

Analisi e progetto termico di apparecchiature elettroniche

**Corso di Elettronica Industriale
Laurea Magistrale Ingegneria Elettronica
Prof Ing Lorenzo Capineri
a.a. 2014/2015**



✦ Modalità di trasmissione del calore

- Conduzione
- Convezione
- Radiazione

✦ Progetto termico di apparecchiature elettroniche

- Metodo Analitico
 - Equivalenza tra parametri elettrici e termici
 - Esempio pratico
- Metodo Simulato
 - Introduzione simulazione termica
 - Caratteristiche programma “Flotherm”
 - Metodo di progettazione tramite “Flotherm”
 - Esempio pratico



Modalità di trasmissione del calore

La trasmissione di energia sottoforma di calore avviene tra due sistemi a diversa temperatura o in un sistema dove esiste un gradiente di temperatura

La termodinamica studia le relazioni tra calore e le altre forme di energia.

La termodinamica si basa sulle tre leggi fondamentali:

- Legge di conservazione della massa
- 1^a Legge della termodinamica
- 2^a Legge della termodinamica



Le modalità di trasmissione del calore sono:

Conduzione

Convezione

Irraggiamento

Dal punto di vista ingegneristico il problema essenziale e' la determinazione della potenza termica per una determinata differenza di temperatura

Potenza termica o flusso termico

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \dot{Q} \quad [J \cdot s^{-1}] = [W]$$

Conduzione

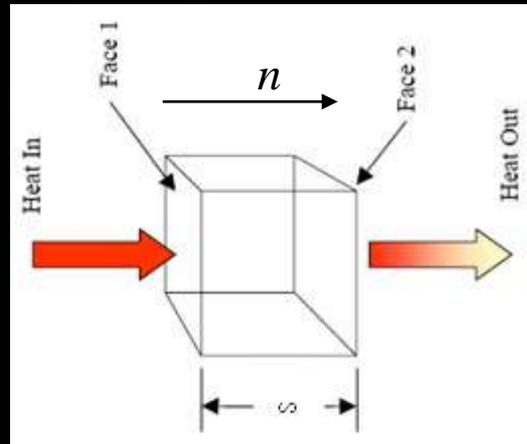
La conduzione e' un processo mediante il quale il calore fluisce da una regione a temperatura maggiore verso una regione a temperatura minore attraverso un solo mezzo (solido, liquido, o aeriforme) o attraverso mezzi diversi posti a diretto contatto fisico

Il trasferimento è dovuto allo scambio di energia cinetica tra atomi in collisione e dal movimento di elettroni.

Problema analitico unidimensionale

Faccia 1 e 2: temperatura costante, $T_1 > T_2$

Flusso entrante = Flusso uscente



Equazione di J.B.J. Fourier 1822

$$q_k = -kA \frac{\partial T}{\partial n}$$

Gradiente temperatura
nella direzione n (K/m)

Potenza termica (W)

Conducibilità termica (W/mK)

Area sezione (m²)

Conducibilità termica

Proprietà dei materiali CONDUTTORI : elevata conducibilità termica

Proprietà dei materiali ISOLANTI : bassa conducibilità termica

| <i>Materiale</i> | <i>Conducibilità [W/(mK)]</i> |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Vapore acqueo saturo a 100 °C | 0,0248 |
| Ammoniaca | 0,0218 |
| Elio | 0,1415 |
| Ossigeno | 0,0244 |
| Acqua | 0,5910 |
| Alcool Etilico | 0,1770 |
| Mercurio | 7,9600 |
| Olio di oliva | 0,1700 |
| Pomice | 0,2300 |
| Polistirolo espanso (25 kg/mc) | 0,0350 |
| Sughero in lastre | 0,0500 |
| Calcestruzzo | 0,93-1,5 |
| Laterizi | 0,7-1,3 |
| Terreno asciutto | 0,8200 |
| Ferro | 75 |
| Acciaio | 30-50 |
| Piombo | 35 |
| Oro | 296 |
| Rame | 380 |
| Argento | 419 |
| Diamante | 2100 |

Agitazione termica degli elettroni

Agitazione termica elastica



Resistenza termica

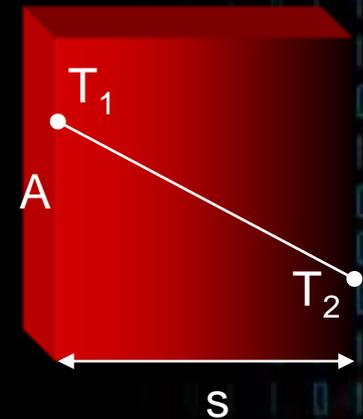
Legge di Fourier

$$q_k = -kA \frac{\partial T}{\partial n}$$

Caso unidimensionale

Parete piana

Regime stazionario $\text{grad}(T) = \text{cost}$



$$q_k = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{s}$$

Resistenza Termica R_k :

$$R_k = \frac{(T_1 - T_2)}{q_k} = \frac{s}{kA} \quad [^{\circ}\text{C} / \text{W}]$$

Analogia tra flusso termico ed elettrico

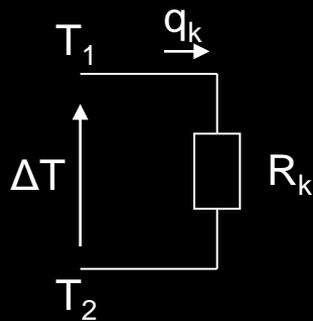
Legge di Fourier

$$q_k = \frac{(T_1 - T_2)}{R_k}$$

Flusso termico

Differenza temperatura

Resistenza termica



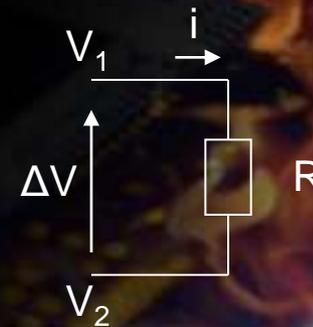
Legge di Ohm

$$i = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

Flusso corrente

Differenza tensione

Resistenza elettrica

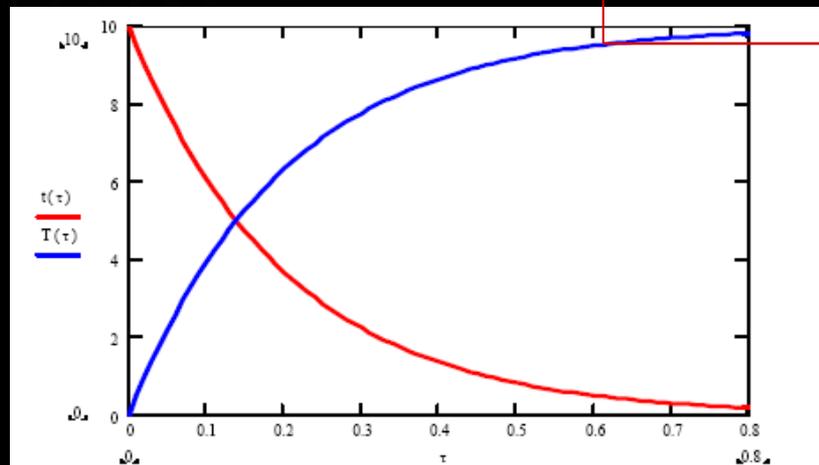


Conduzione in regime variabile

- equazioni differenziali in coordinate spazio-temporali di complessa risoluzione

TRANSITORIO DI RISCALDAMENTO E RAFFREDDAMENTO DI UN CORPO A RESISTENZA TERMICA TRASCURABILE IN RISPOSTA AD UN GRADINO DI TEMPERATURA (q=grad)

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{d(T - T_a)}{d\tau} = - (T_i - T_a) \cdot \frac{hA}{mc} e^{-(hA/mc)\tau}$$



Temperatura ambiente

Temperatura corpo iniziale

Costante di tempo

$$\tau_c = \frac{mc}{hA}$$

m: massa (Kg)

c: calore specifico (J/Kg*K)

h: coeff. Convezione (W/m²K)

A: area (m²)

Convezione

La convezione e' un processo di trasporto di energia mediante l'azione combinata della conduzione , dell'accumulo di energia e del mescolamento

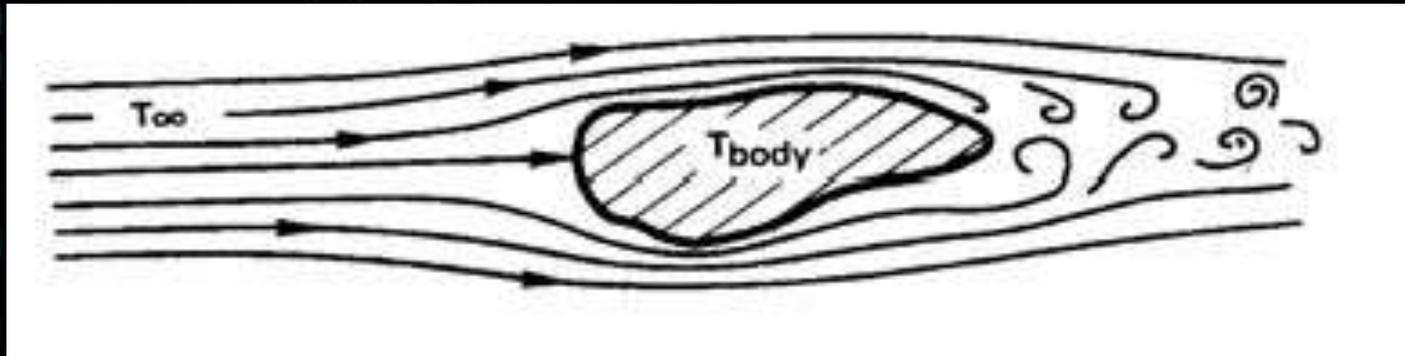
E' il piu' importante meccanismo di scambio energetico tra una superficie solida ed un liquido o gas che la lambisce

