiorato e driver pompa) si è ottenuta un'ulteriore riduzione di temperatura così da aumentare il margine di sicurezza dello stesso (temperatura massima di giunzione= 150°C).

Inoltre, Attraverso le analisi termiche si è riuscito ad abbassare i RPN ottenuti nella analisi FMEA riguardanti allo spessore del dissipatore ed il materiale termoconduttivo d'interfaccia (Figura 8.17).

MECHANICAL DESIGN FMEA PROJECT: CFC400X - AMT																	
FUNCTION REFERENCE	ELEMENTARY FUNCTION	POTENTIAL FAILURE MODE	POTENTIAL EFFECTS ON VEHICLE	POTENTIAL FAILURE CAUSES	MISSING DESIGN CHARACTERISTICS or ITEMS CAUSE FAILURE	DESIGN CRITERIA USED and VALUES ASSIGNED	VALIDATION LEVEL	KEY CHARACTERISTICS	DESIGN VALIDATION CONTROLS (according to TCE 00105032)	CURRENT STATE			UPDATE STATE				
										S	D	O	RPN	RESP & TARGET DATE	ACTIONS TAKEN	S	D
E-1	to guarantee the DISSIPATION (HEATSINK) provides the heat transfer from PCB to environment)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB COMPONENTS temperature due to insufficient dissipation	vehicle stop (hydraulic pump never activated)	Unable to dissipate sufficient power due to inappropriate HEATSINK thickness specified	HEATSINK thickness dimension	2,5 mm. [MM cod. PM.0113768]	NEW SOLUTION		Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR_MTA.R01) Dimensional verify	8	2	3	48				
										8	2	3	48		Thermal analysis	8	2
F-1	to guarantee the DISSIPATION (THERMAL RESIN ensures the thermal transfer to the heatsink of the heat generated by the PCB components)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB temperature due to insufficient dissipation	vehicle stop (hydraulic pump never activated)	Unable to dissipate sufficient power due to incorrect contact between PCB and HEATSINK due to incorrect HEATSINK-PCB air gap unable to achieve good contact with PCB	THERMAL RESIN thickness	0,2 (0 / -0,2mm) [MM cod. 00103009]	NEW SOLUTION		Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR_MTA.R01)	8	3	3	72				
										8	3	3	72		Thermal analysis	8	2
F-1	to guarantee the DISSIPATION (THERMAL RESIN ensures the thermal transfer to the heatsink of the heat generated by the PCB components)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB temperature due to insufficient dissipation	vehicle stop (hydraulic pump never activated)	Inappropriate material specified; unable to dissipate sufficient power	THERMAL RESIN material	THERMAL RESIN [MM cod. ML.0116257]	NEW SOLUTION		Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR_MTA.R01)	8	3	3	72				
										8	3	3	72		Thermal analysis	8	2
F-1	to guarantee the DISSIPATION (THERMAL RESIN ensures the thermal transfer to the heatsink of the heat generated by the PCB components)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB temperature due to insufficient dissipation	Inappropriate material specified; dry out at high temperature	Inappropriate material specified; dry out at high temperature	THERMAL RESIN material	THERMAL RESIN [MM cod. ML.0116257]	NEW SOLUTION		Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR_MTA.R01)	8	3	3	72				
										8	3	3	72		Thermal analysis	8	2

Figura 8.17. Risultati FMEA CFC400.



## CAPITOLO IX

### ANALISI VIBRAZIONALI

---

Le vibrazioni nelle strutture possono portare ad uno stato di risonanza. Tali strutture sottoposte a questo tipo di sollecitazione possono procurare dei danneggiamenti non voluti sulle strutture stesse, ciò porta all'ingegnere ad identificare le frequenze naturali ed i modi di vibrare dei corpi per garantire il corretto funzionamento. Per questa identificazione sarà realizzata l'analisi modale e vibrazionale utilizzando un pacchetto di modellazione ad elementi finiti, ANSYS Workbench.

#### 9.1 ANSYS Workbench

ANSYS Workbench è un pacchetto di modellazione ad elementi finiti per la soluzione numerica di un'ampia varietà di problemi meccanici. Questi problemi possono essere di tipo statico, dinamico, analisi strutturale, trasmissione del calore e fluidodinamici, anche problemi acustici ed elettromagnetici.

In generale, le soluzioni ad elementi finiti sono spezzate entro le seguenti tre fasi:

1. Pre-processamento: definizione del problema  
I passi più importanti in questa fase sono la definizione dei punti chiavi, linee, aree o volumi, la definizione dei tipi di elementi, materiali, proprietà geometriche ed i requisiti per la costruzione della maglia (*mesh*).
2. Soluzione: assegnamento dei carichi e soluzione  
In questa fase è necessario specificare i carichi, vincoli e finalmente la soluzione dell'equazione risultanti.
3. Post-processamento: in questa fase si vuole vedere la lista degli spostamenti nodali, forze e momenti, il piano delle deflessioni, il diagramma delle tensioni o le mappature delle temperature.

### 9.1.1 L'analisi strutturale con ANSYS Workbench

L'analisi strutturale è probabilmente l'applicazione più comune del metodo ad elementi finiti.

La famiglia di prodotti di ANSYS dispone di sette tipi di analisi strutturali. La prima incognita da essere calcolata nell'analisi sono gli spostamenti. Le altre grandezze, tale come gli sforzi, gli stessi, e le forze di reazione, sono derivate degli spostamenti nodali.

*Static analysis* è utilizzato per determinare gli spostamenti, gli stress, ecc. Sotto condizioni di carico statico. Si possono realizzare analisi di sistemi lineari ed analisi di sistemi non lineari.

*Modal Analysis* è utilizzato per calcolare le frequenze naturali e le forme modali. La frequenza naturale e la forma modale sono parametri importanti nel disegno di una struttura sottoposta ad un carico dinamico. Queste grandezze sono necessarie se si vuole realizzare un'analisi spettrale, un'analisi della risposta armonica o un'analisi transitoria.

L'analisi modale su ANSYS è un'analisi lineare. Qualsiasi non linearità è trascurata nonostante se queste sono definite.

*Harmonic Analysis* è una tecnica usata per determinare la risposta in stato stazionario di una struttura lineare ai carichi sinusoidali che variano nel tempo. L'idea è calcolare la risposta della struttura sottoposta a frequenze varie ed ottenere un grafico della risposta di alcune grandezze (usualmente gli spostamenti) versus la frequenza.

*Transient Dynamic Analysis* è usato per determinare la risposta de una struttura a sollecitazioni arbitrarie varianti nel tempo. Quest'analisi prende in conto le non linearità della struttura.

*Spectrum Analysis*: è un'analisi nella quale i risultati dell'analisi modale sono usati, insieme ad un corrispondente spettro per calcolare spostamenti e stress in un modello. Questo tipo di analisi è utilizzato principalmente per determinare la risposta

di una struttura ad accelerazioni che dipendono dal tempo o un'accelerazione randomica.

*Buckling Analysis*: usato per calcolare i carichi di punta e determinare i modi di cedimento.

Si mostra di seguito la finestra principale di ANSYS Workbench, dove ci sono a disposizione i diversi tipi di analisi disponibili.

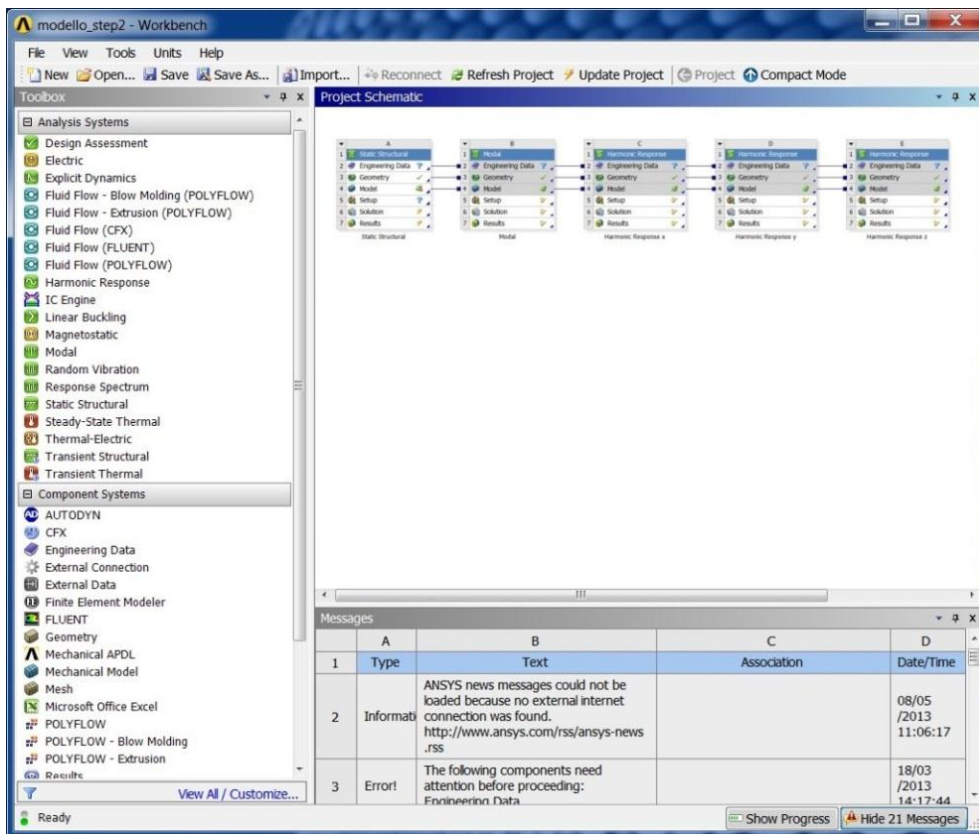
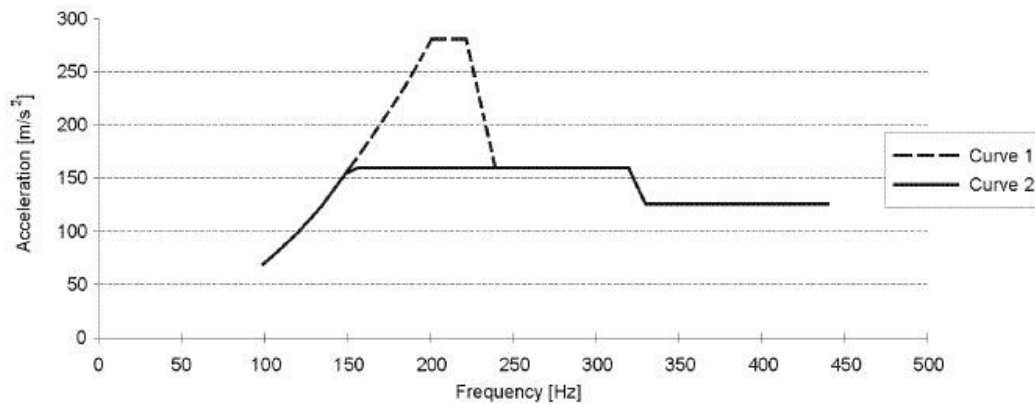


Figura 9.1 ANSYS Workbench.

## 9.2 Analisi modale e vibrazionale CFC400 Proto C.

Partendo dalle specifiche fornite della casa costruttrice, in questo caso General Motors, si ha:

Secondo la specifica **GMW3172**, il profilo di vibrazione sinusoidale per un corpo vincolato al sistema motore/cambio.



Frequency – Hz	Envelope 1		Envelope 2	
	Maximum Displacement – mm	Maximum Acceleration – m/s <sup>2</sup>	Maximum Displacement – mm	Maximum Acceleration – m/s <sup>2</sup>
100	0.177	-	0.177	-
151	-	-	-	160
200	-	280	-	-
220	-	280	-	-
240	-	160	-	-
320	-	160	-	160
340	-	125	-	125
440	-	125	-	125

Figura 9.2. Vibrazioni sinusoidali, motore/cambio

### 9.2.1 Schema di progetto per CFC400 Proto C in ANSYS Workbench.

Di seguito è riportato l'intero schema di progetto costruito per l'analisi modale ed armonica.

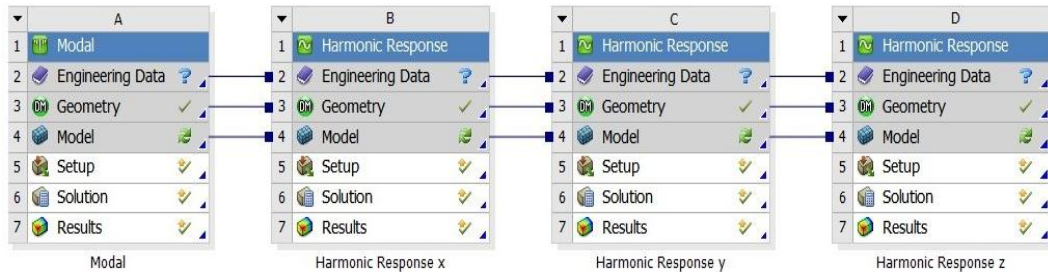


Figura 9.3. schema di progetto ANSYS Workbench

### 9.2.2 Materiali (Engineering Data)

Molti sistemi ingegneristici sono costituiti da più di un tipo di materiale. Le proprietà dei materiali possono essere definiti per gruppo di elementi o per ogni elemento. Per simulare differenti fenomeni sono richiesti differenti set di proprietà dei materiali. I materiali utilizzati per PER CFC400 PROTO C e le sue proprietà a 22 °C sono riportate di seguito.

