

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA  
SEDE DI CESENA  
SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA CON SEDE A CESENA  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA  
ELETTRONICA E TELECOMUNICAZIONE PER LO SVILUPPO  
SOSTENIBILE

TITOLO DELLA TESI

COLLAUDO E ANALISI  
TERMOGRAFICA DI CENTRALINE  
ELETTRONICHE PER SISTEMI  
AUTOMOTIVE

Tesi in

Elettronica dei sistemi digitali

Relatore

Prof. Romani Aldo

Correlatore

Prof. Bevilacqua Alessandro

Presentata da

Moretti Nicolas

Sessione II

Anno accademico 2011/2012



## Sommario

Introduzione .....	5
Termografia.....	6
Spettro elettromagnetico.....	6
La radiazione termica .....	6
Corpo nero .....	7
La legge di Wien .....	9
Legge di Stefan Boltzmann .....	10
Emettitori diversi dai corpi neri.....	10
Emissività .....	11
Conduzione del calore.....	12
Rete termica dei componenti e legge di Ohm termica .....	13
Cenni di image processing .....	15
Istogramma dei livelli.....	15
Segmentazione.....	16
Guasti nei componenti elettronici .....	17
Packaging .....	17
Saldature .....	18
PCB.....	19
Relay.....	19
Semiconduttori .....	19
Resistori.....	19
Condensatori.....	20
Metodi di rilevamento guasti tramite termografia.....	20
Rete equivalente termica di un componente .....	23
Interpretazione del modello.....	23
Resistenza termica Giunzione-Package.....	25
Resistenza termica Package-Ambiente.....	26

Resistenza termica tra pixel .....	26
Simulazione di diminuzione di potenza dissipata.....	27
Potenza nulla nel pixel centrale .....	27
Diminuzione della potenza nel pixel centrale .....	28
Aumento dell'area di simulazione con potenza nulla al centro .....	30
Simulazione di incrementi di potenza dissipata .....	32
Conclusioni simulazione.....	32
Sviluppo di un banco di prova automatico per il test della centralina di riferimento .....	34
Centralina elettronica di riferimento.....	34
Funzionamento.....	35
Descrizione generale del banco .....	37
Macchina a stati che gestisce la simulazione automatica .....	39
Blocco che calcola i segnali di giri .....	41
Blocchi che generano i segnali di interfacciamento .....	42
Rilevazioni termografiche sulla centralina.....	44
Scopo .....	44
Misure termografiche .....	45
Variazione degli ingressi in centralina: .....	45
Ingresso in centralina SNE.....	46
Ingresso in centralina SGF.....	49
Ingresso in centralina SKD .....	51
Ingresso in centralina SRT .....	52
Ingresso in centralina acceleratore.....	54
Uscite della centralina .....	59
Conclusioni studio termografico centralina:.....	62
Conclusioni.....	64
Bibliografia.....	66

# Introduzione

L'impatto ambientale di prodotti elettronici è un problema attuale. Nella maggior parte dei settori, dove gli elevati numeri di vendita rendono il costo di produzione del prodotto irrisorio all'azienda è prassi comune nel caso di guasti o malfunzionamenti nei prodotti sostituire il prodotto difettoso con uno nuovo, senza perder tempo e denaro a cercare di ripararlo.

In settori molto concorrenziali questa soluzione sta prendendo sempre più piede anche tra i consumatori, nel momento in cui un determinato prodotto elettronico si guasta, e il prezzo che viene chiesto loro per la riparazione è vicino o supera il prezzo di acquisto del prodotto stesso.

Tuttavia in settori come quello automotive, in cui una centralina elettronica nella fattispecie può venire a costare diverse migliaia di euro può convenire economicamente cercare di intervenire riparando la centralina guasta.

In questo modo c'è un doppio vantaggio, il primo per l'azienda che ripara la centralina, in termini economici, il secondo per l'ambiente, poiché se non riparata la centralina rimandata alla casa madre diventerebbe un rifiuto.

L'obiettivo di questa tesi è analizzare il comportamento termico di una centralina elettronica di controllo di un cambio automatico, finalizzando lo studio ad un ipotetico sviluppo futuro di ricerca dei componenti elettronici guasti in centraline mal funzionanti. Per far ciò, occorrerà sviluppare un simulatore che permetta in primo luogo di comandare la centralina per osservarne il diverso comportamento termico a seconda della configurazione in ingresso, e in secondo luogo che permetta di effettuare il test funzionale della stessa allo scopo di individuarne i malfunzionamenti. Successivamente verranno sviluppate alcune analisi legate alla possibilità di utilizzare indagini termografiche a questo scopo, valutandone la fattibilità e il grado di accuratezza.

# Termografia

## Spettro elettromagnetico

Lo spettro elettromagnetico è la classificazione della radiazione elettromagnetica in base alla lunghezza d'onda. Sebbene non ci sia differenza tra il comportamento fisico delle varie regioni esse sono state divise in porzioni chiamate bande, le quali differiscono per il metodo con cui vengono rilevate e ovviamente, differiscono per la lunghezza d'onda.

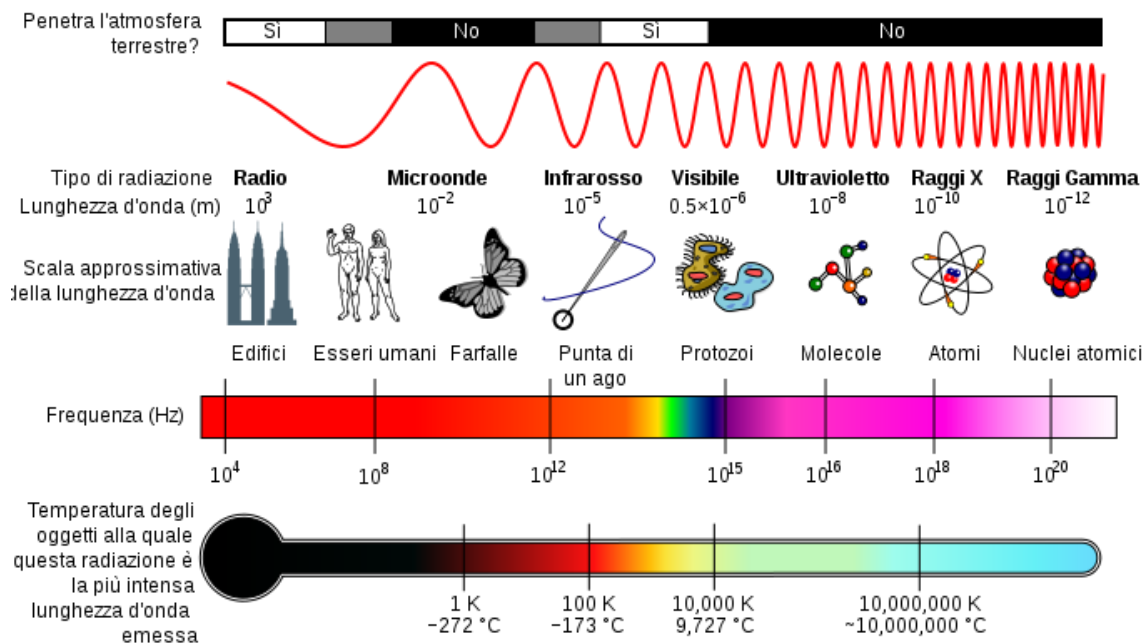


Figura 1: Spettro elettromagnetico [1].

In particolare,  $\lambda$  (lunghezza d'onda) dell'infrarosso è compresa tra  $2\mu\text{m}$ , ai confini con la regione del visibile, e  $13\mu\text{m}$ , ai confini con la regione delle micro onde. In realtà la regione dell'infrarosso è suddivisa ulteriormente in quattro regioni, infrarosso vicino  $0.75 - 3 \mu\text{m}$ , infrarosso medio  $3 - 6 \mu\text{m}$ , infrarosso lontano  $6 - 15 \mu\text{m}$ , ed infrarosso estremo  $15 - 100 \mu\text{m}$

## La radiazione termica

La radiazione termica è una radiazione elettromagnetica generata dall'agitazione termica delle particelle cariche all'interno della materia. Qualsiasi materiale con una temperatura maggiore dello zero assoluto emette radiazione termica. Un corpo con una temperatura superiore allo zero assoluto è composto da atomi e molecole che interagiscono tra di loro e che possiedono una certa energia cinetica. Questi atomi e

molecole sono composti da particelle cariche, come elettroni e protoni, e, a causa dell'interazione cinetica, si creano accelerazioni di cariche ed oscillazioni, questo crea la radiazione termica.