Esistono due tipi di convezione:

- Libera o naturale con moto dipendente dai gradienti di densita' e temperatura
- Forzata con moto indotto da agenti esterni (pompa, ventilatore etc)



Legge di Isaac Newton (1701)



T_b Temperatura superfice del corpo

T_∞ Temperatura di un punto specificato lontano dalla superfice (Es T ambiente)
(°K)

Potenza termica (W)

$$q = h \cdot A \cdot (T_b - T_w)$$

Coefficiente di convezione (W/m^2K)

Superficie di scambio (m^2)

Coefficiente di convezione

Dipende da molti fattori:

- Proprietà fisiche del materiale
- Differenza di temperatura tra i corpi
- Velocità del fluido
- Geometria dello scambio termico

Metodo dell'analisi dimensionale →
(teorema pi-greco)

Numero di Reynolds

Indicatore regime di moto del fluido

Velocità →

Densità →

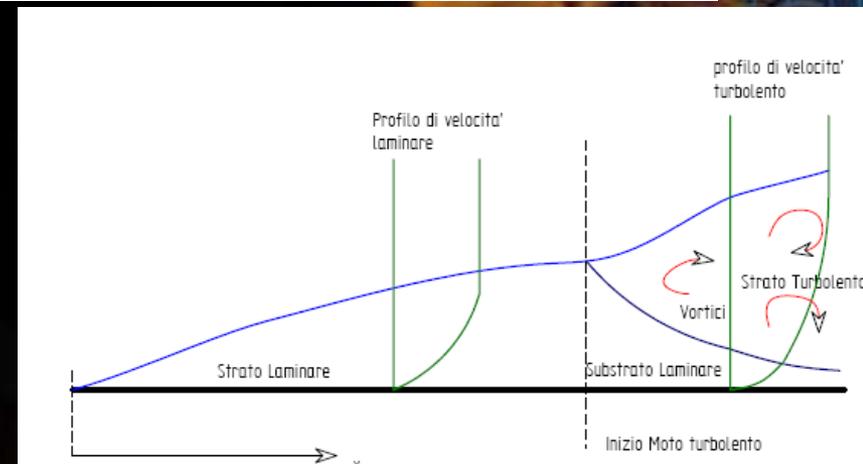
Lunghezza particolare
del moto dei fluidi →

Viscosità dinamica →

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$

Fenomeni complessi possono essere descritti mediante opportuni raggruppamenti di grandezze fisiche detti *numeri adimensionali*

| | |
|--------------------|-----------------------------|
| $Re < 2300$ | <i>moto laminare;</i> |
| $2300 < Re < 2900$ | <i>moto di transizione;</i> |
| $Re > 2900$ | <i>moto turbolento.</i> |



Irraggiamento

L'irraggiamento e' un processo mediante il quale il calore fluisce da un corpo a temperatura maggiore verso un corpo a temperatura minore quando i corpi non sono a contatto,

Il mezzo di trasporto delle onde elettromagnetiche deve essere trasparente o il vuoto.

Il fenomeno di trasporto avviene alla velocità della luce $3 \cdot 10^8$ m/s nel vuoto

La teoria dell'elettromagnetismo governa i fenomeni di radiazione termica che hanno lunghezze d'onda maggiori rispetto a quelli della luce visibile

Le onde elettromagnetiche emesse da tutti i corpi con temperatura superiore allo zero assoluto divengono energia interna (e quindi calore) quando sono assorbite da un altro corpo

Corpo Nero

Corpo ideale capace di assorbire tutte le radiazioni

**Legge di Stefan 1879 –
Boltzmann 1884**

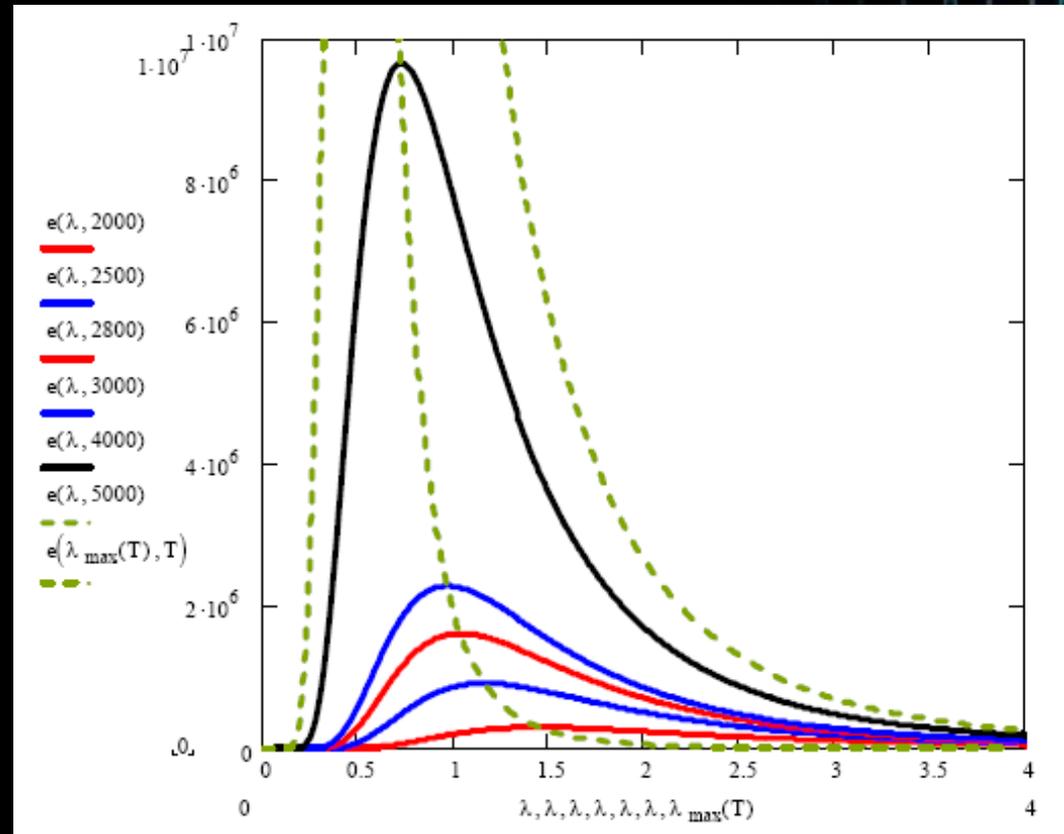
Potenza termica radiante (W/m^2)

$$q_i = \sigma A T^4$$

temperatura assoluta (K)
area superficie radiante [m^2]

σ costante di Stefan – Boltzmann
 $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4$

Energia emessa in funzione della lunghezza d'onda



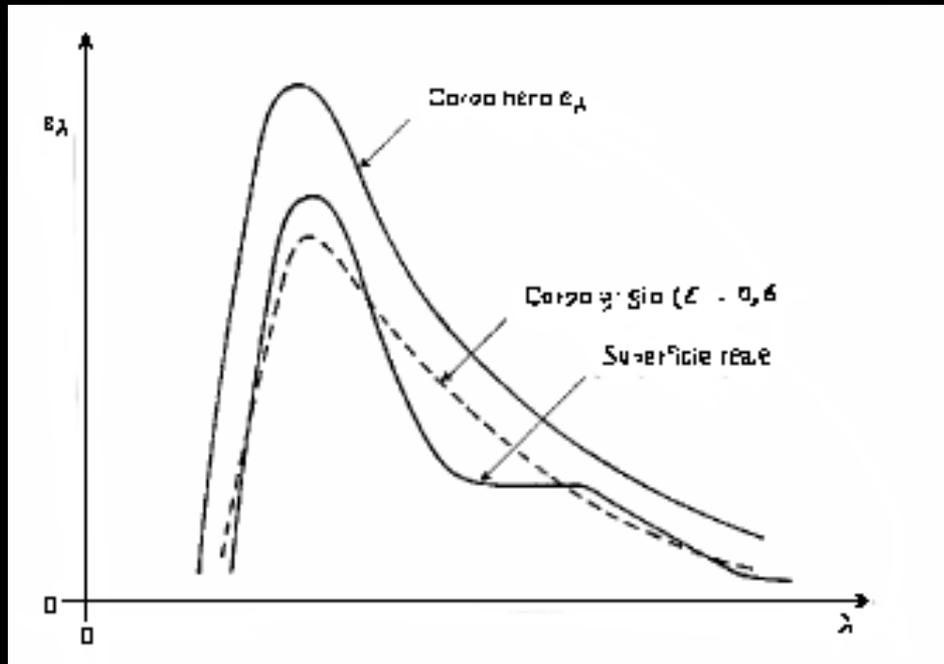
Lunghezza d'onda max riferita alla temperatura T (μm)

Corpo Grigio

Corpo reale capace di emettere, per data temperatura, come un corpo nero ma con intensità che sta a quello dello stesso corpo nero in rapporto costante

Emissività ε : rapporto fra l'emissione del corpo grigio e quella del corpo nero

$$\varepsilon = \frac{q_{grigio}}{\sigma AT^4}$$



Emissione globale corpo grigio

Poiché l'emissività è sempre minore di uno, il corpo grigio emette sempre di meno di un corpo nero

$$\varepsilon = \frac{q_{grigio}}{\sigma AT^4}$$

Scambio tra due superfici di corpi grigi:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot F_{1,2} \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Quantità di calore Trasferito (W) ←

→ Differenza Temperatura (K)

→ Superficie (m²)

→ Fattore di forma o di vista

→ Emissività

→ Costante Stefan-Boltzmann (W/m²K⁴)