Materiali	Proprietà
<b>Acciaio strutturale</b>	Densità= 7850 kg/m <sup>3</sup>
	Modulo di Young= 2 e5 Mpa
	Tensione Max. ammissibile= 460 MPa
<b>FR4</b>	Densità= 1500 kg/m <sup>3</sup>
	Modulo di Young= 24000 Mpa
<b>PA66 Minerale 40%</b>	Densità= 1500 kg/m <sup>3</sup>
	Modulo di Young= 3800 Mpa
	Tensione Max. ammissibile= 55 MPa
<b>Alluminio</b>	Densità= 2770 kg/m <sup>3</sup>
	Modulo di Young= 71000 Mpa
	Tensione Max. ammissibile= 310 MPa
<b>PBT GF30</b>	Densità= 1490 kg/m <sup>3</sup>
	Modulo di Young= 3000 Mpa

Tabella 9.1. Proprietà dei materiali

### 9.2.3 Albero di progetto per CFC400 Proto C in ANSYS Workbench

Il seguente albero mostra il flusso logico per la realizzazione dell'analisi.

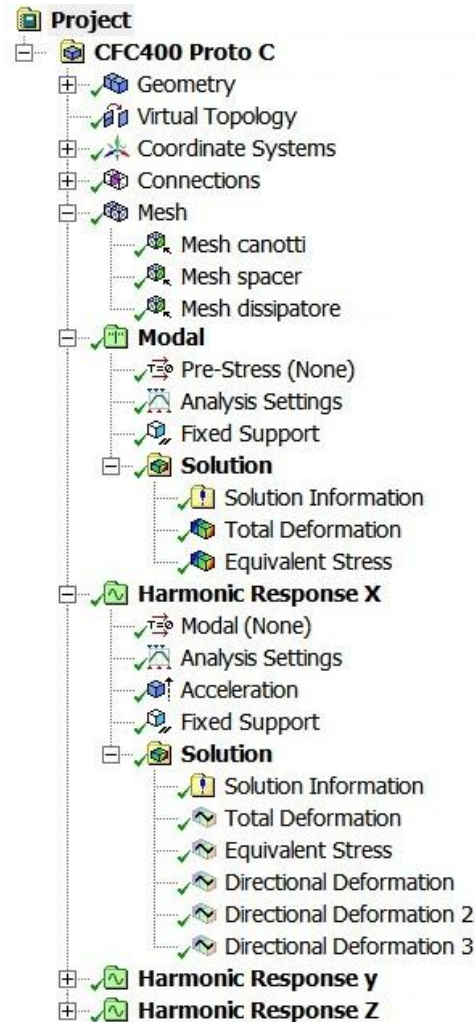


Figura 9.4. albero di progetto ANSYS Workbench

### 9.2.4 Geometria del CFC400 Proto C

Il primo passo per la realizzazione dell'analisi riportata sul albero di progetto è la definizione della geometria. Per questo è stata importata la geometria sul software attraverso un file fornito dai progettisti meccanici. Dopo sono stati assegnati i materiali corrispondenti ad ogni parte dell'assemblaggio. La geometria del CFC400 PROTO C è suddivisa come segue:

N°	Parte	Materiale
1	Dissipatore	Alluminio
2	Spacer	PA66 Minerale 40%
3	Vite ( fissaggio del dissipatore)	Acciaio strutturale
4	Boccole (fissaggio al corpo valvola)	Acciaio strutturale
5	Connettori	PA66 Minerale 40%
6	Sensore selezione (supporto-elettronica)	PA66 Minerale 40% - FR4
7	Sensore innesto (supporto-elettronica)	PA66 Minerale 40% - FR4
8	Valvola Gore (regola pressione interna)	PBT GF30
9	Scheda Elettronica	FR4

Tabella 9.2. Parti e materiali CFC400 Proto C.

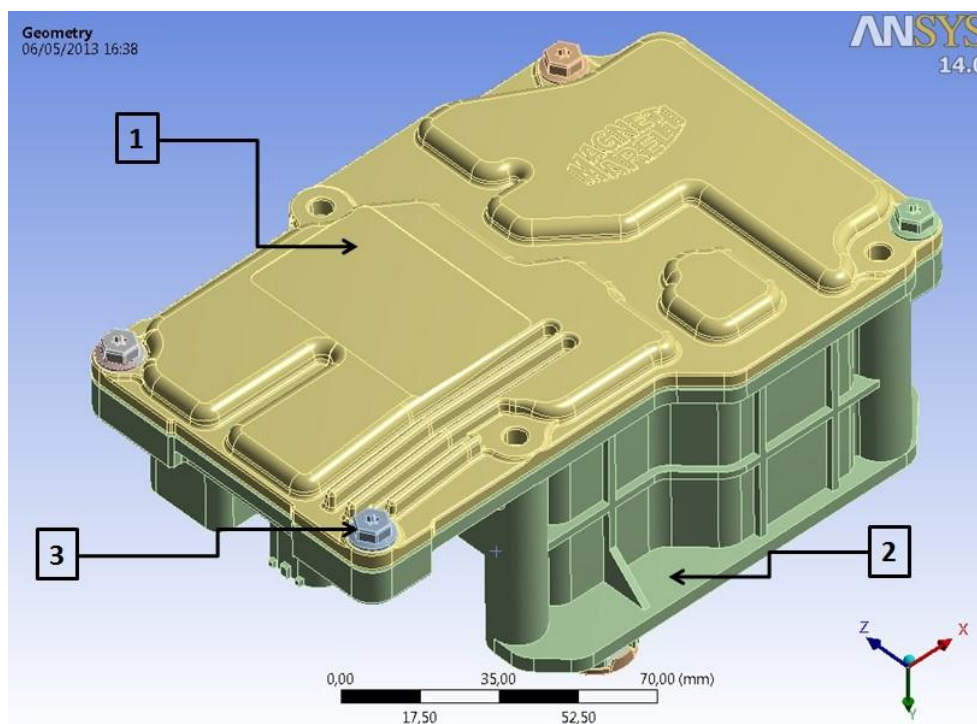


Figura 9.5.Geometria CFC400 1

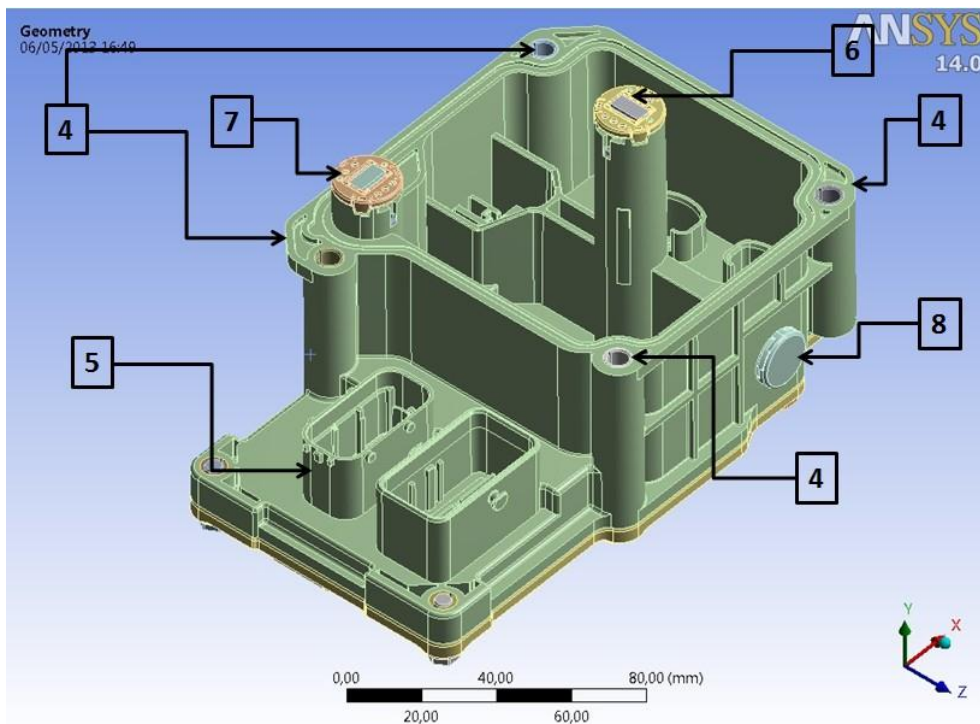


Figura 9.6. .Geometria CFC400 2

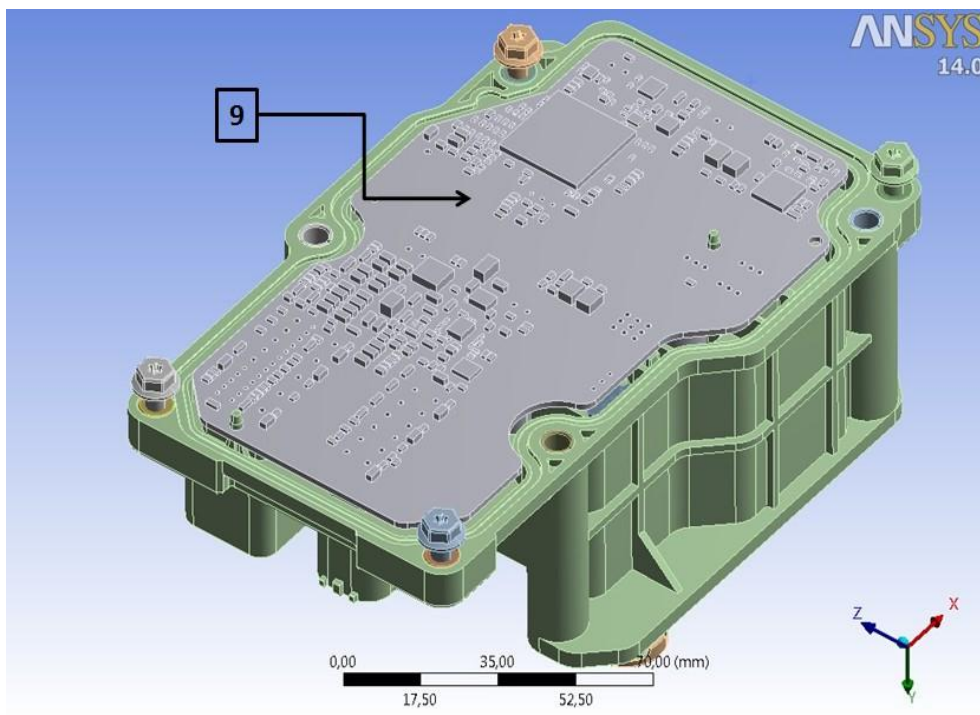


Figura 9.7. .Geometria CFC400 3



### 9.2.5 Contatti.

Il seguente passo nel preprocessing è la definizione dei tipi di contatto tra ogni superficie dell'assemblaggio. In ANSYS Workbench, quando un modello viene importato, le superfici di contatto sono rilevate e generate. In ANSYS si hanno varie tipologie di contatti, di seguito le principali

Contact type	iterations	normal behavior (Separation)	Tangential behavior (Sliding)
<b>bonded</b>	1	No gaps	No Sliding
<b>No separation</b>	1	No gaps	Sliding allowed
<b>Frictionless</b>	Multiple	Gaps allowed	Sliding allowed
<b>Rough</b>	Multiple	Gaps allowed	No Sliding
<b>Frictional</b>	Multiple	Gaps allowed	Sliding allowed

Tabella 9.3. Tipi di contatti disponibili in ANSYS Workbench.

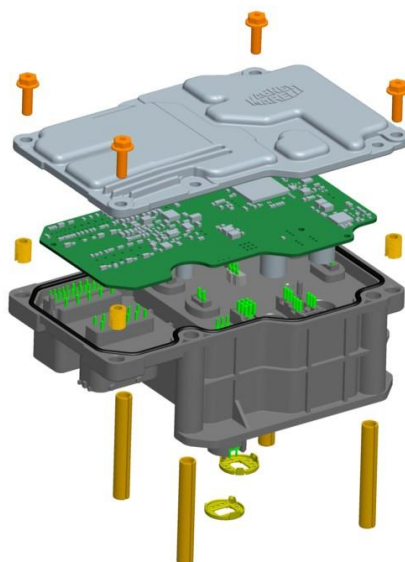


Figura 9.8. CFC400 Esploso

Per la CFC400 sono state generate 34 regioni tutte di tipo Bonded. Sotto questo tipo di contatto le superfici non si separano e non è consentito lo scorrimento. Questo è il contatto predefinito ed è lineare. È stato scelto questo tipo di contatto dato che in questa fase di analisi interessa studiare il comportamento del modello dal punto di vista di insieme senza studiare particolare regioni. Nelle figure 9.9 e 9.10 si possono osservare rispettivamente le regione di contatto tra Spacer e dissipatore e Spacer e

PCB. Tutte le regioni di contatto tra vite- boccole, boccole- spacer e valvola-spacer sono state anche assegnate di tipo bonded.