Le caratteristiche della radiazione generata dipendono dalla superficie che le ha emesse, in particolare dipendono dalla temperatura della superficie, dall'assorbimento spettrale e dall'emissività della superficie.

La radiazione emessa non è monocromatica, ovvero non ha una singola componente frequenziale, ma è caratterizzata da un suo spettro, caratteristico del corpo preso in considerazione (detto anche radiatore).

Esempi di radiazione termica sono: la luce visibile e la luce infrarossa emessa da una lampadina ad incandescenza, l'emissione infrarossa degli animali, rilevabile tramite una termocamera e la stessa luce solare. La radiazione termica è una trasmissione di calore con caratteristiche molto differenti dalla conduzione e dalla convezione, si pensi ad esempio ad una persona vicino ad un falò, essa percepirà una sensazione di calore anche se l'aria circostante è ad una temperatura molto bassa.

Un corpo che è in equilibrio termodinamico con l'ambiente circostante, e che presenti una superficie che ha un coefficiente di assorbimento unitario (perfetto assorbimento) a tutte le lunghezze d'onda è detto corpo nero.

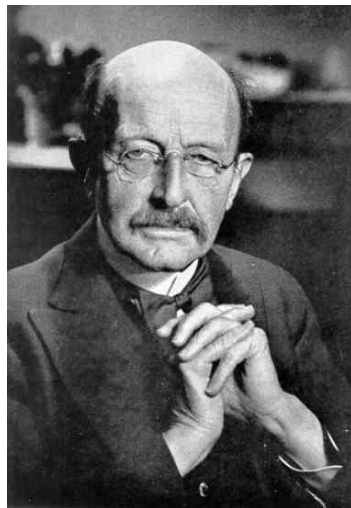
## Corpo nero

Un corpo nero è un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica che lo colpisce, senza riflettere né trasmettere niente, per questo motivo è detto nero. Il concetto di corpo nero venne introdotto per la prima volta nel 1862 da Gustav Kirchhoff. La legge di Kirchhoff stabilisce che se un corpo all'equilibrio termodinamico con l'ambiente circostante è in grado di assorbire tutta la radiazione incidente a qualsiasi lunghezza d'onda, è anche in grado di emettere radiazioni, in altre parole, siccome assorbe tutta l'energia che lo colpisce, per la conservazione dell'energia dovrà reirradiare tutta l'energia assorbita, quindi il termine nero si riferisce solamente al fatto che non riflette. Per un oggetto con queste proprietà fisiche il coefficiente di emissività è uguale a quello di assorbimento ed è pari ad uno.



*Figura 2: Gustav Robert Kirchoff ( 1824 - 1887)*

Lo spettro di emissione di un corpo nero, che rappresenta l'intensità della radiazione emessa in funzione della temperatura, è a forma di 'campana' più o meno accentuata a seconda della temperatura del corpo nero appunto, tale spettro venne correttamente interpretato da Max Planck il quale assunse che l'energia venisse scambiata non con continuità ma a pacchetti, a quanti di energia di valore  $hf$  (dove  $h$  è la costante di Planck ed  $f$  la frequenza della radiazione elettromagnetica).



*Figura 3: Max Planck, 1858 1947.*

La distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo nero venne espressa secondo la seguente formula

$$W_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} * 10^{-6} \left[ W/m^2 \mu m \right]$$



dove  $W_\lambda$  è l'emittanza energetica spettrale del corpo nero;

$c = 3 \cdot 10^8$  [m/s] è la velocità della luce;

$h = 6.6 \cdot 10^{-34}$  [J·s] è la costante di Planck;

$\lambda$  in  $\mu\text{m}$  è la lunghezza d'onda;

T è la temperatura in Kelvin;

Se si grafica la formula di Planck per ogni temperatura si trova una caratteristica come quella della Figura 4, partendo da  $\lambda=0$  l'intensità raggiunge il massimo velocemente, con una certa  $\lambda_{max}$ , per poi decrescere più lentamente. All'aumentare della temperatura aumenta l'intensità della radiazione, e diminuisce la lunghezza d'onda a cui si ha il massimo.

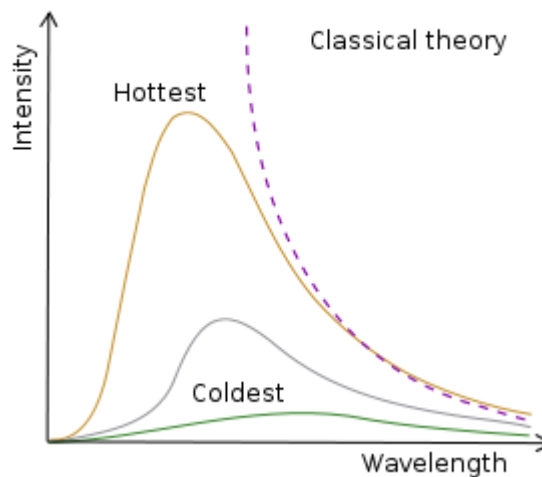


Figura 4: Spettro di emissione di un corpo nero[2]

## La legge di Wien

La legge di Wien (vedi (1)) o dello spostamento si ottiene derivando la formula di Planck rispetto a  $\lambda$ ; lo scopo è quello di ottenere lo spostamento di  $\lambda_{max}$  a seconda della temperatura.

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} [\mu\text{m}] \quad (1)$$

Questa formula conferma quella che è un'esperienza comune nel vedere oggetti che si riscaldano che cambiano colore, passando dal rosso al giallo man mano che aumenta la temperatura, causando una diminuzione di  $\lambda_{max}$ . Il sole, che ha una temperatura

(superficiale) di circa 6000 °K ha il picco di emissione alla lunghezza d'onda di 0.5 μm nel centro dello spettro visibile.

## Legge di Stefan Boltzmann

La legge di Stefan Boltzmann riguarda l'intensità della radiazione emessa da un corpo nero, e per trovarla occorre integrare su  $\lambda$  la formula di Planck.

$$W = \sigma T^4 [W/m^2]$$

$$\text{Dove } \sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60h^3 c^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{J}{m^2 K^4 s} \right], \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} [Js];$$

In pratica essa rappresenta l'area sotto alla curva di Planck.

La legge di Stefan Boltzmann ci indica che la totalità dell'energia sviluppata dal corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della temperatura. Si dimostra che l'area compresa sotto la curva di Planck tra 0 e  $\lambda_{max}$  rappresenta il 25 % del totale dell'energia irradiata dal corpo nero.



Figura 5: Josef Stefan (1835 - 1893) Ludwig Boltzmann (1844-1906)

## Emettitori diversi dai corpi neri

Abbiamo finora analizzato il comportamento dei corpi neri, caratterizzati da un assorbimento totale alla radiazione che li colpisce e di conseguenza una trasmittanza (o coefficiente di trasmissione) ed una riflettanza (o coefficiente di riflessione) nulla. Per quanto riguarda i corpi reali, essi possono non avere un comportamento di questo tipo, soprattutto se si osserva il comportamento al variare della lunghezza d'onda.

Quindi in un oggetto reale dobbiamo tenere conto dei fattori che caratterizzano la sua interazione con la radiazione incidente:  $\alpha$  che è la frazione di energia assorbita,  $\rho$  che è la frazione di energia riflessa, e  $\tau$  che è la frazione dell'energia trasmessa.

Ognuno di questi fattori dipende dalla lunghezza d'onda, per questo è opportuno inserire il pedice  $\lambda$ , caratterizzando così i tre parametri per una certa lunghezza d'onda.

- Coefficiente di assorbimento spettrale  $\alpha_\lambda =$  rapporto tra flusso energetico assorbito dall'oggetto e flusso totale incidente.
- Coefficiente di riflessione spettrale  $\rho_\lambda =$  rapporto tra flusso energetico riflesso dall'oggetto e flusso totale incidente.
- Coefficiente di riflessione spettrale  $\tau_\lambda =$  rapporto tra flusso energetico trasmesso dall'oggetto e flusso totale incidente.