Analisi termica di apparecchiature elettroniche

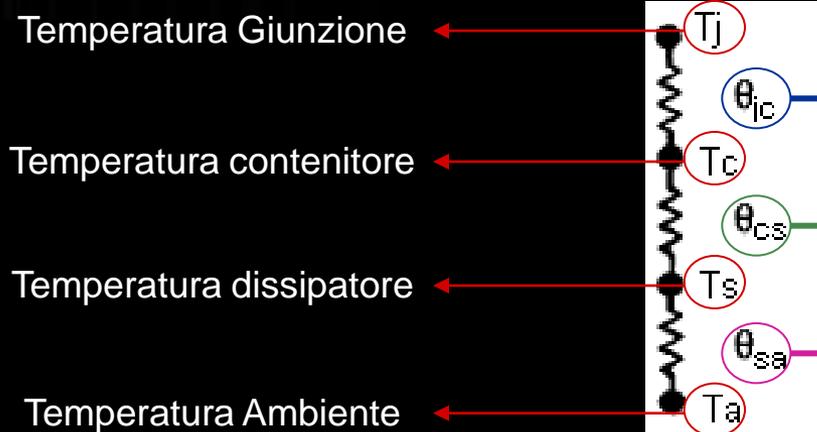
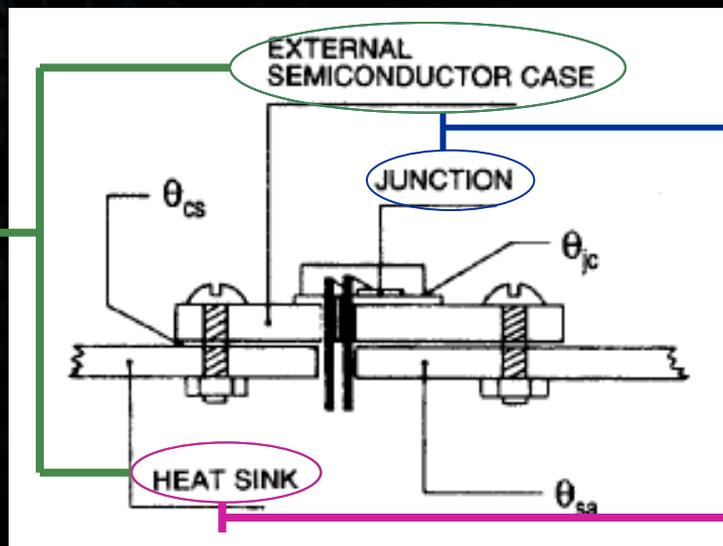
- Metodo analitico
Equivalenza tra parametri termici ed elettrici
- Metodo simulato
Simulatore Fluidodinamico



Metodo Analitico

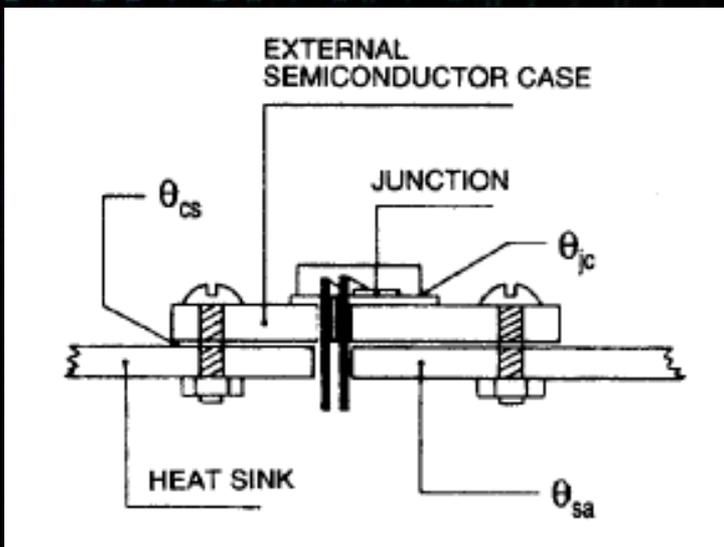
- Analisi termica considerando l'analogia tra i parametri termici ed elettrici
- Metodo semplice che fornisce un'idea immediata del problema termico
- Approssimazione del problema termico effettivo (considera principalmente la conduzione del calore)
- Risulta essere il metodo più utilizzato per la progettazione termica di sistemi elettronici non complessi
- I costruttori forniscono dati a riguardo dei loro componenti principalmente utilizzabili con il metodo analitico

Progettazione termica



Resistenza termica totale ($^{\circ}\text{C} / \text{W}$)

$$\theta_{tot} = \theta_{jc} + \theta_{cs} + \theta_{sa}$$



Resistenza termica totale

Resistenza termica giunzione-case

- Intrinseca del componente elettronico
- Valore fornito direttamente dal costruttore
- Parametro del progetto fisso

Resistenza termica case-sink

- Metodo di contatto tra il componente ed il dissipatore
- Valore fornito direttamente dal costruttore
- Parametro del progetto variabile

$$\theta_{tot} = \theta_{jc} + \theta_{cs} + \theta_{sa}$$

Resistenza termica sink-ambiente

- Tipologia di dissipatore e metodo di ventilazione
- Valore da calcolare in fase progettuale

Progetto analitico

Legge di Fourier

$$q = \frac{\Delta T}{\theta} \rightarrow \theta = \frac{\Delta T}{q} \rightarrow \theta_{TOT} = \frac{T_j - T_a}{q}$$

$$\theta_{sa} + \theta_{cs} \leq \frac{T_j - T_a}{q} - \theta_{jc}$$

Scelta del dissipatore

Scelta del contatto termico

Scelta del contatto termico

Il valore di resistenza termica è legato:

- Finitezza della superficie
- Uniformità
- Pressione di montaggio applicata
- Area di contatto
- Tipologia di materiale di interfaccia ed il suo spessore

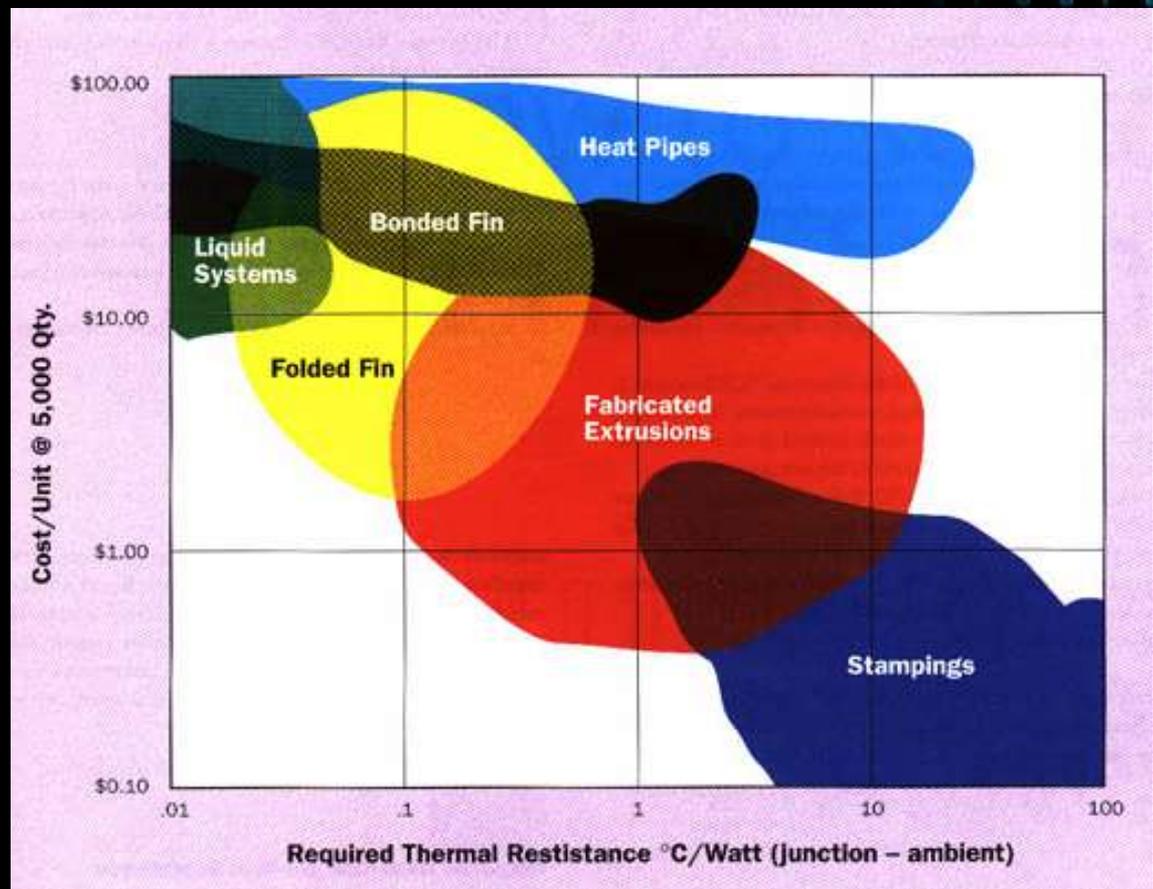
| Material | Conductivity W/in °C | Thickness inches | Resistance inch ² °C/W |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| There-O-Link Thermal | 0.010 | 0.002 | 0.19 |
| High Performance Thermal | 0.030 | 0.002 | 0.07 |
| Kon-Dux | 0.030 | 0.005 | 0.17 |
| 1050 Ther-A-Grip | 0.009 | 0.005 | 0.57 |
| 1897 in Sil-8 | 0.010 | 0.008 | 0.81 |



Scelta del dissipatore

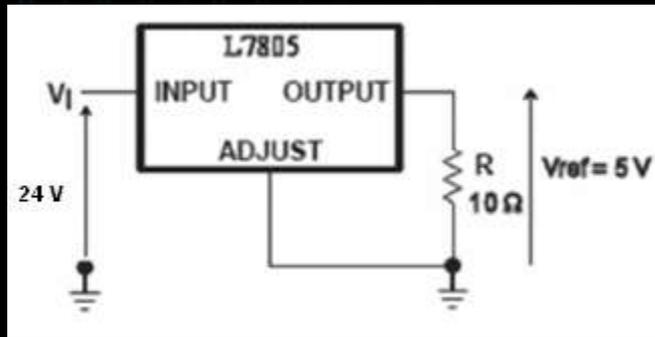
Il valore di resistenza termica equivalente è legato:

- Tipologia dissipatore e materiale
- Tipologia di ventilazione
- Costo
- Affidabilità

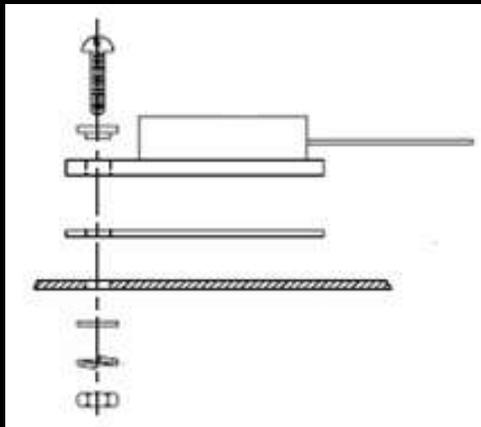


Esempio pratico di progettazione termica

Alimentatore stabilizzato integrato



Schema elettrico



Schema montaggio

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

| Symbol | Parameter | Value | Unit |
|-----------|--|--------------------|------|
| V_i | DC Input Voltage (for $V_o = 5$ to 18V) (for $V_o = 20, 24V$) | 35 | V |
| | | 40 | V |
| I_o | Output Current | Internally limited | |
| P_{tot} | Power Dissipation | Internally limited | |
| T_{op} | Operating Junction Temperature Range (for L7800) (for L7800C) | -55 to 150 | °C |
| | | 0 to 150 | °C |
| T_{stg} | Storage Temperature Range | -65 to 150 | °C |

THERMAL DATA

| Symbol | Parameter | D ² PAK | TO-220 | ISOWATT220 | TO-3 | Unit |
|----------------|---|--------------------|--------|------------|------|------|
| $R_{thj-case}$ | Thermal Resistance Junction-case Max | 3 | 3 | 4 | 4 | °C/W |
| $R_{thj-amb}$ | Thermal Resistance Junction-ambient Max | 62.5 | 50 | 60 | 35 | °C/W |

ELECTRICAL CHARACTERISTICS FOR L7805 (refer to the test circuits, $T_j = -55$ to 150 °C, $V_i = 10V$, $I_o = 500$ mA, $C_i = 0.33$ μF , $C_o = 0.1$ μF unless otherwise specified)

| Symbol | Parameter | Test Conditions | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|-------------------------------|----------------------------|--|------|------|------|-------------|
| V_o | Output Voltage | $T_j = 25$ °C | 4.8 | 5 | 5.2 | V |
| V_o | Output Voltage | $I_o = 5$ mA to 1 A $P_o \leq 15$ W $V_i = 8$ to 20 V | 4.65 | 5 | 5.35 | V |
| ΔV_o^* | Line Regulation | $V_i = 7$ to 25 V $T_j = 25$ °C | | 3 | 50 | mV |
| | | $V_i = 8$ to 12 V $T_j = 25$ °C | | 1 | 25 | mV |
| ΔV_o^* | Load Regulation | $I_o = 5$ to 1500 mA $T_j = 25$ °C | | | 100 | mV |
| | | $I_o = 250$ to 750 mA $T_j = 25$ °C | | | 25 | mV |
| I_d | Quiescent Current | $T_j = 25$ °C | | | 6 | mA |
| ΔI_d | Quiescent Current Change | $I_o = 5$ to 1000 mA | | | 0.5 | mA |
| ΔI_d | Quiescent Current Change | $V_i = 8$ to 25 V | | | 0.8 | mA |
| $\frac{\Delta V_o}{\Delta T}$ | Output Voltage Drift | $I_o = 5$ mA | | 0.6 | | mV/°C |
| eN | Output Noise Voltage | B = 10Hz to 100KHz $T_j = 25$ °C | | | 40 | $\mu V/V_o$ |
| SVR | Supply Voltage Rejection | $V_i = 8$ to 18 V $f = 120$ Hz | 68 | | | dB |
| V_d | Dropout Voltage | $I_o = 1$ A $T_j = 25$ °C | | 2 | 2.5 | V |
| R_o | Output Resistance | $f = 1$ KHz | | 17 | | m Ω |
| I_{sc} | Short Circuit Current | $V_i = 35$ V $T_j = 25$ °C | | 0.75 | 1.2 | A |
| I_{scp} | Short Circuit Peak Current | $T_j = 25$ °C | 1.3 | 2.2 | 3.3 | A |

Progetto termico

$$T_{a_{\max}} = 50^{\circ}\text{C}$$

$$q = 12\text{W}$$

$$T_{j_{\max}} = 150^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{jc} = 3^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

$$\theta_{sa} + \theta_{cs} \leq \frac{T_j - T_a}{q} - \theta_{jc}$$



$$\theta_{sa} + \theta_{cs} \leq \frac{150 - 50}{12} - 3 = 5.4^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

Contatto Case-Sink

Thermalfilm™ and Thermalfilm™ MT

ELECTRICAL – TYPICAL VALUE @ 25° C

| PROPERTY | THERMALFILM™ | THERMALFILM™ MT | TEST METHOD |
|-------------------------------------|-------------------------|---|--|
| Dielectric strength | 0.03mm (1-mil) | 177.2 x 10 ³ volts/mm | ASTM D149-64 |
| | | 275.6 x 10 ³ volts/mm (7,000 volts/mil) | |
| Dielectric constant | 3.5 | 4.3 | ASTM D150-64T |
| Dissipation factor | 0.002 | 0.002 | ASTM D150-64T |
| Volume resistivity | 10 ¹⁷ ohm-cm | 10 ¹⁷ ohm-cm | ASTM D257-61 |
| Surface resistivity | 10 ¹⁵ ohms | 10 ¹⁵ ohms | ASTM D257-61 |
| Corona start voltage .025mm (1-mil) | 465 volts | 465 volts | ASTM D1868-61T |
| Insulation resistance | 100.000 megohm mfd. | 100.000 megohm mfd. | Based on 0.05 mfd wound capacitor using 0.25 mm (1-mil) Film |

PHYSICAL

| | | | |
|---------------------------------|--|---|----------------|
| Ultimate tensile strength (MD) | 1.72 x 10 ⁸ Pa (25,000 psi) | 103 MPa (1500 psi) | ASTM D882-64T |
| Bursting strength Test (Mullen) | 3.10 x 10 ⁵ Pa (45 psi) | 0.31 MPa (45 psi) | ASTM 0774-63 |
| Tear strength – initial | 27,559 gm/mm (700 gm/mil) | 35,433 gm/mm (900 gm/mil) | ASTM D1004-61 |
| Density | 1.42 gm/cm ³ (88.7 lb/ft ³) | 1.78 gm/cm ³ (111.1 lb/ft ³) | ASTM D1505-63T |
| Folding endurance (MIT) | >10,000 cycles | >10,000 cycles | ASTM D2176-63T |

THERMAL

| | | | |
|---------------------------|--|--|-------------------------------|
| Melting point | NONE | NONE | |
| Zero strength temperature | 815°C (1499°F) | 815°C (1499°F) | Hot Bar (Du Pont test) |
| Cut through temperature | 435°C (815°F) | 435°C (815°F) | Weighted probe on heated film |
| | 525°C (977°F) | 525°C (977°F) | (Du Pont test) |
| Service temperature | -260°C to 240°C | -260°C to 240°C | |
| | (-436°F to 464°F) | (-436°F to 464°F) | |
| Thermal conductivity | 0.156 Wm ⁻¹ K ⁻¹ | 0.379 Wm ⁻¹ K ⁻¹ | Model TC-1000 twin heatmeter |
| | (.09 BTU/hr-ft ² -°F) | (.219 BTU/hr-ft ² -°F) | Comparitive tester |
| Flammability | V-0, UL "E" card E39505 | V-0, UL "E" card E39505 | UL 94 |

Notes: One mil equals .001 inch

Thermalfilm™ MT part numbers begin with "46".

Insulator thickness is .05mm (.002") unless otherwise specified.

Dimensional tolerances are ± .38mm (.015"), hole diameters are ± .25mm (.010") and angularity is ± 1 1/2° unless otherwise specified.

Legge Fourier

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{s}{\lambda \cdot A}}$$



$$\theta_{cs} = \frac{s}{\lambda \cdot A}$$



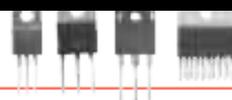
$$\theta_{cs} = \frac{0.05 \cdot 10^{-3}}{0.156 \cdot 17.75 \cdot 10.40 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{0.05 \cdot 10^{-3}}{0.156 \cdot 185.5 \cdot 10^{-6}} \cong 1.73^\circ C/W$$

Dissipatore

$$\theta_{sa} + \theta_{cs} \leq 5.4^{\circ}\text{C} / \text{W}$$

$$\theta_{sa} \leq 5.4 - \theta_{cs} = 5.4 - 1.73 = 3.67^{\circ}\text{C} / \text{W}$$