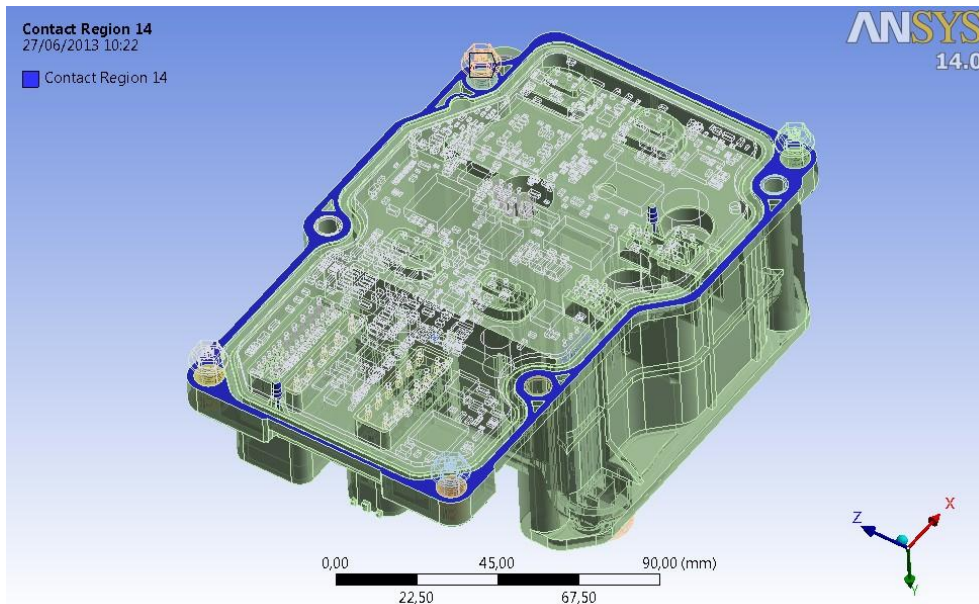


Figura 9.9. Regione di contatto tra Spacer e dissipatore (Regione blu).

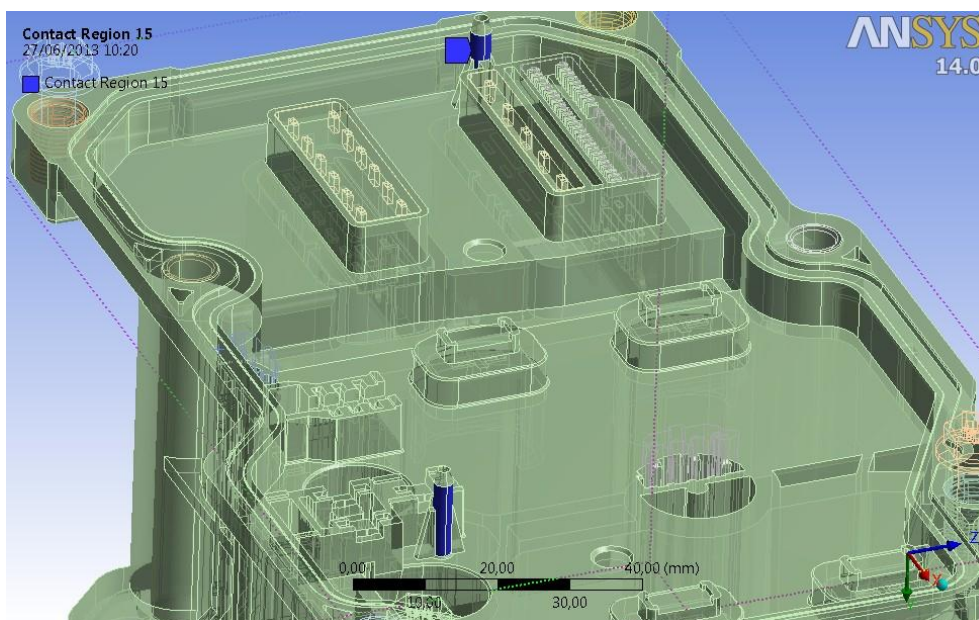


Figura 9.10. Regione di contatto tra Spacer e PCB (Regione blu).

### 9.2.6 Mesh CFC400 Proto C

Il seguente passo nell'esecuzione del progetto è la discretizzazione della struttura.

Un corpo continuo è discretizzato in un numero di elementi mono-, bi-, o tri-dimensionale secondo le esigenze di modellazione e della sua forma geometrica tramite una *mesh*. Ciascuno di questi elementi, ogni elemento finito, è caratterizzato da un certo numero di nodi. Un nodo è un indirizzo nello spazio di un punto nel quale si considera che ci siano certi gradi di libertà (spostamenti, tensioni, temperature, ecc.) ed azioni (forze, corrente, condizioni di contorno, ecc.) del sistema fisico.

Alcuni tipi di elementi finiti

BAR: è il più semplice elemento finito, ed è mono-dimensionale sia nella forma sia nel comportamento. Non consentono di produrre comportamento flessionale.

BEAM: è apparentemente molto simile al BAR, è mono-dimensionale nella forma ma non nel comportamento. Consentono di riprodurre il comportamento flessionale.

SHELL (lamina, superficie): è una classe di elementi finiti aventi di geometria di tipo bidimensionale. Esistono elementi con forma di parallelogramma o triangolare.

BRICK (mattoni, scatola) è una classe di elementi finiti aventi di geometria tri-dimensionale (solidi). Esistono elementi di forma parallelepipedo o tetraedrica.

Il tipo di elemento a generare può essere impostato o il software lo può scegliere automaticamente. Generalmente, nel caso di elastici piani, i limiti e frontiere vengono definiti tramite una serie di linee geometriche interne ed esterne, il tipo di elemento che sarà generato è di tipo BEAM. Per strutture di parete sottile, la geometria può essere definita attraverso superfici tridimensionali, il tipo di elemento che sarà generato è di tipo SHELL. Per strutture solide, il tipo di elemento utilizzato è il BRICK.

Esistono tre modi di base per generare una mesh: manuale, semiautomatica o completamente automatica.

Per lo studio del CFC400 PROTO C è stato utilizzato in prima istanza il modo automatico ottenendo una mesh poco accurata. Dopo si è proceduto a generare una mesh più raffinata per i canotti all'interno dello spacer, dovuto alla sua particolare geometria (la sua lunghezza è vincolata alla struttura solamente da un lato) possono presentarsi problemi relativi alla sua propria inerzia. I canotti sono realizzati in PA66 Minerale 40%. Per i canotti si è stata impostata una dimensione degli elementi a 2mm (Figura 9.8.). Un'altra mesh più raffinata è stata creata nei componenti di massa più significativa, essendo quelli che hanno maggior peso nell'analisi modale e tendono ad avere i modi propri di vibrare a più basse frequenze, per questo motivo la mesh per il dissipatore e lo spacer è stata raffinata. Dopo aver effettuato diverse prove impostando la dimensione degli elementi in un range di 0.5mm a 3mm, ed avviando il solver per ogni dimensione impostata, è stato ottenuto che per dimensioni minori di 3mm il solver non era in grado di risolvere il sistema dovuto a restrizione del hardware (massima memoria RAM disponibile 12 GB). Si è proceduto a realizzare l'analisi impostando come dimensione degli elementi per il dissipatore e spacer a 3mm. La quantità di elementi e nodi ottenuti per tutto il componente assemblato è riportato in tabella 9.4.

<b>Nodi</b>	829002
<b>Elementi</b>	470708

Tabella 9.4. Quantità di nodi e di elementi della mesh.

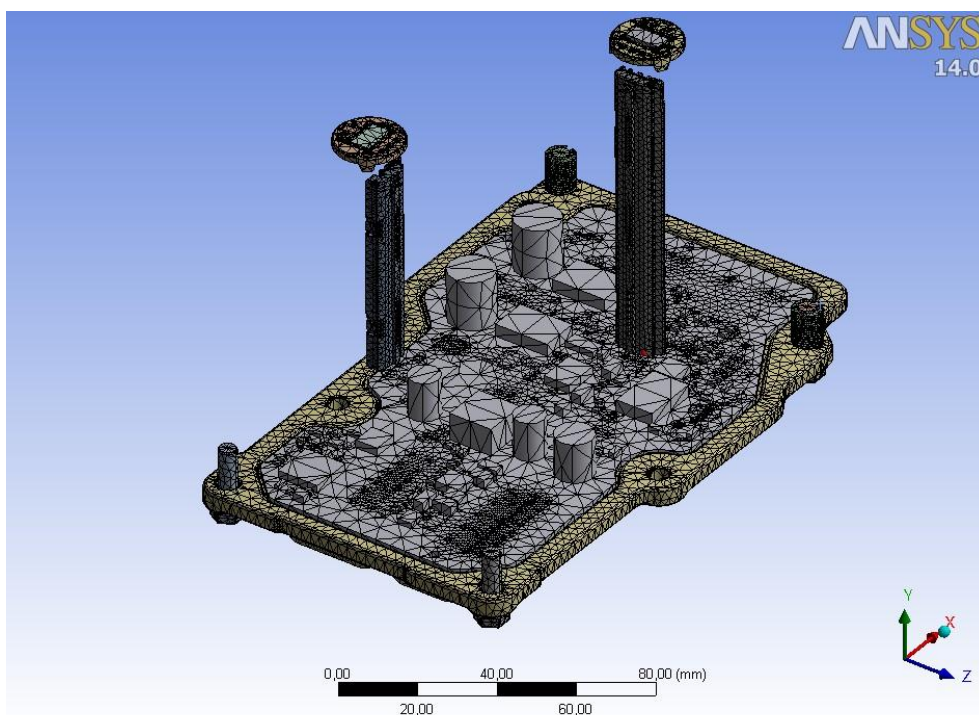


Figura 9.11. Mesh Canotti

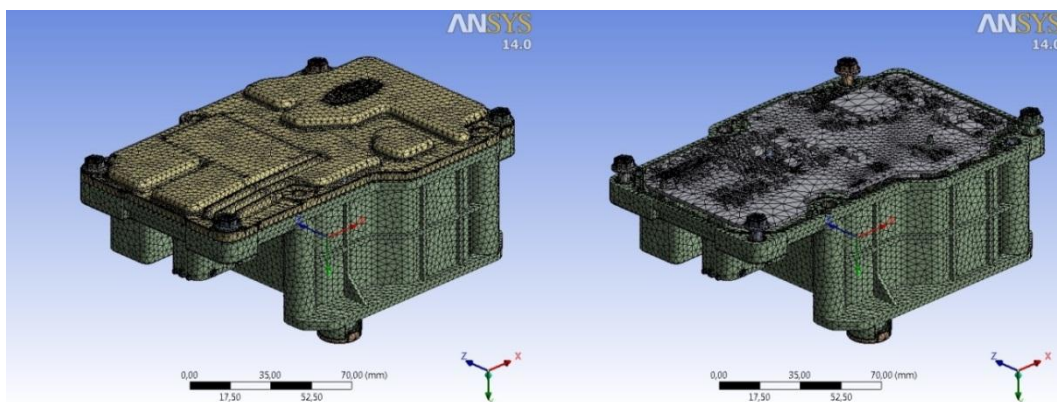


Figura 9.12. Mesh spacer, dissipatore e scheda elettronica.

### 9.3 Analisi modale (PA66 minerale 40%).

ANSYS Workbench permette di selezionare per l'analisi modale il numero massimo di modi da trovare nel range di frequenze che ci interessa valutare. Per l'analisi del CFC400 PROTO C è stato impostato come numero massimo di modi a trovare uguale a sei (6) ed il range di frequenze da 0-500Hz, il quale è stato scelto partendo dalla normativa **GMW3172**.

Come si può osservare nel albero di progetto, che il software permette anche di impostare le condizioni iniziali ed i vincoli della struttura. Tra i tipi di vincoli disponibili abbiamo: vincolo fisso, vincolo senza attrito, vincolo cilindrico, vincolo rotazionale, vincolo di appoggio e vincolo di spostamento direzionale.

Il CFC400 è fissato al corpo valvola tramite viti M6 passanti nelle quattro boccole disposte per questo proposito. La struttura è stata vincolata attraverso dei vincoli fissi (fixed support) nelle zone interne delle boccole (Figura 9.10).

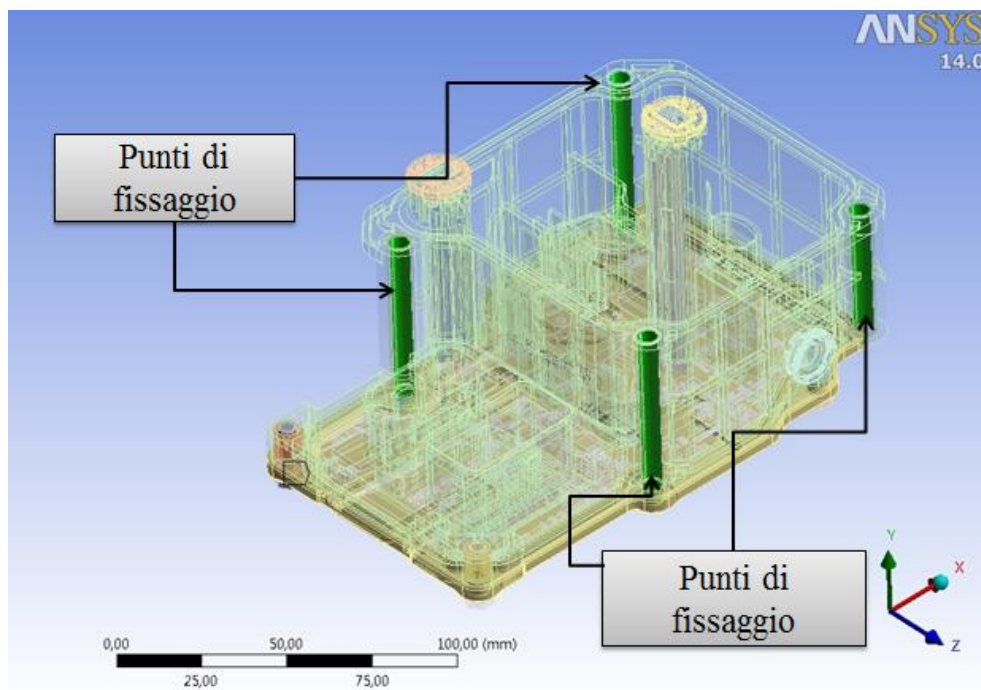


Figura 9.13. Vincoli

## Risultati dall'analisi modale

Modo	Frequenza[Hz ]
<b>1</b>	467,14
<b>2</b>	957,68

Tabella 9.5. Modi di vibrare

Dall'analisi modale è stato ottenuto che il primo modo è 476,14 Hz.