La somma dei tre fattori, per ogni lunghezza d'onda è pari ad uno:  $\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$ .

Nel caso di materiali opachi  $\tau_\lambda = 0$  quindi  $\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$ .

## Emissività

L'emissività  $\mathcal{E}$  è un fattore chiave per descrivere il comportamento di un corpo, essa rappresenta il rapporto tra flusso energetico spettrale emesso da un oggetto e quello emesso da un corpo nero alla stessa temperatura e lunghezza d'onda.

$$\mathcal{E}_\lambda = \frac{W_{\lambda o}}{W_{\lambda b}}$$

A seconda del valore dell'emissività spettrale, si distingue il tipo di sorgente:

- Corpo nero se  $\mathcal{E}_\lambda = \mathcal{E} = 1$
- Corpo grigio se  $\mathcal{E}_\lambda = \mathcal{E}$  costante inferiore a 1
- Radiatore selettivo se  $\mathcal{E}_\lambda$  non è costante al variare di  $\lambda$

Grazie alla legge di Kirchhoff possiamo affermare che l'emissività e l'assorbimento per ogni lunghezza d'onda sono uguali.

$$\mathcal{E}_\lambda = \alpha_\lambda$$

Per un materiale molto lucido  $\mathcal{E}_\lambda$  tende a zero quindi si avrà che  $\rho_\lambda = 1$ ;

Nel caso in cui un oggetto sia un corpo grigio, l'intensità della radiazione emessa si calcola correggendo la formula di Stefan Boltzmann moltiplicandola per l'emissività del corpo.

$$W = \mathcal{E}\sigma T^4 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

## Conduzione del calore

I meccanismi base che caratterizzano lo scambio di calore sono tre, conduzione, convezione, irraggiamento. La conduzione è il meccanismo che caratterizza lo scambio di calore all'interno di un corpo, il trasferimento di calore è proporzionale alla differenza di temperatura:

$$Q = KA \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad [W]$$

Dove  $K$  è la conducibilità termica che dipende dal materiale considerato mentre  $L$  è la lunghezza del materiale attraverso il quale avviene lo scambio di calore.

La convezione caratterizza lo scambio di calore tra un corpo solido e l'ambiente circostante, veicolata dal fluido nel quale il solido è immerso.

$$Q = hA(T_c - T_f) \quad [W]$$

Dove  $h$  è il coefficiente di convezione termico [ $W/(^{\circ}C \cdot m^2)$ ],  $A$  è l'area della superficie del corpo,  $T_c$  è la temperatura del corpo e  $T_f$  la temperatura del fluido. Valori tipici di  $h$  per l'aria in caso di convezione naturale sono:  $10 \div 100$  [ $W/(^{\circ}C \cdot m^2)$ ].

La convezione richiede che il fluido sia in movimento per questo è fondamentale la gravità nel caso di convezione naturale, in questo caso le particelle del fluido a contatto con il corpo aumentano di temperatura, quindi diminuisce la loro densità e si spostano verso l'alto, lasciando il posto a particelle più fredde, e così via.

L'irraggiamento, come visto in precedenza, è una trasmissione di calore che è indipendente dal fluido in cui è immerso un corpo, infatti, trattandosi di onde elettromagnetiche, la propagazione avviene specialmente nel vuoto. La quantità di calore irraggiata dipende dalla quarta potenza della temperatura, come enunciato dalla legge di Stefan Boltzmann, alla quale però deve essere aggiunto il coefficiente di emissività  $\epsilon$ . Per le temperature in gioco nell'ambito di centraline elettroniche, le quali difficilmente superano i  $100^{\circ}C$ , la quantità di calore irradiata è trascurabile rispetto alla componente di convezione e conduzione.

## Rete termica dei componenti e legge di Ohm termica

Per i semiconduttori si può assumere che la dissipazione di calore dalla giunzione all'ambiente esterno avvenga in diverse fasi poiché sono coinvolti diversi materiali: giunzione (o comunque regione in cui viene prodotto il calore), contenitore, dissipatore (se il componente ne è fornito) e ambiente.

La dissipazione di calore avviene per lo più per conduzione dalla giunzione fino al dissipatore (o al contenitore nel caso in cui non vi sia il dissipatore), dopodiché, siccome il componente è fisicamente circondato da aria, si avrà dissipazione per convezione.

Lo scambio termico in qualsiasi dei tre modi esso avvenga, può essere descritto dalla cosiddetta legge di Ohm termica:

$$\Delta T = R_{th} P_d$$

Dove  $\Delta T$  [°C] è la differenza di temperatura  $R_{th}$  [°C/W] è detta resistenza termica mentre  $P_d$  [W] è la potenza trasmessa.

La resistenza termica rappresenta la differenza di temperatura in °C che corrisponde alla trasmissione di 1 W termico.

La resistenza termica è il rapporto tra differenza di temperatura ed il flusso di calore che provoca.

Nel caso di convezione e irraggiamento la resistenza termica non è lineare, dipende dalla temperatura, mentre nel caso di conduzione è circa lineare.

### Rete termica a regime

A regime  $P_d = P_a$

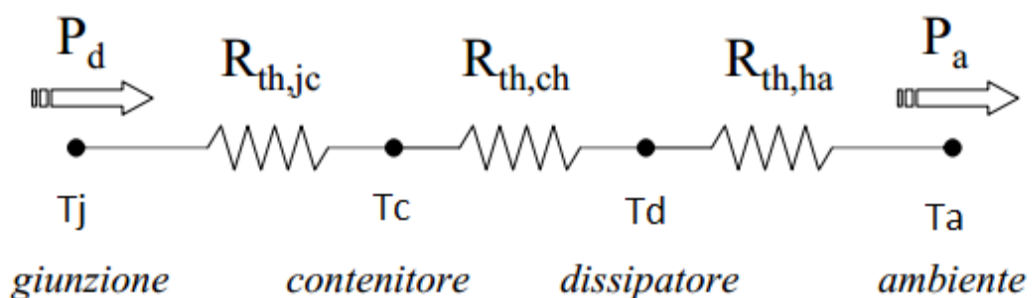


Figura 6: Rete termica equivalente di un circuito integrato a regime.

### Rete termica in transitorio

In fase di transitorio è necessario introdurre le capacità termiche delle varie parti che costituiscono il circuito termico, le quali fungono come un filtro passa basso per le brusche variazioni di potenza da dissipare  $P_d$ .

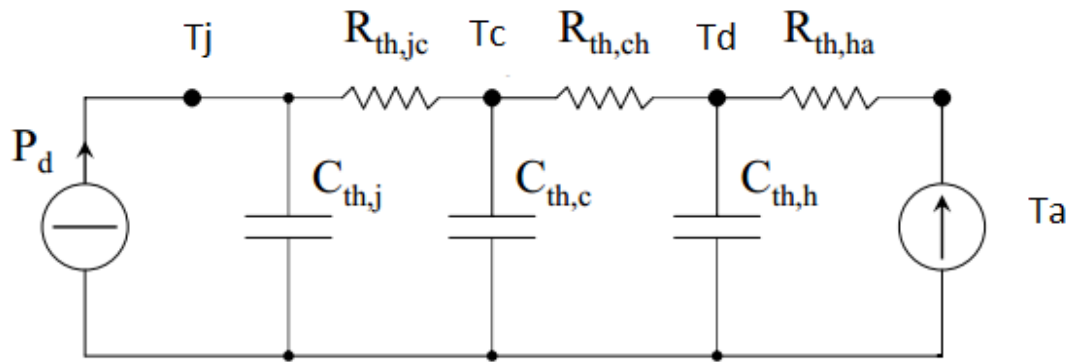


Figura 7: Rete termica equivalente di un circuito integrato in transitorio

## Cenni di image processing

Per valutare eventuali sviluppi futuri di questa tesi, può essere utile l'utilizzo dell'elaborazione dell'immagine da applicare ad immagini termiche di circuiti e schede elettronici da collaudare e provenienti da termocamere, per questo verrà introdotta un'analisi basata su image processing.

L'immagine processing è una particolare forma di elaborazione del segnale, applicata alle immagini. Un'immagine non è altro che un segnale analogico nello spazio, il quale viene campionato con una certa risoluzione e con un certo passo di campionamento spaziale.