TO-220 & TO-218 & TO-247 & Multiwatt Heat Sinks

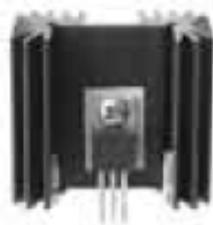


6396, 6398, 6399, 6400 High power extruded heat sink with large radial fins

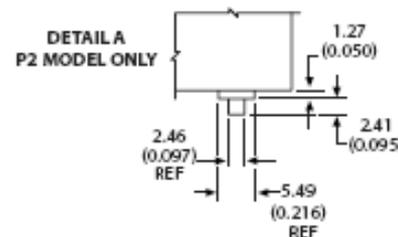
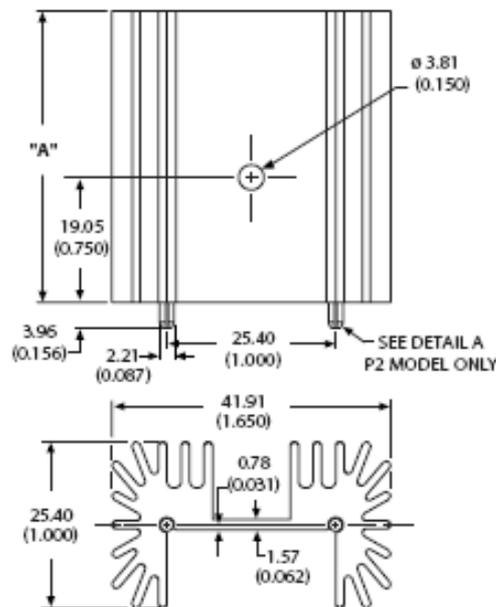
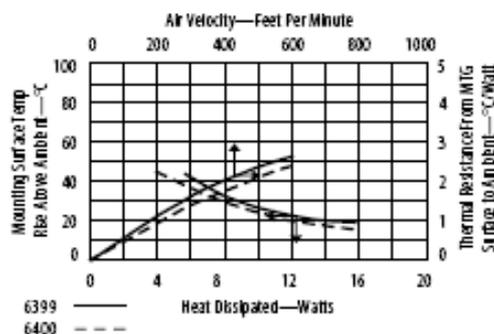
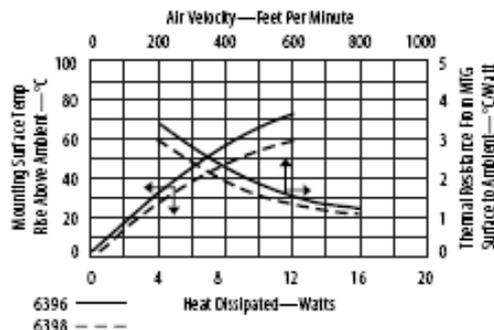
Grease & Epoxy page 112

Mounting Kits page 99

THRU HOLE DISCRETE SEMICONDUCTOR PACKAGES



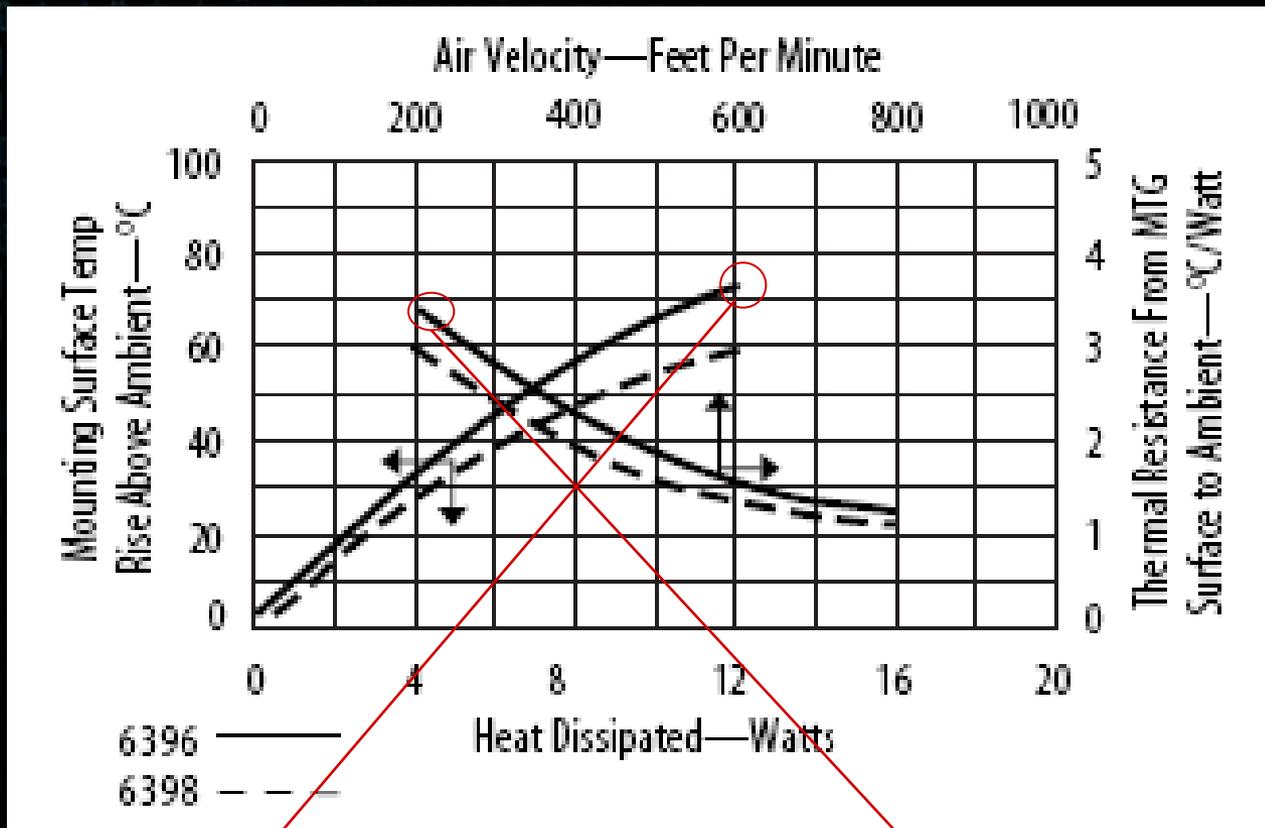
High power extruded heat sink with large radial fins and solderable shoulder pins allows vertical mounting without stress on the device leads. Available with shoulder pins to provide fixed clearance between the bottom of the heat sink and the board. Available in four heights for TO-220, TO-218, TO-247 and multiwatt devices.



ORDERING INFORMATION

| Part Number | Description | "A" Dim | Dia of PCB Plated Thru Hole for Pins |
|-------------|---|---------------|--------------------------------------|
| 6396B | Extruded heat sink with large radial fins and straight pins | 25.40 (1.000) | 2.89 (0.114) |
| 6396B-P2 | With solderable shoulder pins | 25.40 (1.000) | 3.10 (0.122) |
| 6398B | Extruded heat sink with large radial fins and straight pins | 38.10 (1.500) | 2.89 (0.114) |
| 6398B-P2 | With solderable shoulder pins | 38.10 (1.500) | 3.10 (0.122) |
| 6399B | Extruded heat sink with large radial fins and straight pins | 50.80 (2.000) | 2.89 (0.114) |
| 6399B-P2 | With solderable shoulder pins | 50.80 (2.000) | 3.10 (0.122) |
| 6400B | Extruded heat sink with large radial fins and straight pins | 63.50 (2.500) | 2.89 (0.114) |
| 6400B-P2 | With solderable shoulder pins | 63.50 (2.500) | 3.10 (0.122) |

Material: Aluminum
Finish: Black Anodize



Convezione naturale

$$\theta = \frac{\Delta T}{q} = \frac{70}{12} = 5.8^{\circ}C / W$$

Convezione forzata

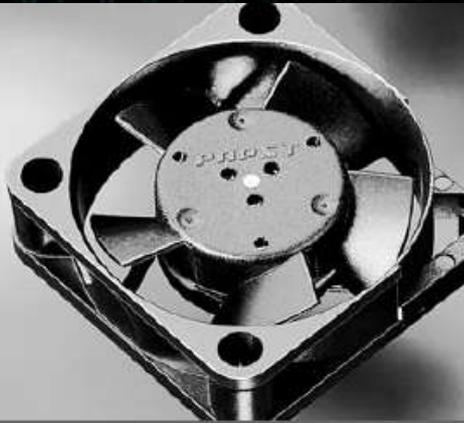
$$\theta = 3.5^{\circ}C / W$$

Air Velocity ≥ 200 LFM

Ventilatore

Air Velocity ≥ 200 FPM

Linear Feet Minute



- DC micro-fans with electronically commutated external rotor motor. Fully integrated commutation electronics.
- With electronic protection against reverse polarity. The fan only operates when the polarity is correct. Impedance-protected against blocking and overloading.
- Fan of fibreglass reinforced plastic. PBT housing, PA impeller.
- Air exhaust over struts. Rotational direction CCW looking at rotor.
- Electrical connection via 2 leads AWG 28. Stripped and tinned ends.
- Mass 5 g.

Series 250

25 x 25 x 8 mm

| Air flow | | Nominal Voltage | | Noise | Synec-Sleeve Bearings | Ball Bearings | Power Input | Nominal Speed | Temperature Range | Service Life Lin | | Curve | Type | Specials |
|-------------------|-----|-----------------|-----------|-------|-----------------------|---------------|-------------|---------------|-------------------|------------------|---------|-------|-------|----------|
| m ³ /h | CFM | V DC | V DC | | | | | | | dB(A) | bels | | | |
| 3.2 | 1.9 | 5 | 4.5...5.5 | 15 | <3 | □ | 0.4 | 9000 | -10...+70 | 40 000* | 12 000* | 1 | 255 N | 58 |
| 5.0 | 2.9 | 5 | 4.5...5.5 | 28 | 4.4 | □ | 0.6 | 12000 | -10...+55 | 35 000* | 10 000* | 2 | 255 H | 58 |
| 3.2 | 1.9 | 12 | 10...14 | 15 | <3 | □ | 0.5 | 9000 | -10...+70 | 40 000* | 12 000* | 1 | 252 N | 58 |