Si è osservato che il primo modo di vibrare non si trova dentro il range di vibrazione per un corpo vincolato al sistema motore/cambio secondo la normativa **GMW3172** (100-440 Hz).

Nonostante ciò si è deciso di ampliare l'analisi armonica a 467 Hz in modo da scongiurare a causa di eventuali semplificazioni geometriche apportate al modello eventuali spostamenti e stress possibilmente dannosi.

#### 9.4 Risposta armonica (PA66 minerale 40%).

È stata effettuata l'analisi di risposta armonica per ogni direzione dello spazio cartesiano X, Y ed Z. In ogni direzione si è impostata un'accelerazione direzionale pari a quella riportata nella normativa **GMW3172** ad una frequenza di 440Hz, accelerazione direzionale =  $125 \text{ m/s}^2 \cong 12 \text{ G}$ .

Partendo dal risultato dell'analisi modale in cui il 1° modo di vibrare è a 467,14, si è effettuato uno studio tra 467-468 Hz suddiviso in 10 intervalli.

Come nell'analisi modale, la struttura ha mantenuto gli stessi vincoli nelle zone interne delle boccole (Figura 9.14)

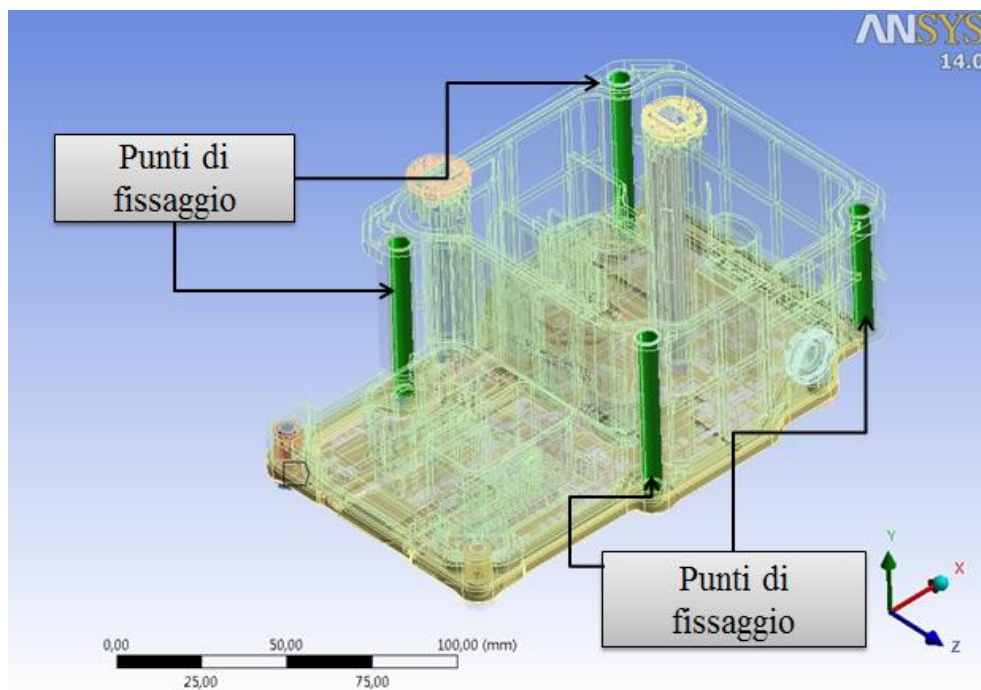


Figura 9.14. Vincoli



Di seguito si presentano i risultati corrispondenti ad ogni singola direzione.

#### 9.4.1 Risposta armonica in X

Si è impostato:

**Accelerazione lungo asse X**

125 m/s<sup>2</sup>

Dall'analisi è stato ottenuto:

**Deformazione massima teorica**

150,8 mm

**Tensione massima**

3574,2 MPa

Tabella 9.6. Risposta armonica in X

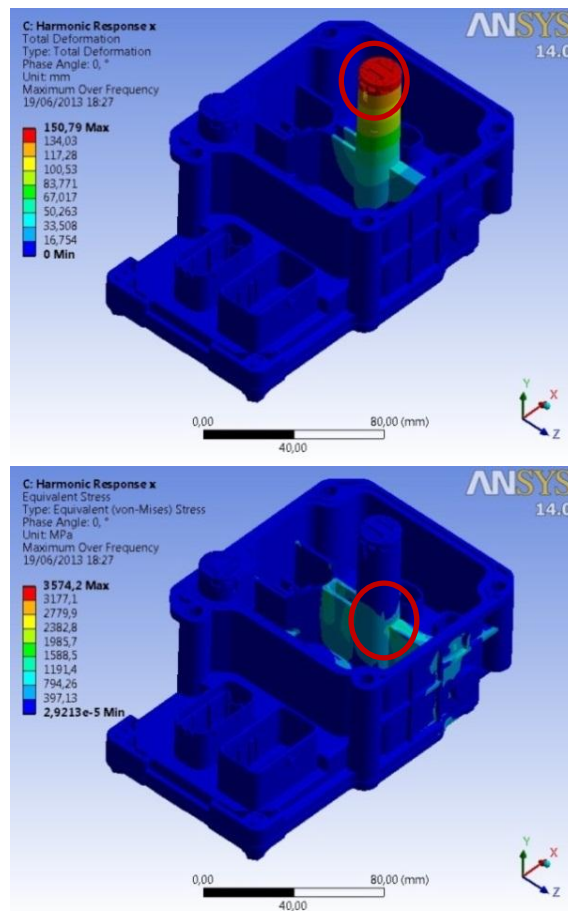


Figura 9.15. Risposta armonica in X

#### 9.4.2 Risposta armonica in Y

Si è impostato:

**Accelerazione lungo asse Y**

125 m/s<sup>2</sup>

Dall'analisi è stato ottenuto:

**Deformazione massima teorica**

9,9 mm

**Tensione massima**

233,52 MPa

Tabella 9.7. Risposta armonica in Y

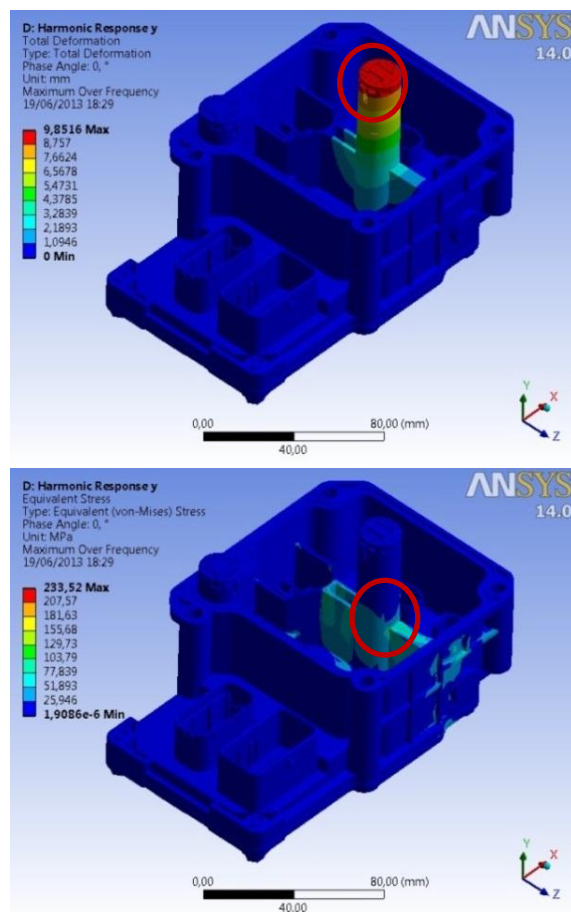


Figura 9.16. Risposta armonica in Y

### 9.4.3 Risposta armonica in Z

Si è impostato:

**Accelerazione lungo asse Z**

125 m/s<sup>2</sup>

Dall'analisi è stato ottenuto:

**Deformazione massima teorica**

8,7 mm

**Tensione massima**

205,14 MPa

Tabella 9.8. Risposta armonica in Z

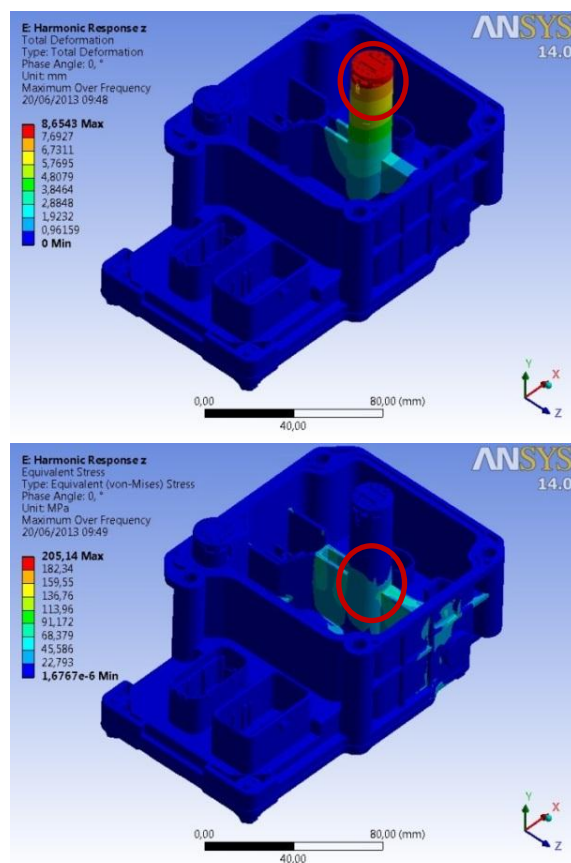


Figura 9.17. Risposta armonica in Z

## 9.5 Analisi dei risultati (PA66 minerale 40%).

Dopo avere effettuato le analisi, si è riscontrato che:

- Analisi modale

Il primo modo proprio di vibrare del corpo si ha a 467Hz, il che si trova oltre la frequenza massima prescritta (440Hz) dalla normativa **GMW3172**.

- Analisi vibrazionale

Da queste analisi è stato ottenuto che le sollecitazioni armoniche con accelerazione di  $125 \text{ m/s}^2$  ad una frequenza di 467 HZ, creerebbero nello spacer delle deformazioni che porterebbero al danneggiamento dello stesso.

È necessario aggiungere che a livello sperimentale sono stati eseguiti dei Thermal Shock sul CFC400 e vi sono riscontrate delle cricche sullo spacer (Appendice C)

A causa del piccolo margine che abbiamo trovato sulla frequenza di risonanza ed ai risultati ottenuti sperimentalmente è stato consigliato di cambiare il materiale dello spacer.

## 9.6 Analisi modale e vibrazionale CFC400 Proto C. con PBT ASA-GF30.

Il materiale scelto è stato l'Ultradur® S 4090 G6 ((PBT+ASA)-GF30) e le sue proprietà a 22°C sono riportate in tabella 9.9.

Materiale	Proprietà
<b>PBT ASA GF30</b>	Densità= 1470 kg/m <sup>3</sup>
	Modulo di Young= 9700 Mpa
	Tensione Max. ammissibile= 125 MPa

Tabella 9.9. Proprietà PBT ASA GF30

Si deciso successivamente di realizzare le analisi modale ed armonico per il CFC400 con il nuovo materiale, i risultati ottenuti si trovano di seguito:

## 9.7 Analisi modale PBT ASA GF30

Sotto le stesse condizioni con che è stata fatta l'analisi modale con il PA66 si è preceduto a fare l'analisi con il PBT ASA GF30 ottenendo i seguenti risultati.

Modo	Frequenza[Hz ]
<b>1</b>	752,3
<b>2</b>	1215,0
<b>3</b>	1264,4
<b>4</b>	1696,1

Tabella 9.10 Modi di vibrare.

Dall'analisi modale è stato ottenuto che il primo modo si trova a 752,3 Hz.

Si è osservato che il primo modo di vibrare con il PBT ASA GF30 non si trova dentro il range di vibrazione per un corpo vincolato al sistema motore/cambio secondo la normativa **GMW3172** (100-440 Hz), per cui si è evitato di effettuare le analisi armoniche a tali frequenze.

Attualmente si stanno effettuando delle prove al banco del CFC e di seguito è riportata un'immagine delle frequenze rilevate sperimentalmente in cui è possibile verificare che le frequenze ottenute dai calcoli sono confrontabili a quelle rilevate sperimentalmente.