In questo elaborato verranno effettuate delle semplici elaborazioni di base sulle immagini termiche ottenute da alcune schede elettroniche, in particolare ci focalizzeremo su differenze di immagini e segmentazione per rilevare aspetti significativi dal punto di vista del collaudo elettronico.

### Istogramma dei livelli

L'istogramma dei livelli nell'*image processing* è un elemento fondamentale, il quale fornisce informazioni generali su quella che è la distribuzione dei valori assunti dai vari pixel nell'immagine (ad esempio fornisce il numero di pixel per ogni livello di grigio nell'immagine).

Di seguito si riporta un esempio di istogramma di un'immagine termografica.

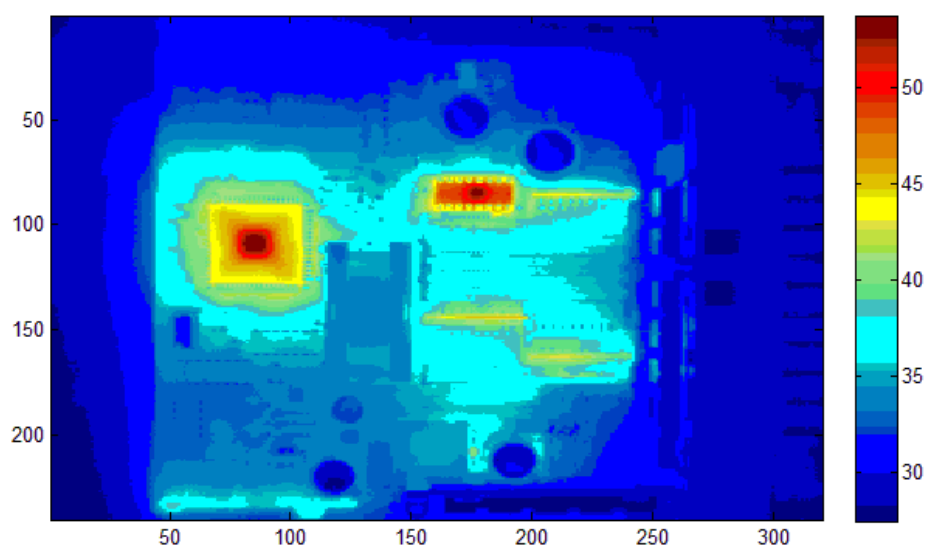


Figura 8: Termogramma di una centralina elettronica.

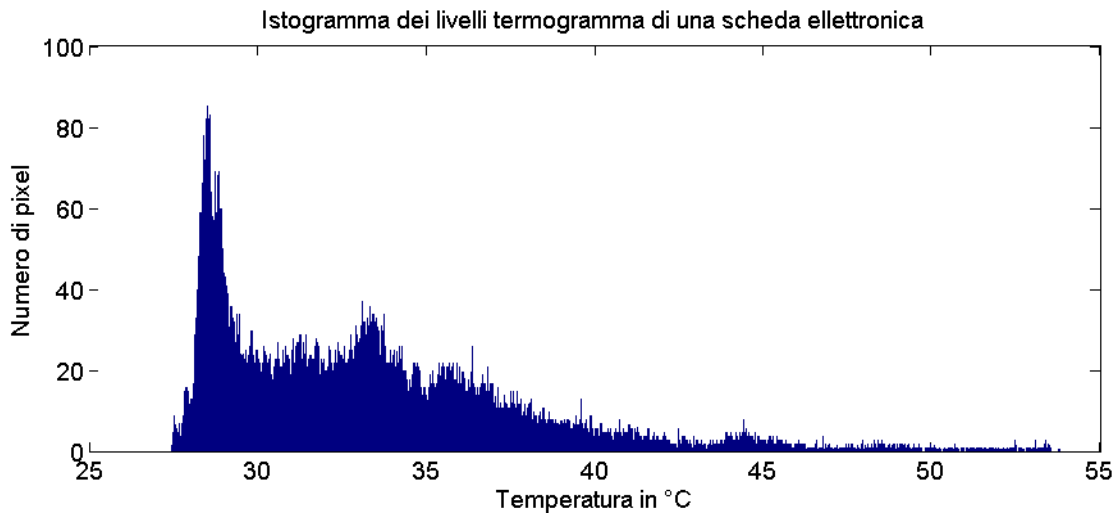


Figura 9: Istogramma dell'immagine in Figura 8.

## Segmentazione

La segmentazione è un'operazione che permette di separare un'immagine digitale in segmenti multipli, allo scopo di semplificare l'analisi della stessa, rendendola più semplice; essa può essere vista come un'operazione che raggruppa un insieme di pixel con le medesime caratteristiche. La segmentazione può anche essere utile nell'individuazione dei bordi di un oggetto contenuto in un'immagine.

Un metodo molto usato per la segmentazione di un'immagine è il "*thresholding*" (sogliatura) di un istogramma, il quale si basa su una determinata soglia per trasformare una determinata immagine in un'immagine binaria. La soglia può essere scelta in vari modi i quali caratterizzano questo metodo. Un metodo automatico per la scelta della soglia è il metodo di Otsu, il quale basa la scelta sulla forma dell'istogramma. In particolare esso assume che l'immagine contenga due classi di pixel calcolando la soglia in modo da separare al meglio le due classi, minimizzando la varianza intra classe, definita come la somma pesata delle varianze delle due classi separate.



## Guasti nei componenti elettronici

I componenti elettronici si possono danneggiare in vari modi, alcune tra le cause dominanti sono: il superamento di una determinata temperatura, corrente o tensione, o ancora, lo stress meccanico dovuto ad esempio alle vibrazioni oppure ad urti.

Il danno spesso avviene all'inizio oppure alla fine della vita del componente, in accordo con la curva *bathtub* (siccome ricorda la sezione trasversale di una vasca), la quale esprime la *failure rate* in funzione del tempo di utilizzo del componente (Figura 10).

La mortalità nella parte iniziale della curva è dovuta ad esempio a difetti di produzione, componenti deboli e saldature difettose, mentre la parte finale della curva è in genere dovuta ad invecchiamento.

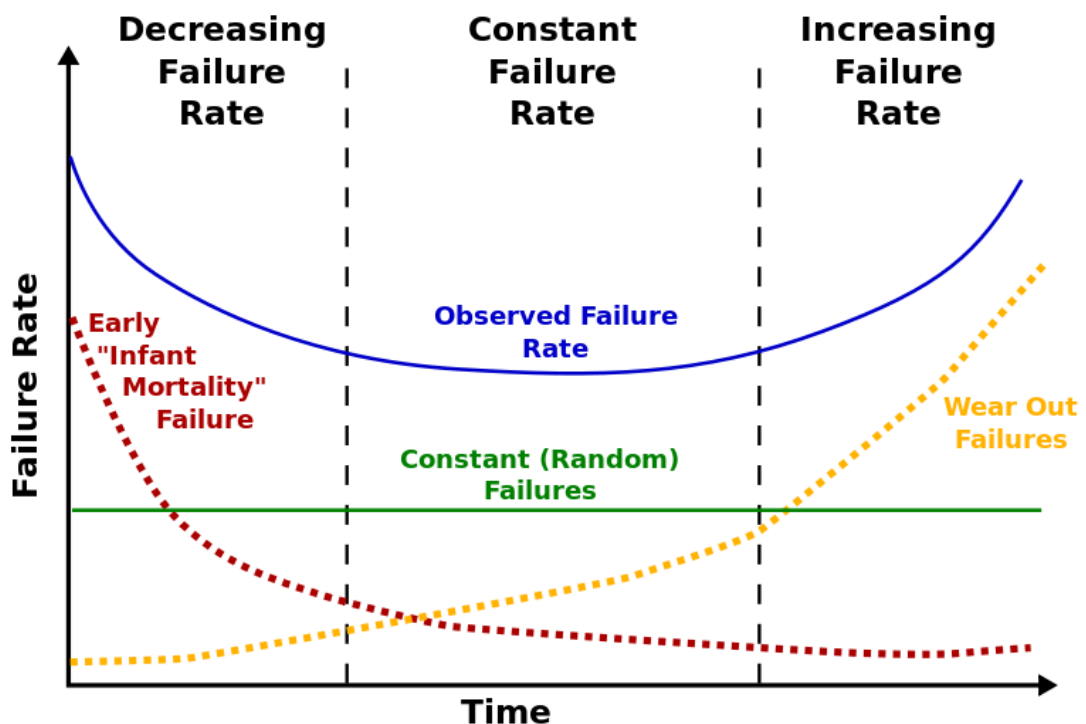


Figura 10: Bathtub curve. [3]

Di seguito vengono elencate alcune tra le principali cause di guasto nei componenti elettronici che vengono maggiormente utilizzati nelle schede elettroniche.