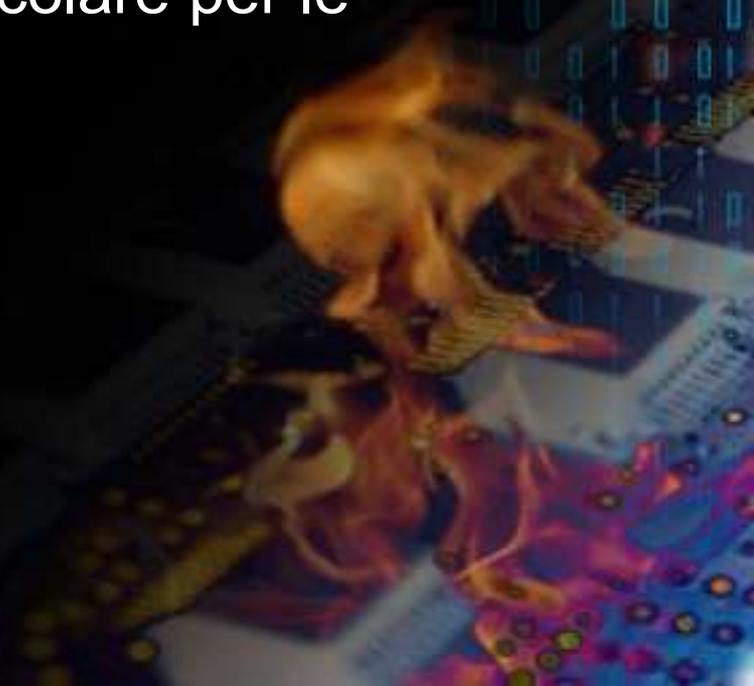
*preliminary data

$$Velocity (LFM) = \frac{FlowRate (CFM)}{Area (ft^2)} = \frac{1.9}{0.0067} = 283 LFM$$

Flotherm

Software che analizza il flusso e calore trasferito attraverso la tecnica CFD (Computational Fluid Dynamics).

Software progettato per l'analisi della trasmissione del calore all'interno di sistemi, in particolare per le apparecchiature elettroniche .



Richiami di teoria

CFD: simulazione numerica del flusso di fluido, trasferimento di calore e il relativo processo di radiazione svolgendo una serie di accoppiate equazioni parziali differenziali non lineari del secondo ordine.



Equazioni di bilancio della massa, della quantità di moto e dell'energia
(Equazioni Navier-Stokes)

Conservazione della massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{V}}) = 0$$

Conservazione della quantità di moto (\mathbf{V} è il vettore velocità):

$$\rho \frac{D\bar{\mathbf{V}}}{D\tau} = -\nabla P + \bar{\mathbf{F}} + \mu \nabla^2 \bar{\mathbf{V}}$$

Conservazione dell'energia:

$$\rho c_p \frac{DT}{D\tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla \cdot \mathbf{T}) + \mu \Phi + q'''$$

Tali equazioni sono valide per l'analisi termica sia in regime stazionario che dinamico fornendo quindi la possibilità dello studio al transitorio

Progetto termico con Flotherm

- Recupero delle informazioni sul progetto
- Creazione di un modello fisico
- Impostazione dei parametri per una più facile
- Convergenza delle soluzioni
- Risoluzione con integrazione numerica
- Visualizzazione e confronto di risultati



Recupero delle informazioni sul progetto

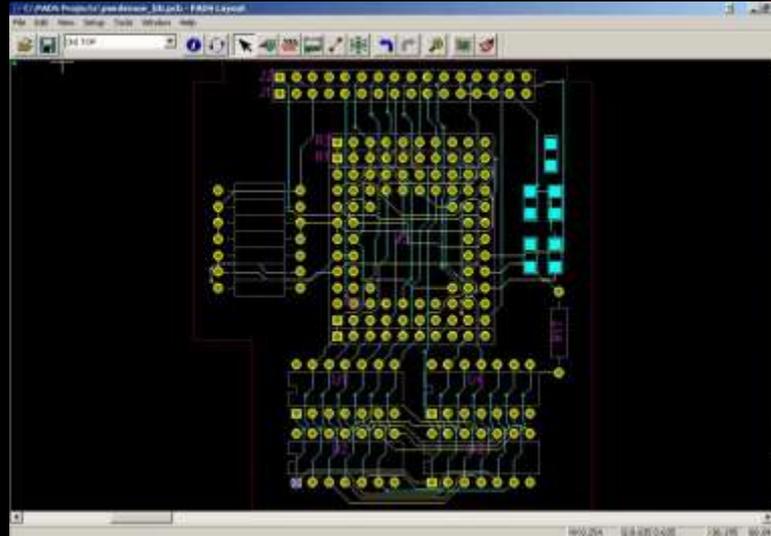
- Parte più difficile dello studio
- Dati fondamentali per una corretta simulazione
- Necessita una accurata conoscenza del progetto e quindi dei componenti che lo compongono



Creazione di un modello fisico

Esistono tre tecniche per la costruzione del modello fisico del progetto da simulare

1. Costruzione schematizzata diretta
2. Costruzione modello MCAD con l'ausilio di un software di CAD 3D
3. Importazione della board direttamente da un modello ECAD



Risoluzione

Il calcolo integrale fornisce una risposta matematica al problema

Il risultato è quindi un'approssimazione numerica del calcolo integrale

Richiede un'interpretazione della soluzione



Visualizzazione e confronto

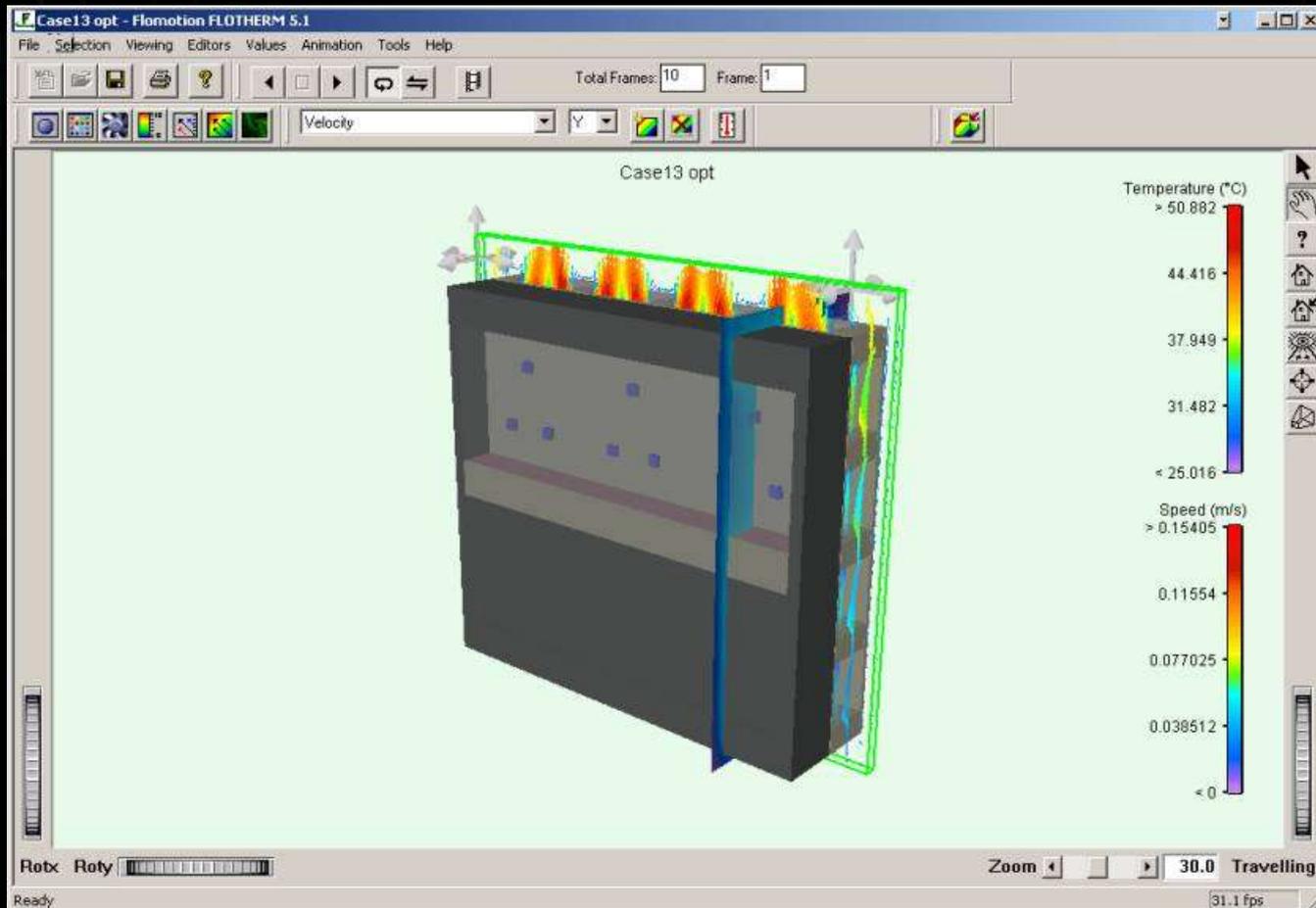
Il software prevede quattro metodi di visualizzazione dei risultati:

- Monitor point
- Tables
- Flomotion
- Command Center

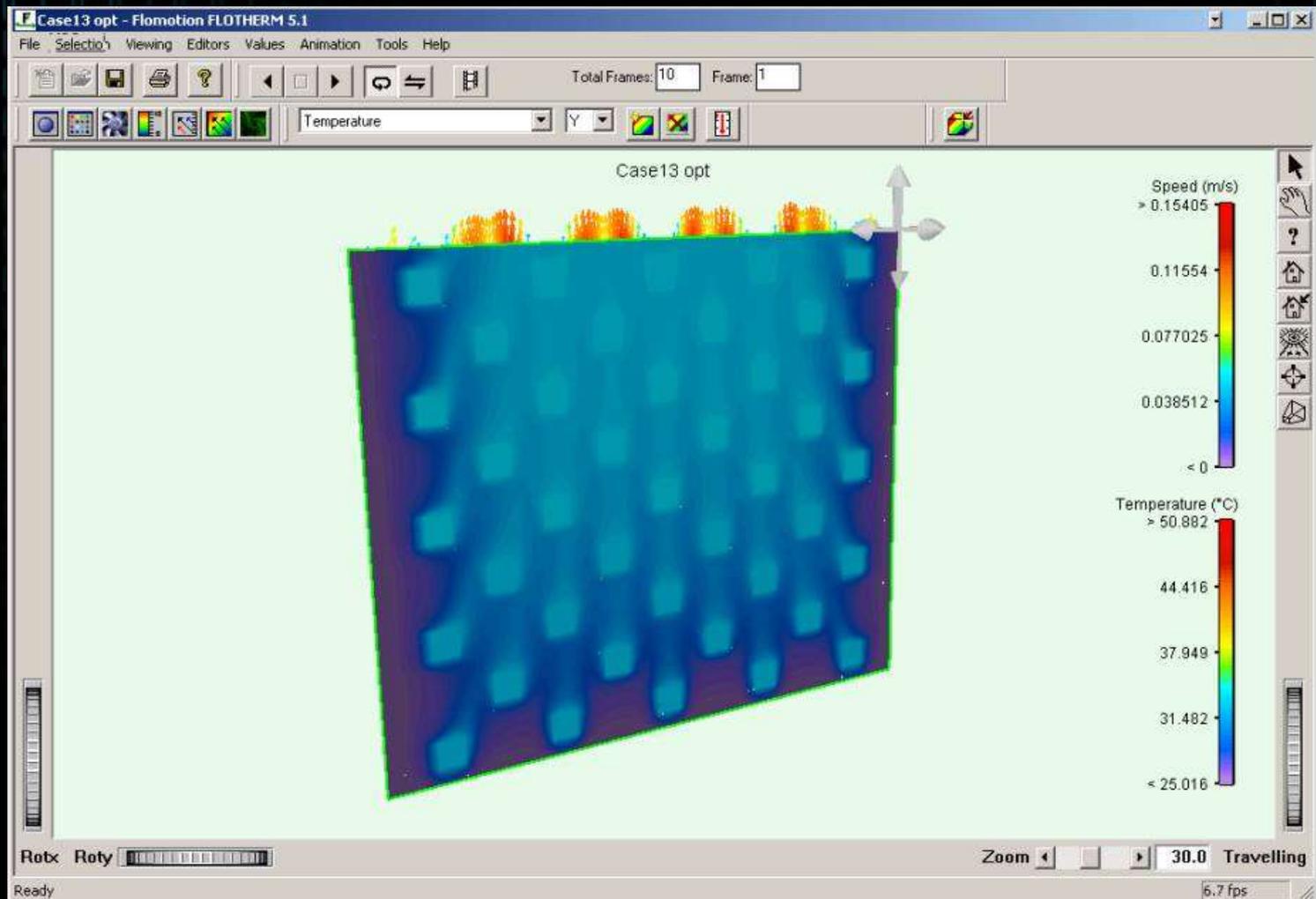


Flomotion

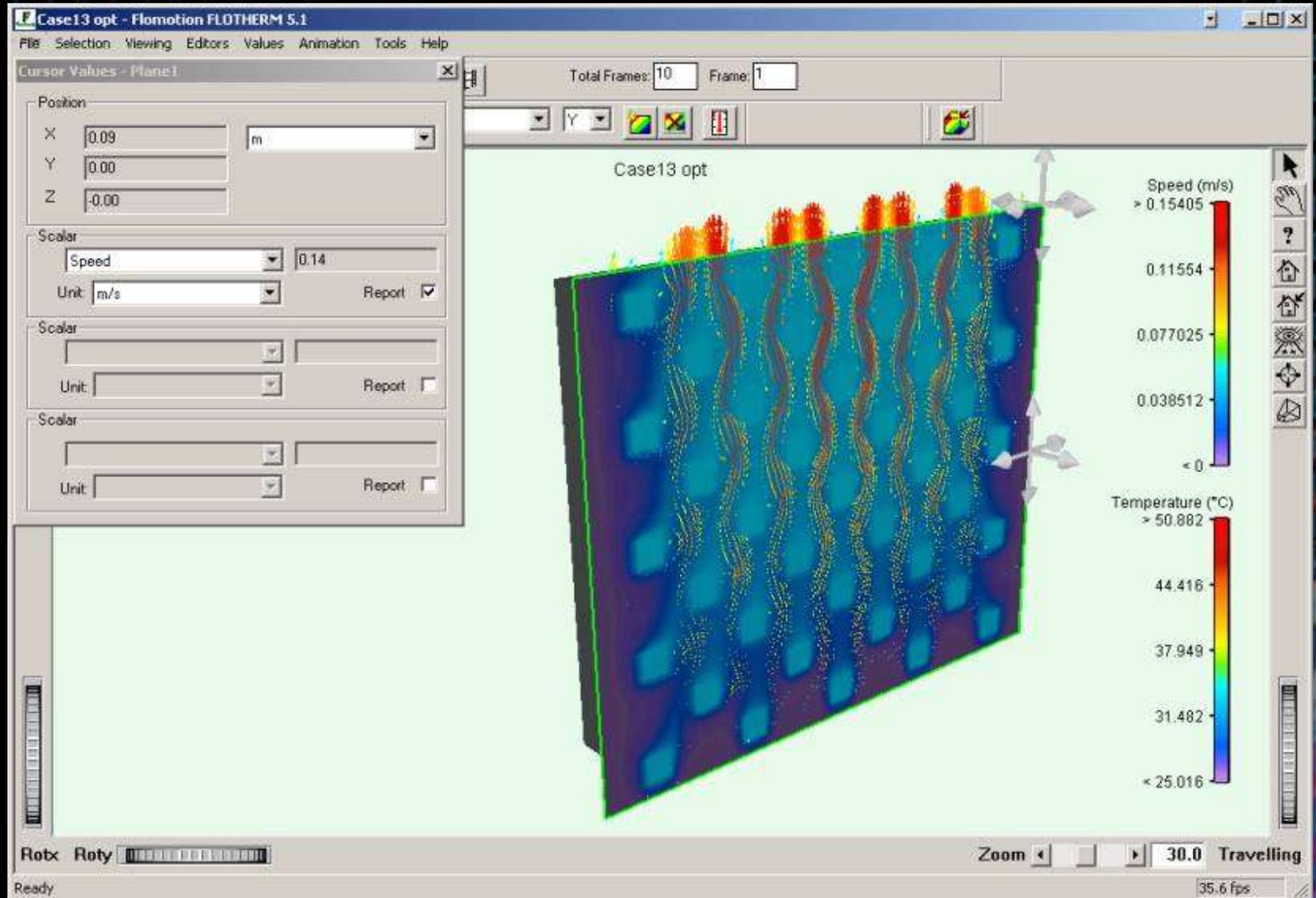
Metodo visuale per la presentazione dei risultati