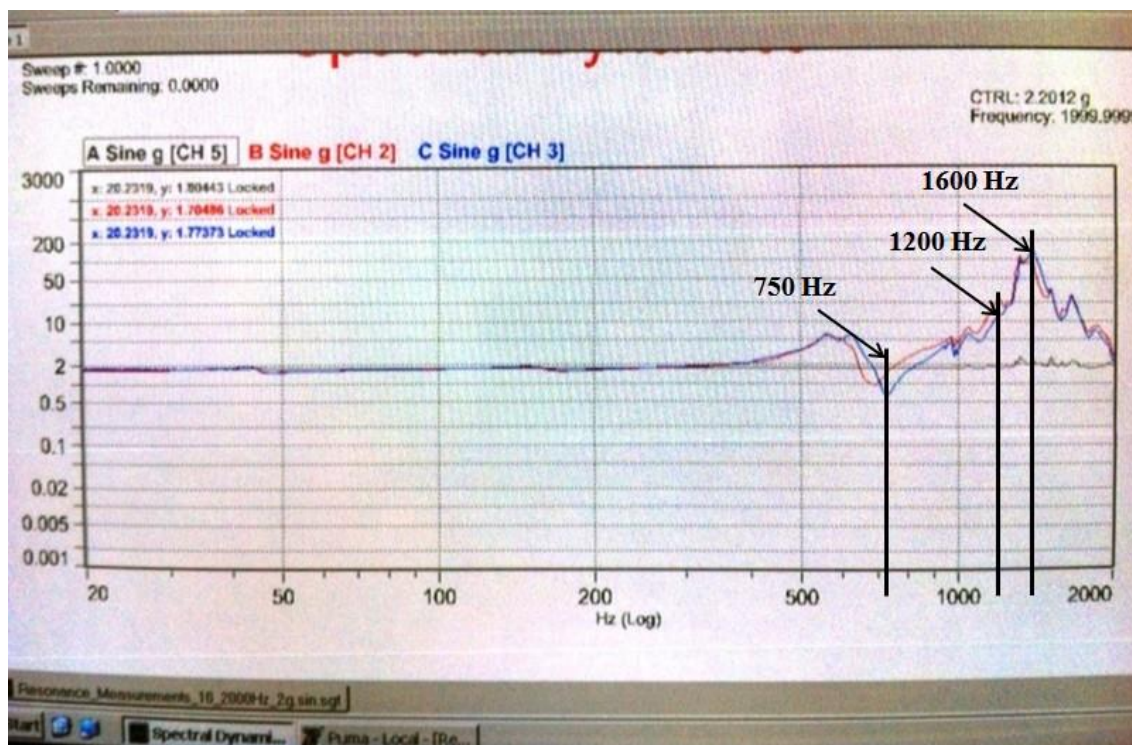


Figura 9.18. Analisi Sperimentale di vibrazioni

## CONCLUSIONI

---

- Tramite le analisi termiche realizzate per la scheda elettronica del CFC400 Proto B e Proto C, si è evidenziato che le temperature di lavoro si trovano dentro dei valori massimi di utilizzo garantendo il corretto funzionamento della stessa.
- Nell'analisi termica per il proto C (quello che andrà in produzione), si è evidenziata una riduzione di temperatura con il cambio del componente di power supply, di conseguenza un aumento del margine di sicurezza dello stesso.
- La nuova geometria per il dissipatore con piazzole con maggior superficie nel proto C non contribuisce con la riduzione della temperatura sul singolo componente dato che il trasferimento di calore è principalmente perpendicolare al PCB, bensì si ha un vantaggio sulla temperatura media più bassa del fondello.
- Attraverso le analisi termiche si è riusciti a dimostrare che sia lo spessore del dissipatore sia il materiale termoconduttivo d'interfaccia, riescono a trasferire adeguatamente il calore generato della scheda elettronica, garantendo il corretto funzionamento, di conseguenza gli RPN ottenuti nella analisi FMEA si sono ridotti.
- Nelle prime analisi vibrazionali si è riscontrato che il materiale scelto per lo spacer (PA66 Minerale 40%), non soddisfa le condizioni di lavoro imposte dal cliente, ciò ha portato al suggerimento dell'utilizzo di un altro materiale per la costruzione dello spacer (PBT ASA GF30).

- Si è riscontrato sia tramite simulazioni sia sperimentalmente che il materiale definitivo per la costruzione della CFC400 (PBT ASA GF30) risponde alle esigenze del cliente.

Al termine del lavoro svolto si può affermare inoltre che i modelli realizzati sia per le analisi termiche che vibrazionali sono coerenti rispetto alle risposte misurate durante le prove sperimentali.



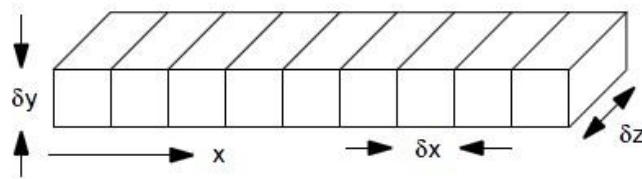
## Appendice A

Derivazione delle equazioni ai volumi finiti

## DERIVAZIONE DELLE EQUAZIONI AI VOLUMI FINITI

Di seguito è spiegata la derivazione delle equazioni ai volumi finiti utilizzate per FloTHERM per risolvere le variabili di flusso.

Definizione del modello matematico :



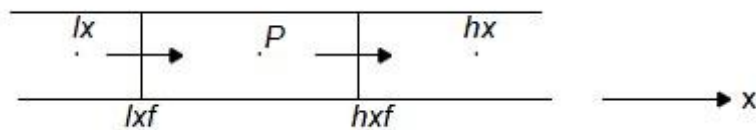
- Continuità

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (\text{A.1})$$

- Temperatura

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u c_p T)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\lambda \partial T}{\partial x} \right) = S \quad (\text{A.2})$$

Le equazioni ai volumi finiti sono derivate dall'interazione volumetrica sopra ogni cella della griglia:



Volume della cella

$$V_p = \delta_x \delta_y \delta_z. \quad (\text{A.3})$$

Area superficiale nella direzione x

$$A_x = \delta_y \delta_z. \quad (\text{A.4})$$

- Continuità

$$\iiint_{zyx} \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz + \iiint_{zyx} \frac{\partial \rho u}{\partial x} dx dy dz = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$\left(\frac{\rho_p - \rho_t}{\delta t}\right) V_p + (\rho u)_{hxf} A_x - (\rho u)_{lxf} A_x = 0 \quad (\text{A.6})$$

Tasso d'incremento di massa nella cella + la differenza tra in flusso entrante ed uscente = 0.

O in stato stazionario o densità costante

Massa di fluido uscente - Massa di fluido uscente = 0

- Temperatura

$$\underbrace{\iiint_{zyx} \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} dx dy dz}_1 + \underbrace{\iiint_{zyx} \frac{\partial(\rho u C_p T)}{\partial x} dx dy dz}_2 + \underbrace{\iiint_{zyx} -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\lambda \partial T}{\partial x} \right) dx dy dz}_3 = \underbrace{\iiint_{zyx} S dx dy dz}_4 \quad (\text{A.7})$$

1. Termine transitorio
2. Termine della convezione
3. Termine della conduzione
4. Sorgente

L'equazione di temperatura completa per la è

$$T_p \left[ \frac{\rho_p C_p V_p}{\delta t} + \rho_p C_p u_{hxf} A_x + \frac{\lambda A_x}{\delta x} + \frac{\lambda A_x}{\delta x} \right] - \left[ \frac{\rho_p C_p V_p T_t}{\delta t} + \left( \rho_{lx} C_p u_{lxf} A_x + \frac{\lambda A_x}{\delta x} \right) T_{lx} + \frac{\lambda A_x}{\delta x} T_{hx} \right] = S \quad (\text{A.8})$$

## Appendice B

### Valutazione termica PCB CFC400 PROTO B

	<p>MAGNETI MARELLI POWERTRAIN S.p.A. V.le Carlo Emanuele II, 150 10078 Venaria Reale (TO) - ITALY</p>	<p>Design Quality Department</p>
---	---	--------------------------------------

**MEASUREMENT REPORT**

**CFC400G  
PCB Thermal Evaluation**

Compiler			Approval		
Date	Name	Department	Date	Name	Department
10/02/2013	E. Martelli W. Di Palma	HW Design and Quality	10/03/2013	E. Martelli W. Di Palma	HW Design and Quality

Revision History				
Edition Revision	Date	Author	Department	Note
A-2	14 feb. 13	W. Di Palma	PJL HW	Added pictures of test set-up

This document replaces all previous versions.  
Magneti Marelli Powertrain system is the owner of this document.  
No copy of the document can be done without permission.



MAGNETI MARELLI POWERTRAIN S.p.A.  
V.le Carlo Emanuele II, 150  
10078 Venaria Reale (TO) - ITALY

Design Quality  
Department

## 1 INDEX

1	INDEX .....	2
2	ACRONYM.....	3
3	TEST PURPOSE.....	3
4	TEST REQUESTING FORM.....	3
5	DATE OF TEST EXECUTION.....	3
6	TEST LOCATION.....	3
7	TEST CUSTOMER.....	3
8	DOCUMENTS REFERENCE .....	4
9	TEST SETUP.....	5
9.1	DUT IDENTIFICATION / DESCRIPTION.....	7
10	TEST DESCRIPTION.....	8
10.1	N. OF DUTS .....	8
10.2	TEST CONDITION .....	8
10.3	DUT OPERATING MODE.....	9
10.4	FUNCTION MONITORED.....	10
10.5	ACCEPTANCE CRITERIA.....	10
11	TEST EQUIPMENT .....	11
11.1	TEST EQUIPMENT LIST .....	11
11.2	MEASUREMENT UNCERTAINTY.....	11
12	TEST RESULTS .....	12
13	COMMENTS AND CONCLUSIONS.....	12

	<p>MAGNETI MARELLI POWERTRAIN S.p.A. V.le Carlo Emanuele II, 150 10078 Venaria Reale (TO) - ITALY</p>	<p>Design Quality Department</p>
---	---	--------------------------------------

## 2 ACRONYM

The list of acronyms used along the present document is given here in the following.

<b>DUT</b>	Device Under Test
<b>ECU</b>	Electronic Control Unit
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board

## 3 TEST PURPOSE

Purpose of test is to measure thermal profiles/values of inner TCU CFC400G in order to allow an objective evaluation of endurance test performance indexes.

## 4 TEST REQUESTING FORM

The test was requested jointly by MM&GME during Design Validation Test Plan agreement meeting.

## 5 DATE OF TEST EXECUTION

<b>Test start date:</b>	<b>07/01/2013</b>
<b>Test end date:</b>	<b>18/01/2013</b>

## 6 TEST LOCATION

Electronic Component Reliability Laboratory  
Magneti Marelli Powertrain  
Viale C. Emanuele II, 150  
10078 - Venaria Reale (Turin) - ITALY

## 7 TEST CUSTOMER

GM EUROPE – F17 TRANSMISSION SYSTEM

	<p>MAGNETI MARELLI POWERTRAIN S.p.A.  V.le Carlo Emanuele II, 150  10078 Venaria Reale (TO) - ITALY</p>	<p>Design Quality  Department</p>
---	---	---------------------------------------

## 8 DOCUMENTS REFERENCE

Document	Code	Revision	Date
GM AMT F17 - DV2 Environmental Test Plan	00105032	B-2	05 December 2012

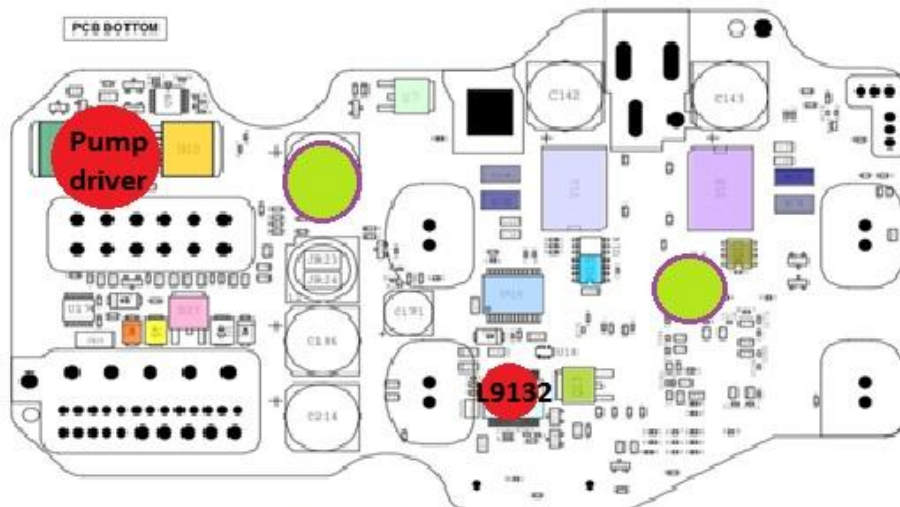


## 9 TEST SETUP

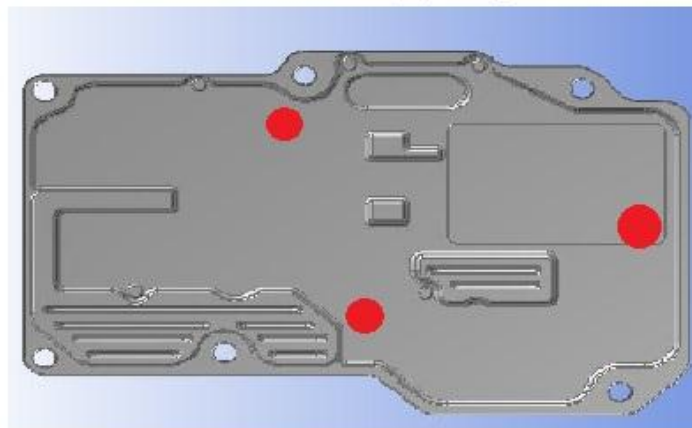
A climatic chamber was used in order to control room temperature and to correlate inner temperature conditions to environmental one.