### Packaging

Il *packaging* dei componenti elettronici è l'interfaccia meccanica tra l'ambiente esterno e la parte elettronica, ed è una causa primaria di guasti. L'espansione termica del *packaging* ad esempio, causa stress meccanico nei materiali, soprattutto se i coefficienti

termici dei materiali sono diversi. L'umidità, o agenti chimici aggressivi possono ledere il *package* ed andare a rovinare le parti interne. Il superamento della temperatura massima consentita può portare ad uno stress eccessivo dei *bonding wire* e alla formazione di crepe nel *package* o nel DIE di silicio.

## Saldature

Le interconnessioni a livello di ICs (*integrated circuits*) possono essere influenzate dall'elettromigrazione, che ne riduce l'affidabilità. L'elettromigrazione è un fenomeno che causa asporto di materiale in conduttori attraversati da alta densità di corrente continua; essa è dovuta ai portatori di carica che asportano con il tempo gli atomi del metallo causando interruzioni. Un'altra causa di rottura delle saldature è la formazione di un fragile strato intermetallico. Molte rotture nelle saldature si manifestano solo ad alte temperature, per questo motivo esse sono difficili da individuare. La corrosione può causare la formazione di un ossido superficiale nei contatti, la conseguenza è un aumento di resistività indesiderato. Un fenomeno che può provocare corto circuiti è la formazione di "tin whiskers" (barba di stagno), ovvero la formazione di una sorta di filamento di stagno; questo fenomeno è mitigato in generale dall'aggiunta di piombo nello stagno.

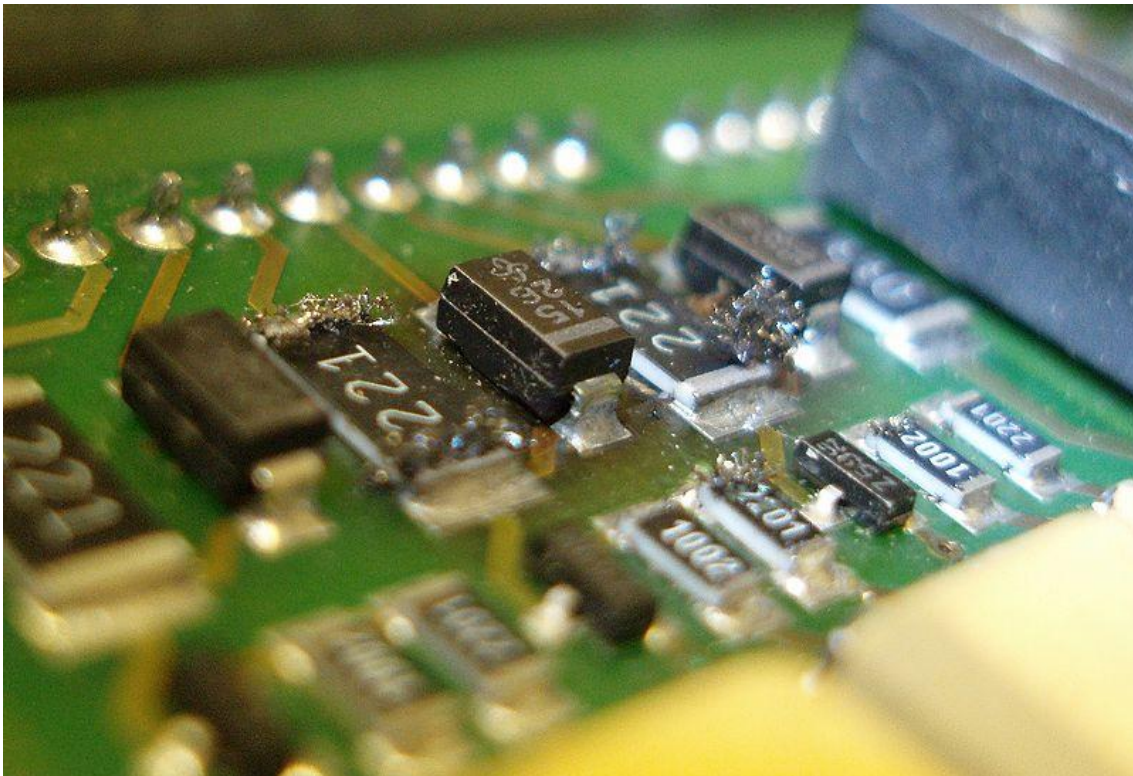


Figura 11: Tin Whiskers [4].

## PCB

Il PCB (*printed circuit board*) è vulnerabile ad agenti esterni, le piste possono essere corrose o rompersi sotto pressioni meccaniche, mentre residui di fluxante possono facilitare la corrosione. I vias (*Vertical Interconnect Access*) si possono interrompere a causa di difetti nella placcatura o a causa di correnti troppo elevate.

## Relay

Ogni volta che un contatto viene aperto o chiuso si usura. Un arco elettrico si forma tra gli elettrodi sia durante l'apertura del contatto sia durante la chiusura, in genere l'arco che si crea in fase di apertura del contatto possiede molta più energia ed è più distruttivo di quello che si crea in chiusura [5].

Il calore e la corrente scatenati dall'arco elettrico creano coni e crateri, per la migrazione del metallo. In aggiunta all'usura del contatto si viene a creare anche uno strato di carbone sugli elettrodi. Questi fenomeni limitano drasticamente la vita dei *relay* e dei contatti in genere, riducendola all'1% della loro vita meccanica [6].

## Semiconduttori

La maggior parte dei danneggiamenti che coinvolgono semiconduttori sono causati da "hot electron". Questo fenomeno si verifica quando gli elettroni (o le lacune) acquistano sufficiente energia cinetica da penetrare gli stati interfacciali. Un esempio è l'accumulo di carica nell'ossido di gate dei transistor, il quale va a modificare la soglia, introducendo un bias permanente.

Altre sorgenti di guasti possono essere:

- Stress elettrici, i quali aumentano localmente la temperatura, arrivando a causare la fusione delle metallizzazioni, inoltre la diffusione e l'elettromigrazione tendono ad essere accelerate dalle alte temperature.
- Scariche elettrostatiche, caratterizzate da alte densità di correnti, generazione localizzata di calore e alti gradienti di campo elettrico, che causano l'immediata rottura del dispositivo.

## Resistori

I resistori possono danneggiarsi interrompendosi o andando in corto, oppure possono variare il loro valore a seconda delle condizioni ambientali o sotto condizioni di lavoro fuori dal loro limite di funzionamento.

Alcuni problemi intermittenti possono essere causati da difetti di produzione, un esempio è un improprio fissaggio tra carbone e metallo che può causare un contatto intermittente oppure può causare una variazione della resistenza complessiva [7].

## Condensatori

Un condensatore è formato da elettrodi, separati da un materiale dielettrico, e avvolti in un contenitore, dove un deterioramento ad uno di questi elementi può causare danni al componente.

Inoltre i condensatori sono caratterizzati da una tensione di *breakdown*, la quale non deve mai essere superata.

Un danno frequente è il corto circuito del condensatore, causato ad esempio dal superamento della tensione di *breakdown* oppure causato dalla migrazione del metallo negli elettrodi che crea percorsi conduttivi all'interno del dielettrico [7].

## Metodi di rilevamento guasti tramite termografia

Analizzando i modi di guasto appena visti, possiamo cercare di prevedere la loro influenza sulla dissipazione termica dei componenti.

In particolare se parliamo di dissipazione di calore di un componente, possiamo parlare di distribuzione della temperatura superficiale, la quale è direttamente proporzionale alla potenza dissipata, ed è la grandezza direttamente misurabile da una termocamera.