- Visualizzazione dei dati in forma grafica

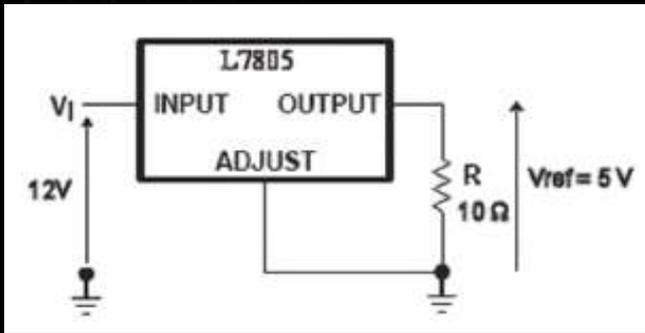


- Possibilità di monitor point diretto

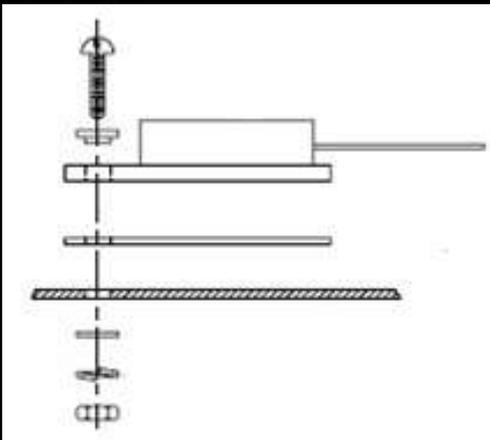


Esempio pratico di progettazione termica

Alimentatore stabilizzato integrato

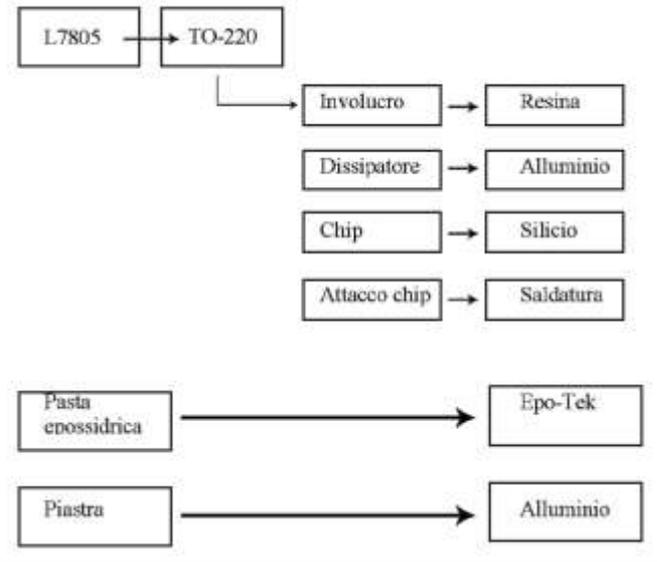


Schema elettrico

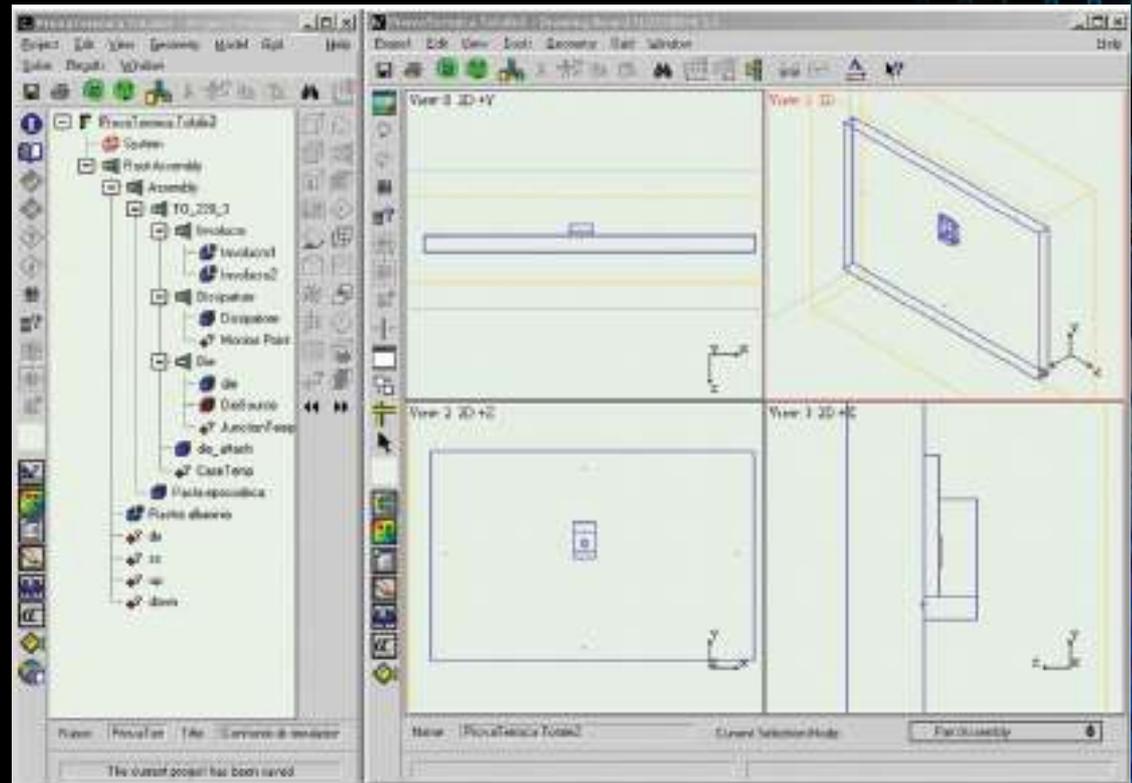


Schema montaggio

Componenti del sistema



Piastra alluminio
13.7x9x0.68 cm



Risultati simulazione

ProvaTermica Totale2 - Command Center FLOTHERM 5.1

Scenario Project Edit Chart Window Help

| | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| Gravity Direction | Negative Y | Positive Z | Negative Y | Positive Z |
| Aluminum Surface B082 : Emissivity (Dimensionless) | 0.92 | 0.92 | 0.18 | 0.18 |
| DieHeat : Temperature Source Total Power (W) | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Solution Status | Interrupted | Stale Results | Stale Results | Stale Results |
| Store Results? | Full | History Only | History Only | History Only |
| Initialize From | -1 | 0 | 0 | 0 |
| Priority | 0 | 5 | 5 | 5 |
| CaseTemp : Temperature (degC) | 43.24 | 46.7 | 52.2 | 61.27 |
| JunctionTemp : Temperature (degC) | 51.25 | 54.28 | 61.19 | 69.92 |
| die : Mean Solid Temperature (degC) | 50.75 | 53.78 | 60.69 | 69.41 |
| Involucro2 : Z Low Max S-F Surface Temperature (degC) | 43.2 | 46.73 | 52.13 | 61.24 |

Input Variables Graphical Input Output Variables Scenario Table Solution Monitoring

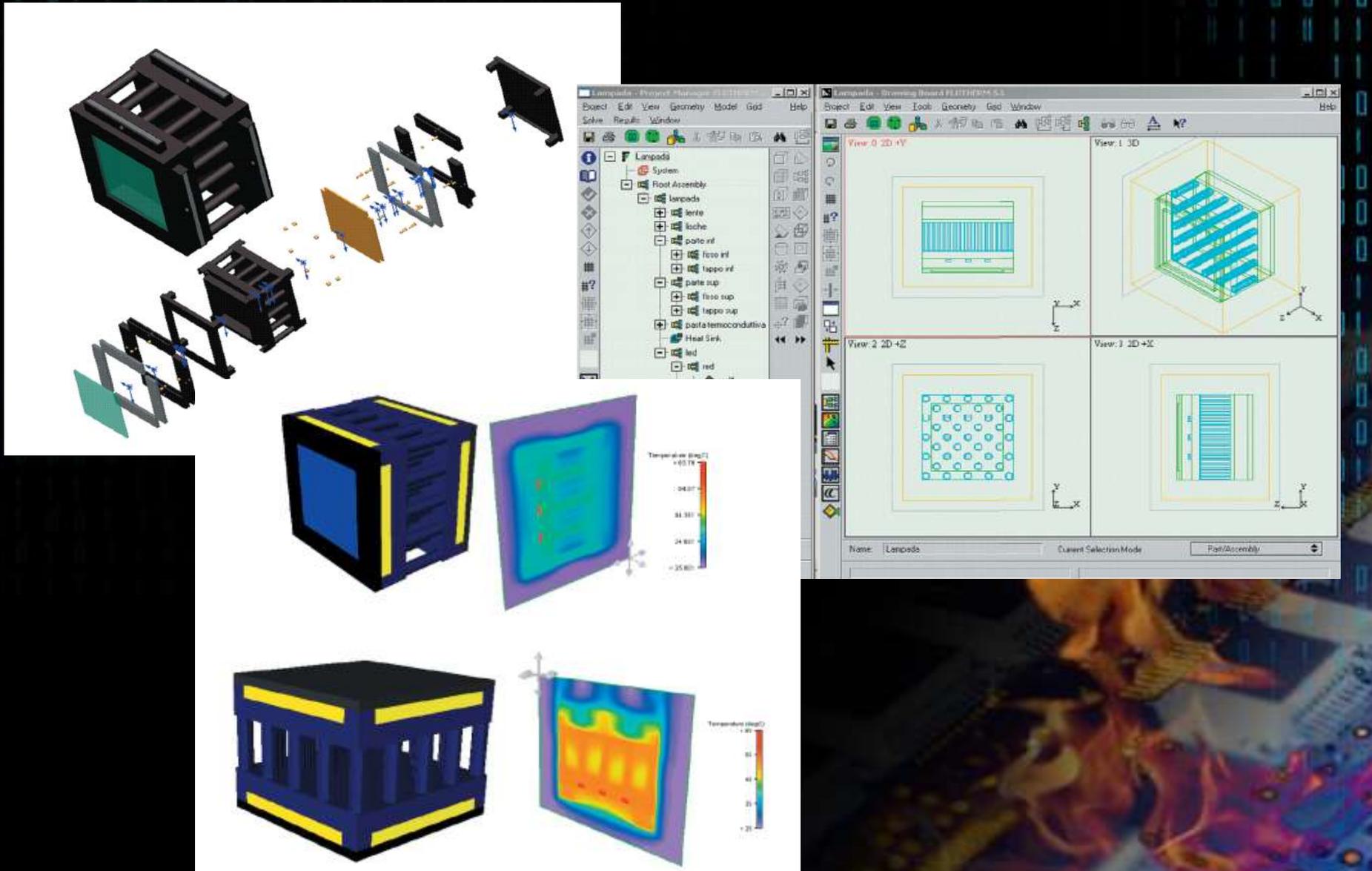
Confronto dati simulazione e dati sperimentali

| | |
|--------------------|---------------------------|
| Emissività: 0.92 | Orientamento: verticale |
| Dati ricavati | |
| Valore riscontrato | 43.6 °C |
| Valore simulato | 43.2 °C |
| | |
| Emissività: 0.92 | Orientamento: orizzontale |
| Dati ricavati | |
| Valore riscontrato | 45.1 °C |
| Valore simulato | 46.73 °C |
| | |
| Emissività: 0.18 | Orientamento: verticale |
| Dati ricavati | |
| Valore riscontrato | 53.3 °C |
| Valore simulato | 52.13 °C |
| | |
| Emissività: 0.18 | Orientamento: orizzontale |
| Dati ricavati | |
| Valore riscontrato | 60.4 °C |
| Valore simulato | 61.24 °C |

Osservazioni conclusive

- Interfaccia utente semplice
- Velocità di elaborazione elevata, con la possibilità di creare una rete di PC per calcolo distribuito
- Possibilità di definire regioni con maggiori o minori risoluzione
- Disponibilità di modelli forniti dalle principali aziende che si occupano di termodinamica tecnica
- Possibilità di importazione diretta di modelli fisici tramite disegni MCAD e ECAD
- Diverse forme di visualizzazione dei risultati
- Confronto tra prototipi differenti
- Ottimizzazione automatica del progetto

Struttura modulare a LED a controllo di colore



Testi di riferimento

- *Principles of Power Electronics*, apr 1991, John G. Kassakian, Marting F. Schlecht, George C. Verghese
- *Elettronica di Milmann*, 1 june 2008, Jacob Milmann, Arvin Gabel, Pierangelo Terreni

Approfondimento

- *“Principles of heat transfer”* Frank Kreith, Mark S. Bohn Pacific Grove (CA) etc., Brookscole, Thomson Learning, 2001
- *“Thermal Design of Electronic Equipment”*, Hibbeler R. C.
- *“The CRC Handbook of Thermal Engineering”*, Moran, M. J., Tsatsaronis, G.
- *Manuale Flotherm 5*
- *Thermal design methodology for electronic systems*, Angie Minichiello, Christian Belady