**RED circles:** 2 x IC tabs for solder joint temperature detections on critical devices (pump driver and power supply)

**Green circle:** 2 x INNER PCB temperature detections



Picture 1: TCU Inner thermo couple positioning



Picture 2: TCU Heat sink thermo couple positioning



Picture 3: TCU Shield positioning



Picture 4: Heat Sink T/C positioning

	<p>MAGNETI MARELLI POWERTRAIN S.p.A.  V.le Carlo Emanuele II, 150  10078 Venaria Reale (TO) - ITALY</p>	<p>Design Quality  Department</p>
---	---	---------------------------------------

One more thermocouple has been used to detect heat sink temperature condition.  
Others two thermocouples were positioned inside the chamber, the first one at 2 cm from the TCU and the other far away from the TCU in order to measure chamber temperature.

### 9.1 DUT IDENTIFICATION / DESCRIPTION

**Product:** TCU CFC400G.01  
**Prototype level:** Development  
**Hw version:** HW01  
**SW version:** N.A.

	<p>MAGNETI MARELLI POWERTRAIN S.p.A. V.le Carlo Emanuele II, 150 10078 Venaria Reale (TO) - ITALY</p>	<p>Design Quality Department</p>
---	---	--------------------------------------

## 10 TEST DESCRIPTION

The TCU was positioned inside the climatic chamber @ different temperature till stabilized conditions (30 min minimum before test ); then T/C temperatures recording phase.

### 10.1 N. OF DUTs

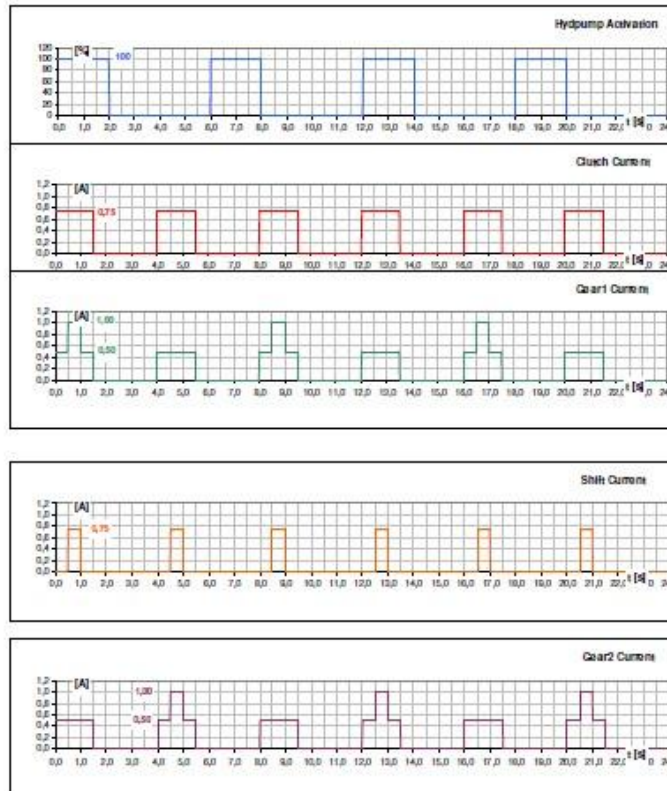
Number of DUT under test: 1  
Identification code: CFC400G.01 SN: 0179 3512

### 10.2 TEST CONDITION

Maximum chamber temperature: +125°C  
Forced Ventilation: shielded to avoid heat sink direct flow  
Chamber Temperature: measured 20mm far from D.U.T.

### 10.3 DUT OPERATING MODE

Gear & Shift Mode as for test profile shared with GME and reported in following pictures



	<p>MAGNETI MARELLI POWERTRAIN S.p.A. V.le Carlo Emanuele II, 150 10078 Venaria Reale (TO) - ITALY</p>	<p>Design Quality Department</p>
---	---	--------------------------------------

#### 10.4 FUNCTION MONITORED

N.A.

Note: Before to start, check for fully functionality according to profiles as for ref.10.3

#### 10.5 ACCEPTANCE CRITERIA

N.A.



POWERTRAIN

MAGNETI MARELLI POWERTRAIN S.p.A.  
V.le Carlo Emanuele II, 150  
10078 Venaria Reale (TO) - ITALY

Design Quality  
Department

## 11 TEST EQUIPMENT

### 11.1 TEST EQUIPMENT LIST

Equipment	Supplier	Type	Serial number
Climatic chamber	ACS	Challenge 160	4182
Thermometer	Fluke	54 II	85650095
Thermocouples	RS	T	



### 11.2 MEASUREMENT UNCERTAINTY

Temperature:  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$



## 12 TEST RESULTS

POINT 0 $T_{chamber}$	POINT 1 $T_{heatink}$	POINT 2 $T_{TCU}$	POINT 3 $T_{electronics}$	Calculated $T_{solder}$
100 °C	105 °C	107 °C	122 °C	129 °C
105 °C	110 °C	112 °C	126.5 °C	132 °C
110 °C	116 °C	118 °C	132 °C	140 °C
<b>115 °C</b>	<b>120 °C</b>	<b>121.5 °C</b>	<b>136 °C</b>	<b>145 °C</b>
120 °C	124.5 °C	126 °C	141 °C	149 °C
125 °C	130 °C	132 °C	146 °C	155 °C

POINT 0: temperature 20mm far from TCU heat sink – up direction  
POINT 1: average heat sink temperature as for RED circles (3x); picture 2 – chapt.9  
POINT 2: inner average temperature as GREEN circles; picture 1 – chapt.9  
POINT 3: higher temperature as for RED circles; picture 1 – chapt.9

## 13 COMMENTS AND CONCLUSIONS

Chamber temperature has been considered as air temperature collected 20mm upfront TCU

Solder joint temperature has been calculated for device **L9132** (ref.Pict.1). This is the most critical component in term of power dissipation. Its function is to act as multifunction voltage regulator with integrated dual protected sensor supplies in tracking with VDD.  
Due to direct unavailability of solder joint connection, T/C has been soldered to heat sink and solder joint temperature has been calculated as  $\Delta T$  (based on well known values of  $R_{thjc}$  and  $P_{diss}$ ).

In order to guarantee correct mission profile, as agreed during join meeting (T solder joint @ 145°C), an environmental temperature of 115°C has been identified as set point for environmental trials.



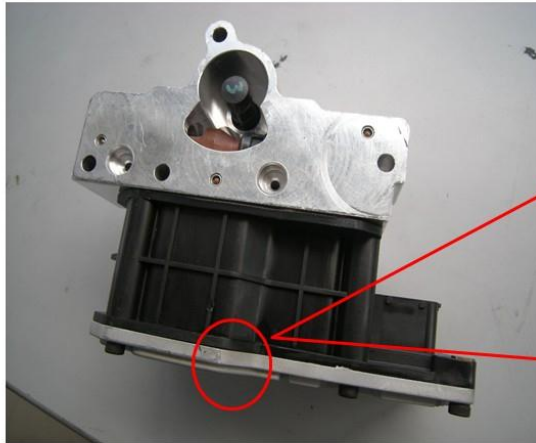
## Appendice C

Thermal Shock CFC400 (PA66 mineral 40%)

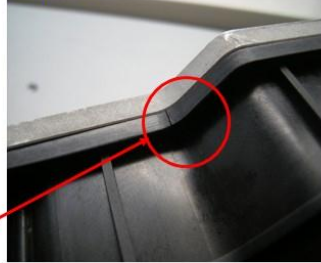
## The result for thermal shock test

Testing condition: -40/125°C 500cycle

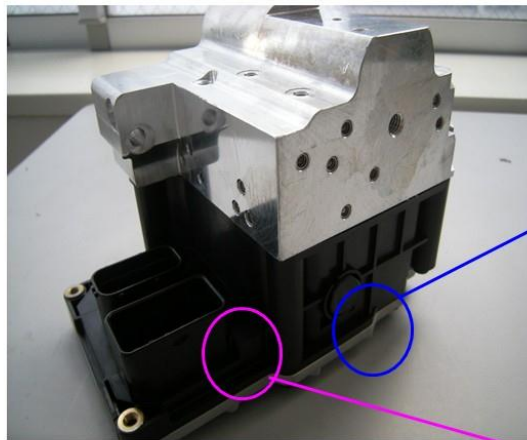
There was no crack until 250 cycles. (SMC checked at the intermediate time.)



sample200



sample202



sample202



sample202



## Appendice D


### Analisi FMEA CFC400

**LINKS BETWEEN TCU FUNCTIONS AND TCU COMPONENTS**

		Components														
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M		
<b>TCU functions</b>	1				X	X	X			X						
	2	X	X			X	X		X	X		X				
	3	X		X	X	X		X				X				
	4		X						X	X		X				
	5	X				X							X			
	6	X				X										
	7	X		X		X		X	X	X			X			
	8															X
	to guarantee the DISSIPATION				X	X	X			X						
	to guarantee the ELECTRICAL INSULATION	X	X			X	X		X	X		X				
	to guarantee the SEALING	X		X	X	X		X				X				
	to guarantee the ELECTRICAL CONNECTION		X						X	X		X				
	to guarantee the TRACEABILITY	X				X							X			
	to guarantee the RECYCLING	X				X										
	to guarantee the MECHANICAL PROTECTION / RESISTANCE	X		X		X		X	X			X				
	to guarantee the TCU ASSEMBLY															X

MECHANICAL DESIGN FMEA PROJECT: CFC400X - AMT																		
FUNCTION REFERENCE	ELEMENTARY FUNCTION	POTENTIAL FAILURE MODE	POTENTIAL EFFECTS ON VEHICLE	POTENTIAL FAILURE CAUSES	MISSING DESIGN CHARACTERISTICS or TEST/USE FAILURE	DESIGN CRITERIA USED and VALUES ASSIGNED	VALIDATION LEVEL	KEY CHARACTERISTICS	DESIGN VALIDATION CONTROLS (according to ICE 00039352)	CURRENT STATE			RESP & TARGET DATE	ACTIONS TAKEN	UPDATE STATE			
										S	D	O			RPN	S	D	O
D-1	to guarantee the DISIPATION (SCREWS provide right heatsink mating on PCB)	Intermittent and/or permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB COMPONENTS temperature due to insufficient dissipation	vehicle stop (hydraulic pump never activated)	Unable to guarantee the dissipation due to PCB not mate correctly onto HEATSINK due to incorrect screw section inadequate resistance to tightening	SCREW section dimension	M5	NEW SOLUTION		Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR, MTA, R01)	8	2	2	32					
				Unable to guarantee the dissipation due to PCB not mate correctly onto HEATSINK due to incorrect design, inadequate resistance to unscrewing under external stress (Thermal and vibration stress)	SCREW design	M5 SCREW design	NEW SOLUTION		Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR, MTA, R01)	8	2	2	32					
				Unable to guarantee the dissipation due to PCB not mate correctly onto HEATSINK due to incorrect assembly torque specified	SCREW torque value	7 - 7,6 Nm	NEW SOLUTION	(R)	Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR, MTA, R01)	8	2	2	32					
				Unable to dissipate sufficient power due to inappropriate HEATSINK material specified	HEATSINK material	ALUMINIUM ALLOY	CARRY-OVER SOLUTION		Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR, MTA, R01)	8	2	2	32					
E-1	to guarantee the DISIPATION (HEATSINK provides the heat transfer from PCB to environment)	Intermittent and/or permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB COMPONENTS temperature due to insufficient dissipation	vehicle stop (hydraulic pump never activated)	Unable to dissipate sufficient power due to inappropriate HEATSINK thickness specified	HEATSINK thickness dimension	2,5 mm.	NEW SOLUTION		Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR, MTA, R01) Dimensional verify	8	2	3	48	Thermal analysis	8	2	2	32
				Inappropriate HEATSINK design specified; incorrect flatness specified unable to achieve a good contact with PCB	HEATSINK dissipation surface flatness	FLATNESS 0,2	CARRY-OVER SOLUTION	(R)	Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR, MTA, R01) Dimensional verify	8	2	2	32					
				Inappropriate HEATSINK design specified; inadequate surface cleanliness specified	HEATSINK cleanliness requirement	Cleaness req.	CARRY-OVER SOLUTION		Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR, MTA, R01)	8	2	2	32					
				Unable to dissipate sufficient power due to incorrect contact between PCB and HEATSINK dimension unable to achieve good contact with PCB	HEATSINK dimension	2,05 ± 0,1	NEW SOLUTION	(R)	Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR, MTA, R01) Dimensional verify	8	2	2	32					
				Unable to dissipate sufficient power due to incorrect contact between PCB and THERMAL GREASE due to incorrect HEATSINK flatness unable to achieve good contact with PCB	HEATSINK dissipation surface flatness	FLATNESS 0,2	CARRY-OVER SOLUTION	(R)	Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR, MTA, R01) Dimensional verify	8	2	2	32					

F-1	to guarantee the THERMAL RESIN (THERMAL RESIN) ensures the thermal transfer to the heatsink of the heat generated by the PCB components)	Intermittent and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB temperature due to insufficient dissipation	vehicle stop (hydraulic pump never activated)	Unable to dissipate sufficient power due to incorrect PCB and HEATSINK due to incorrect HEATSINK-PCB air gap unable to achieve good contact with PCB	THERMAL RESIN thickness	0,2 (0 / -0,2mm)	NEW SOLUTION	Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR, MTA, R01)	8	3	3	72	Thermal analysis	8	2	2	32	
				Inappropriate THERMAL RESIN path unable to guarantee thermal dissipation	THERMAL RESIN path	THERMAL RESIN path			8	3	3	72						experimental test
				Inappropriate material specified; unable to dissipate sufficient power	THERMAL RESIN material	THERMAL RESIN			8	3	3	72						Thermal analysis
				Inappropriate material specified; dry out at high temperature	PCB material	FR4			8	2	2	32						Thermal analysis
H-1	to guarantee the THERMAL RESIN (PCB) provides support interface and heat transfer for the electronic components)	Intermittent and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB temperature due to insufficient dissipation	vehicle stop (hydraulic pump never activated)	Unable to dissipate sufficient power due to inappropriate PCB material specified	PCB material	FR4	CARRY-OVER SOLUTION	Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR, MTA, R01)	8	2	2	32						
				Unable to dissipate sufficient power due to inappropriate PCB thickness dimension	PCB thickness dimension	1,6mm (±10%)			8	2	2	32						
				Incorrect PCB warpage occurs after sufficient power (thermal resin cannot compensate warpage)	PCB material	FR4			8	2	2	32						
				Unable to dissipate sufficient power due to incorrect contact between PCB and THERMAL GREASE due to PCB warpage (THERMAL GREASE cannot compensate warpage)	PCB warpage dimension	0,5% on max length [PCB general requirements specification cat. 00059396]			8	2	2	32						Life test endurance, High temperature durability, Vibration with temperature cycle (GM W3172, CTR, MTA, R01)