Ipotizziamo, ragionevolmente, che a parità di condizioni di lavoro, ad una variazione apprezzabile della distribuzione termica superficiale rispetto a quello che è il normale funzionamento di un componente si possa associare una situazione anomala e quindi un guasto. E' sicuramente sbagliato ipotizzare il viceversa, ossia un guasto non necessariamente causa una variazione apprezzabile di distribuzione termica, soprattutto se si hanno strumenti reali e non ideali per misurare questa variazione.

Di seguito andremo ad analizzare velocemente l'influenza dei vari tipi di guasto sulla dissipazione termica del componente, rispetto al normale funzionamento.

I corti circuiti, che interessano i componenti discreti, come resistenze o condensatori; è ragionevole pensare che siano di facile individuazione termica, sicuramente per l'aumento di temperatura che causano, mentre i circuiti aperti sono sicuramente meno facili da individuare. Pensando ad un condensatore per esempio, la potenza dissipata nel normale funzionamento è trascurabile, così come se si interrompe; più facile è l'individuazione di un circuito aperto di una resistenza (se non è di valore elevato e se

non presenti una piccola caduta di tensione), la quale dissiperà sicuramente meno potenza di quando non era interrotta.

Sempre in riferimento a componenti discreti, ma attivi e di potenza, come possono essere i MOS, i BJT e gli IGBT, quando sono utilizzati come interruttori, il rilevamento di guasti tramite termografia può essere più ragionevole, infatti quando sono in conduzione la potenza dissipata è elevata e facilmente rilevabile.

Essi, si possono trovare in due stati fondamentalmente, in conduzione oppure in interdizione; dal punto di vista termico la potenza dissipata è elevata se sono in conduzione e funzionanti, mentre nulla se sono interdetti oppure se dovrebbero essere in conduzione ma sono guasti, quindi il confronto tra interruttore guasto e funzionante è molto evidente.

Per quanto riguarda i PCB ci sono, come abbiamo visto, diversi tipi di guasto che interessano principalmente saldature, vias e piste; i guasti più comuni nelle saldature sono le interruzioni. Esse sono rilevabili termicamente indirettamente se causano una variazione di potenza nel componente a cui sono collegate, ad esempio se causano l'interruzione di una resistenza essa smetterà di dissipare, il guasto può venir imputato alla resistenza e a questo punto essa viene sostituita con relativa risaldatura e risoluzione del problema. Diversa è l'interruzione di una saldatura il quale guasto non causa una variazione di potenza, come può essere il caso di una stagnatura in una pista di segnale all'ingresso di un operazionale, oppure il collegamento di un condensatore. Nel caso di interruzione dei vias del PCB, o comunque interruzione di piste non individuabili ad una ispezione visiva, la localizzazione di tali guasti tramite termografia può essere difficile anche quando essi causano una considerevole variazione della potenza dissipata in un componente, ad esempio, se interessano una linea di alimentazione di un integrato, anche sostituendo l'integrato scambiandolo per guasto, il problema non verrebbe risolto. Tuttavia verrebbe resa più rapida l'individuazione anche della causa stessa in seguito a collaudo tramite strumentazione, avendo circoscritto in partenza l'effetto del guasto.

Per quanto riguarda i componenti integrati, i guasti si possono manifestare causando interruzione di piste, metallizzazioni, vias e dispositivi oppure a causa di corti circuiti sugli stessi. Anche per la rilevazione di guasti nei chip, la termografia andrebbe sfruttata cercando di rilevare la variazione di potenza causata dal guasto rispetto a condizioni nominali. Però, in questo caso bisogna tenere conto dell'integrazione dei componenti nel chip, in essi infatti, il calore viene dissipato attraverso il package interferendo per conduzione con le zone vicine ad essi, per tanto una variazione di potenza causata da

un guasto su un componente on chip non è detto che sia rilevata superficialmente. Per analizzare questa situazione in dettaglio occorre andare nello specifico a vedere cosa accade in un componente integrato.

# Rete equivalente termica di un componente

## Interpretazione del modello

Per le considerazioni fatte nel capitolo precedente, è senz'altro indispensabile caratterizzare anche in via quantitativa un componente elettronico tramite una rete termica equivalente, per capire come un guasto o comunque una variazione di potenza vengano tradotti in una variazione della temperatura del package.

Il calore nei componenti elettronici su chip, si sviluppa nel DIE di silicio, e da qui viene dissipato nell'ambiente esterno attraverso il package del componente.

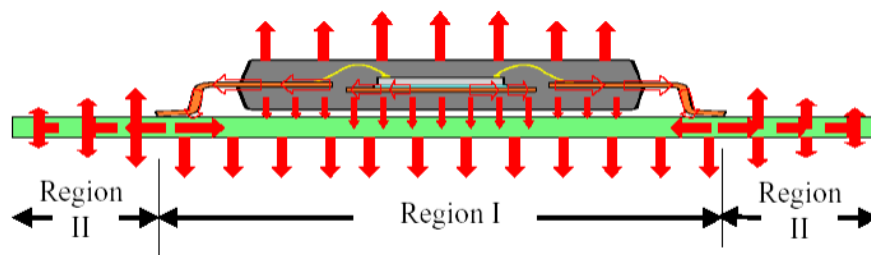


Figura 12: Dissipazione di calore [8]

La rete riportata in Figura 6 è una semplificazione a parametri concentrati di quello che avviene in realtà sul componente, tuttavia, per ottenere una rappresentazione più completa, possiamo costruire un modello tridimensionale del nostro circuito, il quale ci permetta di calcolare, fissata una certa sensibilità e risoluzione della termocamera, qual è la minima variazione di potenza dissipata all'interno del DIE rilevabile come variazione di temperatura del *package*.

Per determinare quanto una variazione di potenza nel DIE di silicio, ad esempio causata da un guasto che interessi una singola area, influenzi la temperatura del package, occorre realizzare una rete termica equivalente della sezione del componente, a livello di singolo pixel, considerando la mutua influenza sulla temperatura di sezioni adiacenti, data dalla conducibilità non infinita del *package*.

Le resistenze termiche che caratterizzano quest'analisi in prima approssimazione sono:

- $R_{jc}$  Resistenza termica del *package*.
- $R_{ca}$  Resistenza termica tra ambiente e *package*.
- $R_c$  Resistenza di conduzione del *package*.

Per quanto riguarda la resistenza termica dovuta alla sola conduzione, occorre prendere in considerazione la seguente espressione:

$$R_{th} = \frac{L}{KA} \left[ \frac{^{\circ}C}{W} \right] \quad (2)$$

Mentre per quanto riguarda la resistenza termica dovuta alla convezione, prenderemo in considerazione la formula 3.

$$R_{th} = \frac{1}{hA} \left[ \frac{^{\circ}C}{W} \right] \quad (3)$$

La resistenza opposta da un materiale al passaggio del calore dipende fortemente dal materiale considerato e dalla sua geometria, quindi per ottenere dei valori realistici per la rete termica equivalente, occorre fare delle ipotesi sui materiali usati e sulle dimensioni. I materiali con cui sono fatti i *package* dei componenti sono di diverso tipo, e vanno da materiali plastici, di basso costo e con bassa conducibilità termica, a materiali ceramici o metallici, i quali possiedono rispettivamente buone ed ottime capacità di conduzione.