FUNCTION REFERENCE	ELEMENTARY FUNCTION	POTENTIAL FAILURE MODE	POTENTIAL EFFECTS ON VEHICLE	POTENTIAL CAUSES FAILURE CAUSES	MISSING DESIGN CHARACTERISTICS or ITEMS CAUSE FAILURE	DESIGN CRITERIA USED and VALUES ASSIGNED	VALIDATION LEVEL	KEY CHARACTERISTICS	DESIGN VALIDATION CONTROLS (according to TCE 001.05032)	CURRENT STATE			ACTIONS TAKEN	UPDATE STATE				
										S	D	O		RPN	S	D	O	RPN
A-2	to guarantee the ELECTRICAL ISOLATION (SPACER provides electrical insulation between PIN and PIN)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of insulation due to excessive PCB temperature due to missing electrical INSULATION between PIN and PIN	Sudden vehicle movement (unintended) engine on, gear engagement with shift request and clutch closure with signalling)	Wrong plates SPACER material, unable to guarantee electrical insulation	Spacer material	material PBT ASA GF30	CARRY-OVER SOLUTION		Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM W3172_CTR_MTA.R01)	9	2	1	18	9	2	1	18	
B-2	to guarantee the ELECTRICAL ISOLATION (INTERNAL CONTACTS design provides electrical insulation between intended)	Intermittent and/or Incorrect and/or FUNCTIONALITY due to excessive PCB temperature due to missing electrical INSULATION between PIN and PIN	Sudden vehicle movement (unintended) propulsion engine on, gear shift request and clutch closure with signalling)	Unable to guarantee the electrical insulation due to inadequate test definition to supplier	acceptable minimal distance to sensor PIN to PIN	0.1 mm. MIN [MM cod. PK.0114116]	CARRY-OVER SOLUTION		Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM W3172_CTR_MTA.R01)	9	2	1	18					
						100MQ at 500 V [MM cod. PK.0114116]	CARRY-OVER SOLUTION		Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM W3172_CTR_MTA.R01)	9	2	1	18					
						2.8 ± 0.25 mm. [MM cod. PK.0114116]	NEW SOLUTION		Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM W3172_CTR_MTA.R01), Dimensional verify	9	2	3	54	Worst case assembly tolerance analysis	9	2	1	18
E-2	to guarantee the ELECTRICAL ISOLATION (HEAT SINK design provides right conditions for electrical insulation)	Intermittent and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB temperature due to missing electrical INSULATION between PCB and HEAT SINK	Sudden vehicle movement (unintended) propulsion engine on, gear engagement with shift request and clutch closure with signalling)	Superficial faults of HEAT SINK with THERMAL RESIN, unable to isolate pcb from HEAT SINK	SURFACE CLEANNESS and FINISHING	CLEANNESS and FINISHING requirements [MM cod. PK.0113768]	CARRY-OVER SOLUTION		Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM W3172_CTR_MTA.R01)	9	2	1	18					

F-2	to guarantee the ELECTRICAL INSULATION (THERMAL RESIN provides electrical insulation between PCB and HEATSINK)	Intermittent and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB temperature due to missing ELECTRICAL INSULATION between PCB and HEATSINK	Sudden vehicle movement (unintended) engine on, gear shift request and clutch closure with signalling)	Unable to guarantee the electrical insulation due to inappropriate THERMAL RESIN material specified unable to insulate PCB from heatsink	THERMAL RESIN material	THERMAL RESIN (date sheet [MM cod. MI.011627])	NEW SOLUTION	Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM V3172, CTR, MTA, R01)	9	2	1	18						
					THERMAL RESIN sphere diameter													
H-2	to guarantee the ELECTRICAL INSULATION (PCB design provides right conditions for electrical insulation)	Intermittent and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB temperature due to missing ELECTRICAL INSULATION between PCB and HEATSINK	Sudden vehicle movement (unintended) engine on, gear shift request and clutch closure with signalling)	Unable to guarantee the electrical insulation due to Short Circuit due to inappropriate distance between insulated PCB layer	PCB min. insulation track distance	0,20mm (40,025mm) [PCB general requirements cod. 0005936]	CARRY-OVER SOLUTION	Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM V3172, CTR, MTA, R01)	9	2	1	18						
					PCB material	FR4												
I-2	to guarantee the ELECTRICAL INSULATION (PCB design provides right conditions for electrical insulation)	Intermittent and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB temperature due to missing ELECTRICAL INSULATION between PCB and HEATSINK	Sudden vehicle movement (unintended) engine on, gear shift request and clutch closure with signalling)	Unable to guarantee the electrical insulation due to Short Circuit due to inappropriate distance between insulated PCB layer	PCB min. insulation track distance	0,20mm (40,025mm) [PCB general requirements cod. 0005936]	CARRY-OVER SOLUTION	Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM V3172, CTR, MTA, R01)	9	2	1	18						
					PCB material	FR4												
K-2	to guarantee the ELECTRICAL INSULATION (HEADER design provides right conditions for electrical insulation between PIN and PIN)	Intermittent and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to missing ELECTRICAL INSULATION between PIN to PIN	Sudden vehicle movement (unintended) engine on, gear shift request and clutch closure with signalling)	Unable to guarantee the electrical insulation due to Short Circuit due to incorrect frame design due to insufficient distance pin to pin dimensions	acceptable minimal distance dimension PIN to PIN	0,1 mm MIN [MM cod. PM.0114116]	CARRY-OVER SOLUTION	Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM V3172, CTR, MTA, R01)	9	2	1	18						
					Insulation test	100MQ at 500 V [MM cod. PM.0114116]												



MECHANICAL DESIGN FMEA PROJECT: CFC400X - AMT																											
FUNCTION REFERENCE	ELEMENTARY FUNCTION	POTENTIAL FAILURE MODE	POTENTIAL EFFECTS ON VEHICLE	POTENTIAL FAILURE CAUSES	MISSING DESIGN CHARACTERISTICS or ITEMS CAUSE FAILURE	DESIGN CRITERIA USED and VALUES ASSIGNED	VALIDATION LEVEL	KEY CHARACTERISTICS	DESIGN VALIDATION CONTROLS (according to TCE 001.05032)			CURRENT STATE			RESP & TARGET DATE	ACTIONS TAKEN	UPDATE STATE										
									S	D	O	RPN	S	D			O	RPN	S	D	O	RPN					
A-3	to guarantee the gas-tightness of the HEATSINK and gasket (SPACER provides a support to the HEATSINK and gasket)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to short circuit due to fluids ingress into the module	Sudden vehicle movement (unintended) propulsion engagement with engine on, gear shift request and clutch disengagement with signalling)	Inappropriate plastic material specified; warpage or dimensional modifications can occur when exposed to high temperature	SPACER material	material PBT ASA GF30 [MM cod. PM.0114116]	CARRY-OVER SOLUTION		Thermal shock, Sealing test (IP66, IP69K), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance (GM V3172, CTR, MTA.R01)	9	2	1	18														
				Inappropriate plastic material specified; dimensional modifications and/or cracks can occur during/after mechanical shocks						9	2	1	18														
				Inappropriate plastic material specified; exposure to automotive fluids destroys material						9	2	1	18														
				Inappropriate SPACER design; dimensions and related tolerances cannot guarantee correct positioning of gasket onto HEATSINK																							
C-3	to guarantee the SEALING (VENT VALVE provides flow control and prevents fluids ingress outside the TCU without affecting sealing capability)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to short circuit due to fluids ingress into the module	Sudden vehicle movement (unintended) propulsion engagement with engine on, gear shift request and clutch disengagement with signalling)	Unable to guarantee the sealing due to unable to resist to exposure automotive fluids due to incorrect VENT VALVE material	SPACER design	SPACER design [MM cod. PM.0114116]	NEW SOLUTION		Thermal shock, Sealing test (IP66, IP69K), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance (GM V3172, CTR, MTA.R01)	9	2	3	54														
				Unable to guarantee the sealing due to exposure automotive fluids due to incorrect MEMBRANE material																							
				Unable to guarantee the sealing due to unable to resist to exposure automotive fluids due to incorrect O-RING material																							
				Incorrect VENT design; does not fit correctly in the SPACER																							
				Incorrect VENT design or material; unable to resist to the vibrations range: VENT breaking	VENT VALVE design and material	VENT VALVE design and material [MM cod. PM.009559]	CARRY-OVER SOLUTION		Thermal shock, Sealing test (IP66, IP69K), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance (GM V3172, CTR, MTA.R01)	9	2	1	18														

D-3	to guarantee the SEALING. (SCREWS PROVIDE RIGHT HEATSINK mating on SPACER)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to short circuit due to fluids ingress into the module	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engagement with engine on, gear shift request and clutch closure with signalling)	Unable to guarantee sealing screws design that causes incorrect HEATSINK mating on SPACER.	SCREWS design	MS SCREW design [MM cod. MW.0117942]	NEW SOLUTION		Thermal shock, Sealing test (IP6k, IP9k), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance (GM W3172, CTR, MTA,ROD) Dimensional verify	9	2	3	54	Leakage test after Vibration test, Thermal aging, Thermal Shock and Chemical test.	9	2	1	18
E-3	to guarantee the SEALING. (RIGHT HEATSINK mating on SPACER provides sealing)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to short circuit due to fluids ingress into the module	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engagement with engine on, gear shift request and clutch closure with signalling)	Unable to guarantee the sealing due to incorrect gasket mating to HEATSINK due to inadequate roughness HEATSINK surface	HEATSINK roughness surfaces	3.2 Ra max [MM cod. PM.0113768]	CARRY-OVER SOLUTION		Thermal shock, Sealing test (IP6k, IP9k), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance (GM W3172, CTR, MTA,ROD) Dimensional verify	9	2	1	18					
G-3	to guarantee the SEALING (GASKET provides sealing between HEATSINK and SPACER)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to short circuit due to fluids ingress into the module	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engagement with engine on, gear shift request and clutch closure with signalling)	Inappropriate GASKET design; inadequate shape to seal the module	GASKET material	RMKUSIL 15-S 15/A-1NA. [MM cod. PM.0114116]	NEW SOLUTION		Thermal shock, Sealing test (IP6k, IP9k), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance (GM W3172, CTR, MTA,ROD)	9	2	3	54	Leakage test after Vibration test, Thermal aging, Thermal Shock and Chemical test.	9	2	1	18
K-3	to guarantee the SEALING (HEADER provides sealing between PCB and VEHICLE)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to short circuit due to fluids ingress into the module	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engagement with engine on, gear shift request and clutch closure with signalling)	Unable to guarantee the sealing due to automotive fluids due to inappropriate HEADER material specified	HEADER material	material IRT ASA CER [MM cod. PM.0114116]	CARRY-OVER SOLUTION		Thermal shock, Sealing test (IP6k, IP9k), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance (GM W3172, CTR, MTA,ROD)	9	2	1	18					