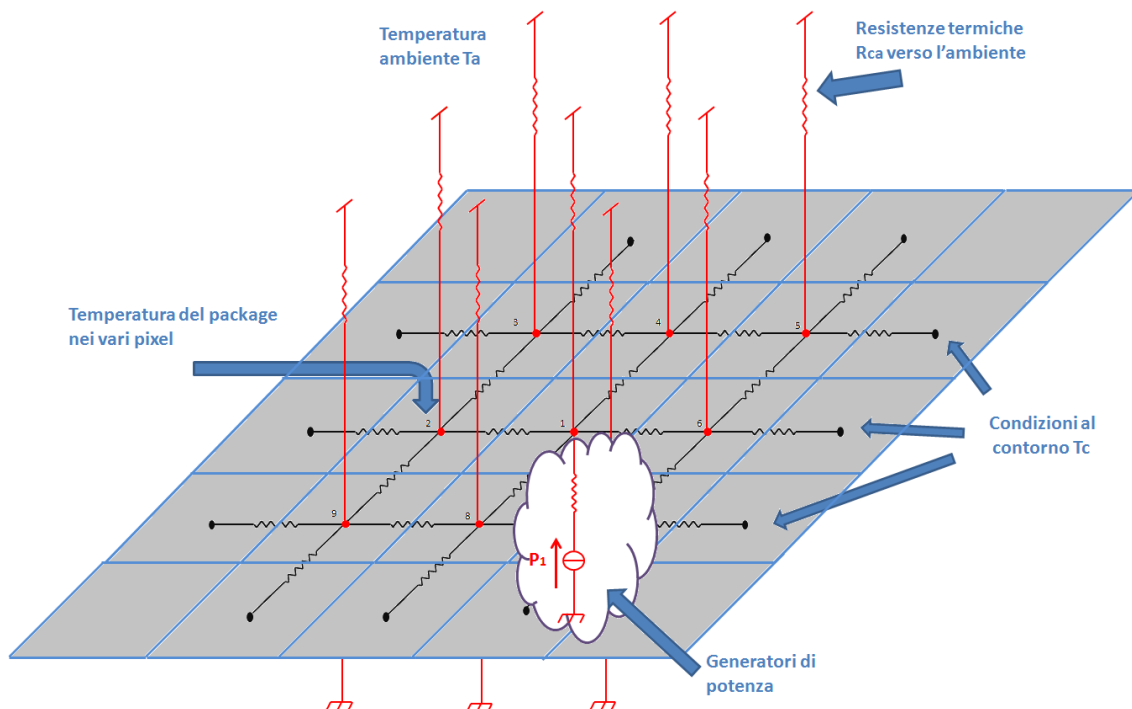


Figura 13: Rete termica equivalente semplificata di un componente elettronico.



In quest'analisi considereremo un componente con package di tipo plastico (*epoxy* con  $K=0.1\div 0.35 \text{ W}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}$ ) DIP8, ed ipotizziamo di inquadrare il componente in maniera ideale con una termocamera avente risoluzione  $240 \times 320 \text{ p}$  (vedi Figura 12).

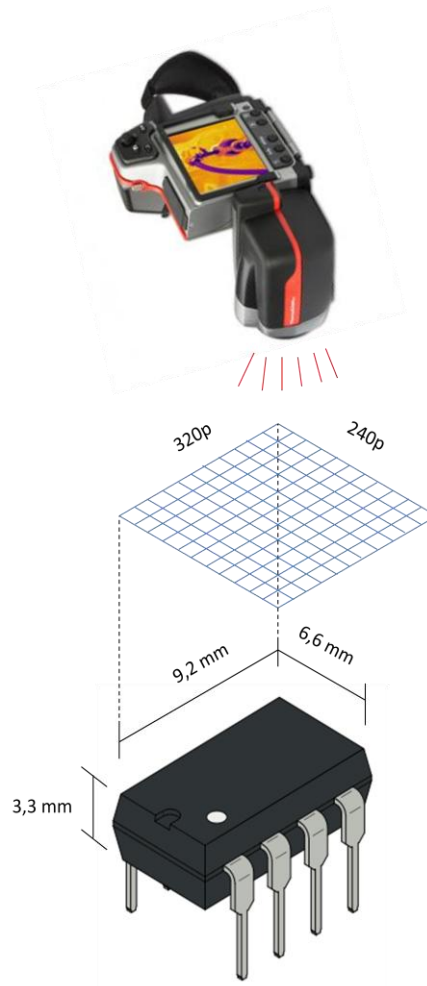


Figura 14: dimensioni DIP8.

## Resistenza termica Giunzione-Package

Chiamata di seguito  $R_{jc}$  è la resistenza che oppone il *package* al passaggio del calore, e dipende fortemente dal tipo di materiale considerato.

Per calcolare la  $R_{jc}$  relativa ad un'area delle dimensioni di un pixel, occorre trovare con semplici considerazioni geometriche le dimensioni di un pixel.

Trovato il lato ( $28.7 \mu\text{m}$ ) e quindi l'area del pixel ( $A_p=0.0008265 \text{ mm}^2 = 826.5 \mu\text{m}^2$ ) utilizzando la formula 2 si ricava la  $R_{jc}$ .

- Ad esempio considerando le dimensioni di un package DIP8 troviamo  $R_{jc}=5,703 \cdot 10^6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ , supponendo che la distanza tra superficie esterna del

*package* e DIE di silicio sia la metà dell'altezza del DIP8 (perciò  $L=1.65\text{mm}$ ),  $K=0.35\text{ W}/(\text{°C}\cdot\text{m})$ , mentre l'area considerata è quella di un pixel.

## Resistenza termica Package-Ambiente

Chiamata di seguito  $R_{ca}$  è resistenza termica caratteristica dello scambio di calore tra ambiente esterno e *package*, relativa anch'essa all'area di un pixel. La dissipazione di calore in questo caso avviene per lo più per convezione, quindi verrà utilizzata la formula 3. Anche se il calcolo è approssimato siccome il coefficiente  $h$  di convezione dipende fortemente dalle condizioni dell'aria circostante. Ad esempio:

- $R_{ca}=24,198\cdot 10^6\text{ °C}/\text{W}$  Considerando  $h=50\text{ W}/(\text{°C}\cdot\text{m}^2)$  e l'area di un pixel.

## Resistenza termica tra pixel

Per dare una stima della resistenza termica tra pixel adiacenti occorre ricavare l'area della sezione verticale che sta tra un pixel e l'altro, ed utilizzare sempre la formula 2 per la conduzione termica. Esempio:

- $R_c=1731\text{ °C}/\text{W}$  ipotizzando sempre un DIP8, con le stesse caratteristiche già descritte per l'esempio della  $R_{jc}$ .

Confrontando le tre resistenze ottenute negli esempi, si vede chiaramente che la resistenza verticale, la  $R_{jc}$ , è molto elevata, a causa dell'area ridotta, mentre la resistenza orizzontale  $R_c$ , è tre ordini di grandezza in meno, a causa dell'area più ampia offerta dall'altezza del *package*; queste semplici considerazioni denotano la difficoltà di rilevare piccole variazioni di potenza in singoli pixel a causa della conduzione del calore dalle aree corrispondenti a pixel vicini.

Simulando il circuito equivalente ad esempio utilizzando un programma come LTspice, è possibile analizzare i risultati, variando le condizioni di dissipazione, e simulando guasti diversi.

Ovviamente l'analisi seguente è approssimata, avendo il puro scopo di stimare una semplice fattibilità in linea di principio. Abbiamo infatti considerato che la conduzione di calore tra pixel possa avvenire solo tra un pixel e i quattro vicini, mentre dato un pixel i vicini sono otto, includendo anche flussi di calore lungo le direzioni diagonali. Inoltre non si è considerata la resistenza termica con la scheda PCB su cui è montato il componente, sia dovuta alla conduzione delle piste metalliche, sia dovuta alla convezione (o conduzione nel caso il componente sia appoggiato sulla scheda) del retro

sul componente. Tuttavia, tali approssimazioni consentono di ottenere una precisione limitata all'ordine di grandezza, coerentemente con lo scopo di questa analisi.