MECHANICAL DESIGN FMEA PROJECT: FC400X - AMT																		
FUNCTION REFERENCE	ELEMENTARY FUNCTION	POTENTIAL FAILURE MODE	POTENTIAL EFFECTS ON VEHICLE	POTENTIAL CAUSES FAILURE CAUSES	MISSING DESIGN CHARACTERISTICS or ITEMS CAUSE FAILURE	DESIGN CRITERIA USED and VALUES ASSIGNED	VALIDATION LEVEL	KEY CHARACTERISTICS	DESIGN VALIDATION CONTROLS (according to TCE 00105032)	CURRENT STATE			RESP & TARGET DATE	ACTIONS TAKEN	UPDATE STATE			
										S	D	O			RPN	S	D	O
B-4	to guarantee the ELECTRICAL CONNECTION (HEADER provide electrical connection between PCB and system)	Intermittent and/or permanent loss of ELECTRICAL CONNECTION between INTERNAL CONTACTS and PCB	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engine on, gear shift request and clutch closure with signalling)	Unable to guarantee the electrical connection due to wrong Pressfit design	Pressfit pin design	INTERNAL CONTACT design [MM cod. PM.0114116]	NEW SOLUTION		Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM W3172, CTR_MTA.R01)	9	2	3	54	TE design validation plan	9	2	1	18
				Unable to guarantee the electrical connection due to insufficient Pressfit Pin plating	Pressfit pin plating					9	2	3	54	TE design validation plan	9	2	1	18
	to guarantee the ELECTRICAL CONNECTION (HEADER provide electrical connection between PCB and system)	Intermittent and/or permanent loss of ELECTRICAL CONNECTION between INTERNAL CONTACTS and VB connections	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engine on, gear shift request and clutch closure with signalling)	Unable to guarantee the electrical connection due to wrong Pin plating	Pin plating	INTERNAL CONTACT design [MM cod. PM.0114116]	NEW SOLUTION		Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM W3172, CTR_MTA.R01)	9	2	3	54	TE design validation plan	9	2	1	18
				Unable to guarantee the electrical connection due to wrong pin design	Pin design					9	2	3	54	TE design validation plan	9	2	1	18
		Intermittent and/or permanent loss of ELECTRICAL CONNECTION between INTERNAL CONTACTS and sensors	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engine on, gear shift request and clutch closure without signalling)	Unable to guarantee the electrical connection due to wrong Pin plating	Pin plating	INTERNAL CONTACT design [MM cod. PM.0114116]	NEW SOLUTION		Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM W3172, CTR_MTA.R01)	10	2	3	60	TE design validation plan	10	2	1	20
				Unable to guarantee the electrical connection due to wrong pin design	Pin design					10	2	3	60	TE design validation plan	10	2	1	20
				Unable to guarantee the electrical connection due to weak solder joint due to insufficient PTH height over sensors PCB	Sensor Pin height	INTERNAL CONTACT design [MM cod. PM.0114116]	NEW SOLUTION		Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM W3172, CTR_MTA.R01), Dimensional verify	10	2	1	20					
H-4	to guarantee the ELECTRICAL CONNECTION (PCB design provides right conditions for electrical connection)	Intermittent and/or permanent loss of ELECTRICAL CONNECTION between PCB and INTERNAL CONTACTS	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engine on, gear shift request and clutch closure without signalling)	Unable to guarantee the electrical connection due to incorrect PCB pressfit holes design (diam. and plating)	PCB pressfit holes design	Holes design (doc. 00102844)	NEW SOLUTION		Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM W3172, CTR_MTA.R01), Dimensional verify	10	2	3	60	TE connection system validation	10	2	1	20
I-4	to guarantee the ELECTRICAL CONNECTION (PCB design provides right conditions for electrical connection)	Intermittent and/or permanent loss of ELECTRICAL CONNECTION between INTERNAL CONTACTS	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engine on, gear shift request and clutch closure without signalling)	Unable to guarantee the electrical connection due to incorrect PCB sensor holes design	PCB sensor holes design	Holes design (doc. 00103007)	CARRY-OVER SOLUTION		Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM W3172, CTR_MTA.R01), Dimensional verify	10	2	1	20					
K-4	to guarantee the ELECTRICAL CONNECTION (HEADER provide electrical connection between PCB and system)	Intermittent and/or permanent loss of ELECTRICAL CONNECTION between HEADER CONNECTORS and WIRING HARNESS	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engine on, gear shift request and clutch closure without signalling)	Unable to guarantee the electrical connection due to wrong Header Pin design	Header Pin design	HEADER design [MM cod. PM.0114116]	NEW SOLUTION		Life test endurance, Vibration with temperature cycle, Mechanical shock (GM W3172, CTR_MTA.R01), Dimensional verify	9	2	3	54	TE design validation plan	9	2	1	18
				Unable to guarantee the electrical connection due to wrong Header Pin plating	Header Pin plating					9	2	3	54	TE design validation plan	9	2	1	18

MECHANICAL DESIGN FMEA PROJECT: CFC400X - AMT

FUNCTION REFERENCE	ELEMENTARY FUNCTION	POTENTIAL FAILURE MODE	POTENTIAL EFFECTS ON VEHICLE	POTENTIAL FAILURE CAUSES	MISSING DESIGN CHARACTERISTICS or ITEMS CAUSE FAILURE	DESIGN CRITERIA USED VALUES ASSIGNED	VALIDATION LEVEL	KEY CHARACTERISTICS	DESIGN VALIDATION CONTROLS (according to TCE 001 05032)	CURRENT STATE			RESP & TARGET DATE	ACTIONS TAKEN	UPDATE STATE		
										S	D	O			RPN	S	D
A-5	to guarantee the TRACEABILITY (SPACER marking provides traceability of supply date)	the customer is disabled to trace the supply date	none	Unable to read the datary due to inappropriate print Depth/Height on SPACER surface	Depth/Height of the print	0,3 mm; Max [MM cod: PM.0114116]	CARRY OVER SOLUTION		Sealing test (IPK, IP-9K), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance (GH V3172, CTR, MTA, R01)	1	2	1	2				
E-5	to guarantee the TRACEABILITY (HEAT SINK marking provides traceability of supply date)	the customer is disabled to trace the supply date	none	Unable to read the datary due to inappropriate print Depth/Height on HEATSINK surface	Depth/Height of the print	0,3-0,5 mm; [MM cod: PM.0313768]	CARRY OVER SOLUTION		Sealing test (IPK, IP-9K), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance (GH V3172, CTR, MTA, R01)	1	2	1	2				
L-5	to guarantee the TRACEABILITY (LABEL provides traceability of all TCU informations)	the customer is disabled to trace the SW, HW and calibration release	none	Unable to read the label due to inappropriate stamp on LABEL surface	Stamp label	Label printing [MM doc: 00103010]	CARRY OVER SOLUTION		Sealing test (IPK, IP-9K), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance (GH V3172, CTR, MTA, R01)	1	2	1	2				
			none	Unable to trace the SW, HW and calibration release from cover surface	Adhesive material	ACRYLIC (Thermoseal 10um) [cod: PM.043986]				1	2	1	2				

MECHANICAL DESIGN FMEA PROJECT: CFC400X - AMT																		
FUNCTION REFERENCE	ELEMENTARY FUNCTION	POTENTIAL FAILURE MODE	POTENTIAL EFFECTS ON VEHICLE	POTENTIAL CAUSES FAILURE CAUSES	MISSING DESIGN CHARACTERISTICS or THEIR CAUSE or FAILURE	DESIGN CRITERIA USED and VALUES ASSIGNED	VALIDATION LEVEL	KEY CHARACTERISTICS	DESIGN VALIDATION CONTROLS (according to ICE 001.03.032)	CURRENT STATE			RESP TARGET DATE	ACTIONS TAKEN	UPDATE STATE			
										S	D	O			RPN	S	D	O
A-6	to guarantee the RECYCLING	the customer is disabled to trace the symbol material	none	Unable to read the symbol material due to inappropriate print depth/height on SPACER surface	Depth/Height of the print	0,3 mm. Max [MM cod. PK.01.14116]	CARRY OVER SOLUTION		none	1	1	1			7	2	1	14
E-6	to guarantee the RECYCLING	the customer is disabled to trace the symbol material	none	Unable to read the symbol material due to inappropriate print depth/height on HEAT SINK surface	Depth/Height of the print	0,3-0,5 mm. [MM cod. PK.01.13768]	CARRY OVER SOLUTION		none	1	1	1			7	2	1	14

FUNCTION REFERENCE	ELEMENTARY FUNCTION	POTENTIAL FAILURE MODE	POTENTIAL EFFECT ON VEHICLE	POTENTIAL CAUSES FAILURE CAUSES	MISSING DESIGN CHARACTERISTICS or ITEMS CAUSE FAILURE	DESIGN CRITERIA USED VALUES ASSIGNED	VALIDATION LEVEL	KEY CHARACTERISTICS	DESIGN VALIDATION CONTROLS (according to TCE 00106032)	CURRENT STATE			RESIP & TARGET DATE	ACTIONS TAKEN	UPDATE STATE		
										S	D	O			RPN	S	D
A-7	to guarantee the MECHANICAL PROTECTION and RESISTANCE (SPACER provides Mech. Protection to PCB and system connections)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to short circuit due to fluids ingress into the module	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engagement with engine on, gear shift request and clutch closure with signaling)	Unable to guarantee Mechanical Protection due to SPACER inappropriate wall thickness	SPACER wall thickness dimension	1.6 mm (MM cod. MI.0114116)	NEW SOLUTION		Thermal shock, Sealing test (IP9k, IP>9k), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance, Vibrations test (GM W3172, CTR_MTA.R01) Dimensional verify	9	2	3	54	9	2	1	18
										9	2	1	18				
C-7	to guarantee the MECHANICAL PROTECTION and RESISTANCE (VENT VALVE provides Mech. Protection to TCU outside the TCU without affecting sealing capability)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to short circuit due to fluids ingress into the module	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engagement with engine on, gear shift request and clutch closure with signaling)	Unable to guarantee Mechanical Protection due to SPACER inappropriate wall thickness	SPACER material	PBT ASA GF30 (MM cod. MI.0114116)	CARRY OVER SOLUTION		Thermal shock, Sealing test (IP9k, IP>9k), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance, Vibrations test (GM W3172, CTR_MTA.R01)	9	2	1	18				
										9	2	1	18				
E-7	to guarantee the MECHANICAL PROTECTION and RESISTANCE (RIGHT HEATSHINK sealing on SPACER provides sealing)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to fluids ingress into the module	Sudden vehicle movement (unintended propulsion engagement with engine on, gear shift request and clutch closure with signaling)	Unable to guarantee Mechanical Protection due to HEATSHINK cracks under Automotive fluids exposure due to inappropriate VALVE material	HEATSHINK wall thickness	2.5 mm. (MM cod. MI.0113768)	NEW SOLUTION		Thermal shock, Sealing test (IP9k, IP>9k), Salt spray tests, Temperature and Humidity test, Fluids resistance, Vibrations test (GM W3172, CTR_MTA.R01)	9	2	3	54	9	2	1	18
										9	2	1	18				
F-7	to guarantee the MECHANICAL PROTECTION and RESISTANCE (THERMAL RESIN ensures the thermal transfer to the heatbank of the heat generated by the PCB components)	Intermittent and/or Incorrect and/or Permanent loss of FUNCTIONALITY due to excessive PCB temperature due to insufficient dissipation	Vehicle stop (hydraulic pump never activated)	Unable to guarantee the right functionality due to THERMAL RESIN degradation under Thermal stress	THERMAL RESIN material	THERMAL RESIN data sheet (MM cod. MI.0116257)	NEW SOLUTION		Life test endurance, High temperature durability, High temperature cycle (GM W3172, CTR_MTA.R01)	8	2	1	16				
										8	2	1	16				



MECHANICAL DESIGN FMEA PROJECT: CFC400X - AMT																	
FUNCTION REFERENCE	ELEMENTARY FUNCTION	POTENTIAL FAILURE MODE	POTENTIAL EFFECTS ON VEHICLE	POTENTIAL CAUSES FAILURE CAUSES	MISSING DESIGN CHARACTERISTICS or ITEMS CAUSE FAILURE	DESIGN CRITERIA USED and VALUES ASSIGNED	VALIDATION LEVEL	KEY CHARACTERISTICS	DESIGN VALIDATION CONTROLS (according to TCE 00105032)	CURRENT STATE			RESP & TARGET DATE	ACTIONS TAKEN	UPDATE STATE		
										S	D	O			RPN	S	D
M-8	to guarantee the TCU ASSEMBLY	TCU cannot be assembled on HYDRAULIC GROUP	none	Unable to assemble the TCU due to incorrect interface design (Bushes for screws, sensors connection, electrovalves connection, ground connection)	TCU interface characteristics	TCU interface characteristics [Mfr doc:010306]	NEW SOLUTION		<b>Dimensional verify</b>	1	2	3	6				



## BIBLIOGRAFIA

- Ben-Daya M., Knezevic J., Ait-Kadi D., Raouf A., *Handbook of Maintenance Management and Engineering*, London, Springer, 2009.
- Bhavikatti, S. S.; *Finite element analysis*, New Delhi; New Age International Publishers, 2005.
- Cengel Y., *Termodinamica e trasmissione del calore* , Milano, McGraw-Hill Libri Italia srl, 1998.
- Corso base di design termico: elementi di analisi termica per elettronica*, Assago, Flomerics, 2001.
- FloTHERM<sup>®</sup> *Background Theory Reference Guide: software version 9.3* , Wilsonville, Mentor Graphics Corporation, 1998-2012.
- FloTHERM<sup>®</sup> *User Guide: software version 9.3*, Wilsonville, Mentor Graphics Corporation, 1998-2012 .
- Genta C., *Vibration Dynamics and Control*, Torino, Springer, 2009 .
- He J., Fu Z. *Modal Analysis*, Boston, Butterworth-Heinemann, 2001.
- Lui G. R., Quek S. S., *The finite Element Method: A Practical Course*, Oxford, Butterworth-heinemann, 2003.
- Normativa GM: GMW3172- *General Specification for Electrical/Electronic Component Environmental and Durability Tests*, General Motors Corporation ,2001.
- Normativa MM: 00031127- *F.M.E.C.A. di Progetto Componente HW*, Magneti Marelli S.p.A.- Powertrain, 2006.
- Product Information: Minlon<sup>®</sup> *10B140 NC010*, DuPont Company,2003.
- Rudolph R., *Handbook of reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*, London, Springer, 2009.
- Shabany Y. , *Heat transfer: thermal management of electronics*, Boca Raton , CRC Press. Taylor & Francis Group, 2010.
- Stamatis D. H., *Failure Mode and Effect Analysis: Fmea from Theory to Execution*, Milwaukee ,ASQ,2003 .

*Structural Analysis Guide*, ANSYS, 2009.

Yang G., *Life Cycle Reliability Engineering*, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2007.

## SITOGRAFIA

[www.magnetimarelli.com/it](http://www.magnetimarelli.com/it)

[http://marelli2.webhat.it/italian/powertrain\\_prodotti\\_automated.php](http://marelli2.webhat.it/italian/powertrain_prodotti_automated.php)

[www.mentor.com/flotherm](http://www.mentor.com/flotherm)

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