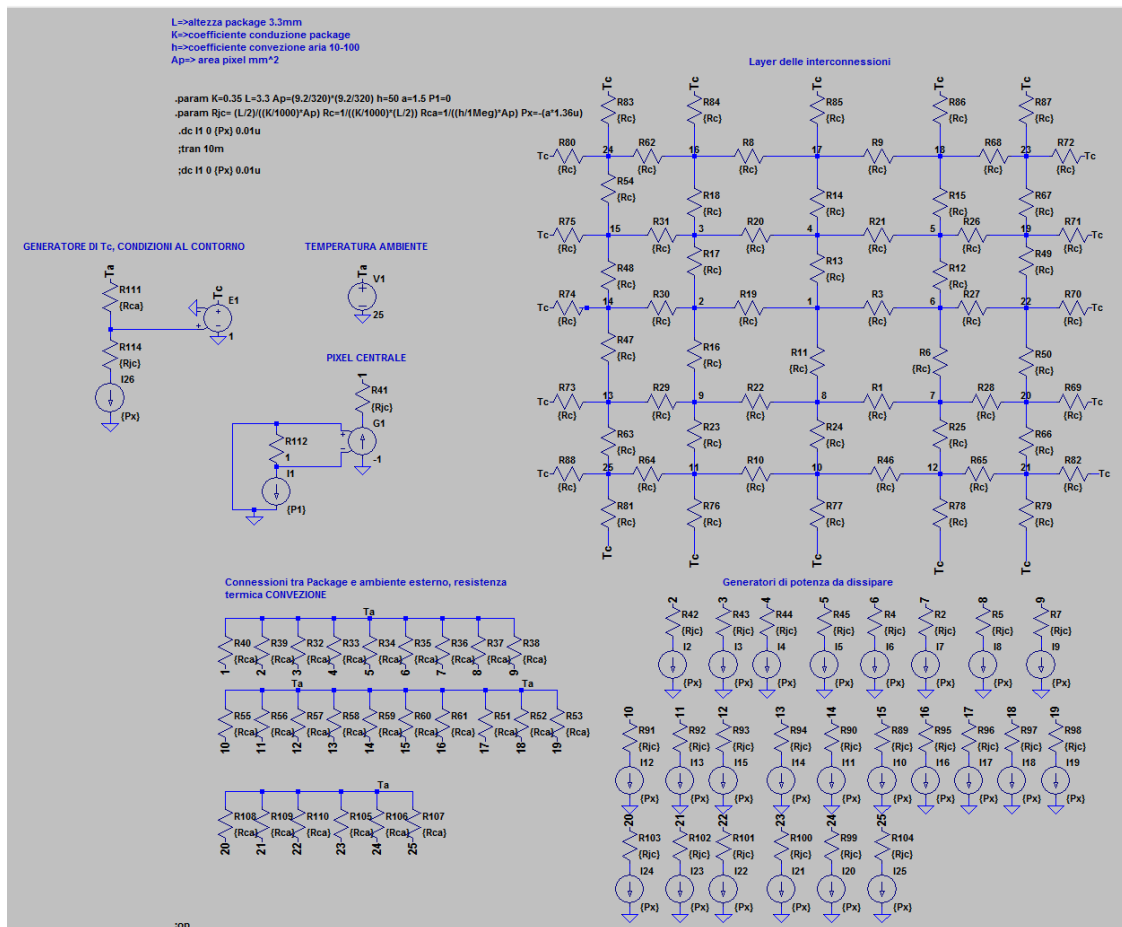


Figura 15: Simulazione con LTSpice.

## Simulazione di diminuzione di potenza dissipata

Nelle simulazioni che seguono si è ipotizzato un calo di potenza nel circuito equivalente relativo al pixel o all'area centrale, questa condizione può verificarsi ad esempio a causa di un'interruzione di un dispositivo.

### Potenza nulla nel pixel centrale

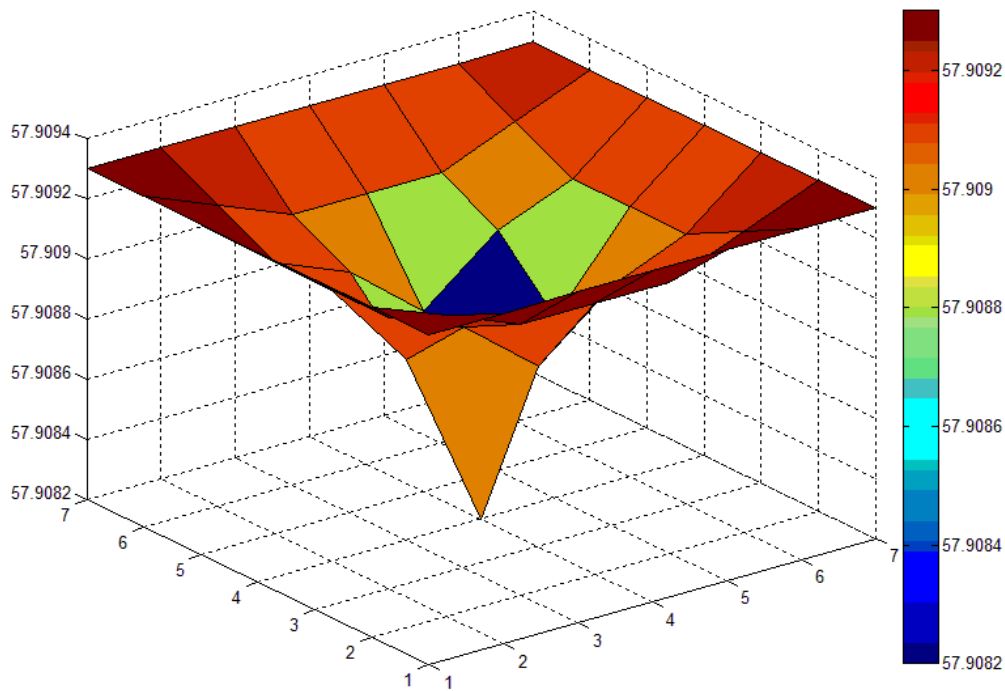
Per avere una visione generale del problema, si è simulato il circuito con potenza nulla nel generatore inerente al pixel centrale.

Parametri di simulazione:

- Area simulazione: superficie di 5x5 pixel.
- Potenza  $P_x$  di 1.36  $\mu\text{W}/\text{pixel}$ , un valore plausibile per una dissipazione complessiva del chip di 100mW.

- Coefficiente di conducibilità  $K=0.35 \text{ W/ } ^\circ\text{C}\cdot\text{m}$ .
- Altezza del *package*  $L=3.3\text{mm}$ .
- Temperatura ambiente  $T_a=25^\circ\text{C}$ .

Di seguito si vanno a riportare in un grafico i valori assunti da ogni pixel nella superficie di simulazione.



*Figura 16*

Osservando il grafico sopra si evidenzia che la differenza di temperatura massima è di circa un millesimo di grado, troppo piccola per essere rilevata da una termocamera come quella utilizzata in questo elaborato che ha una risoluzione di  $50 \text{ m}^\circ\text{C}$ .

### Diminuzione della potenza nel pixel centrale

Variando la potenza del generatore centrale di un coefficiente  $\alpha$  ( $P_1 = \alpha P_x$ ), con  $\alpha$  compreso tra 0 e 1 si va a graficare il  $\Delta T$  in funzione di  $\alpha$ , considerando alcune variazioni nelle condizioni del componente tra cui, conducibilità del package  $K$ , altezza del package  $L$  e potenza dissipata da ogni singolo pixel  $P_x$ .

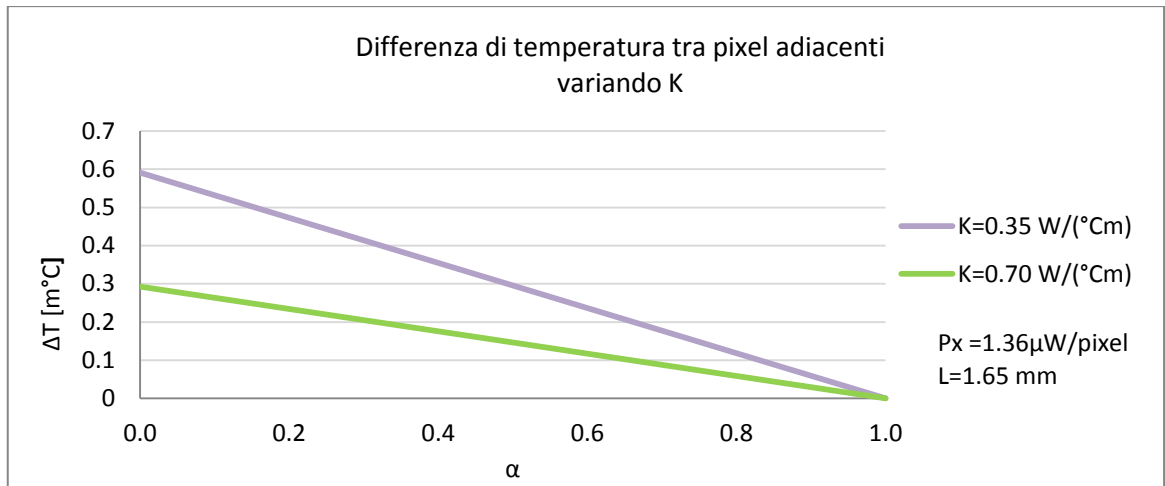


Figura 17: Variazione di temperatura tra pixel centrale e pixel adiacente variando  $K$ .

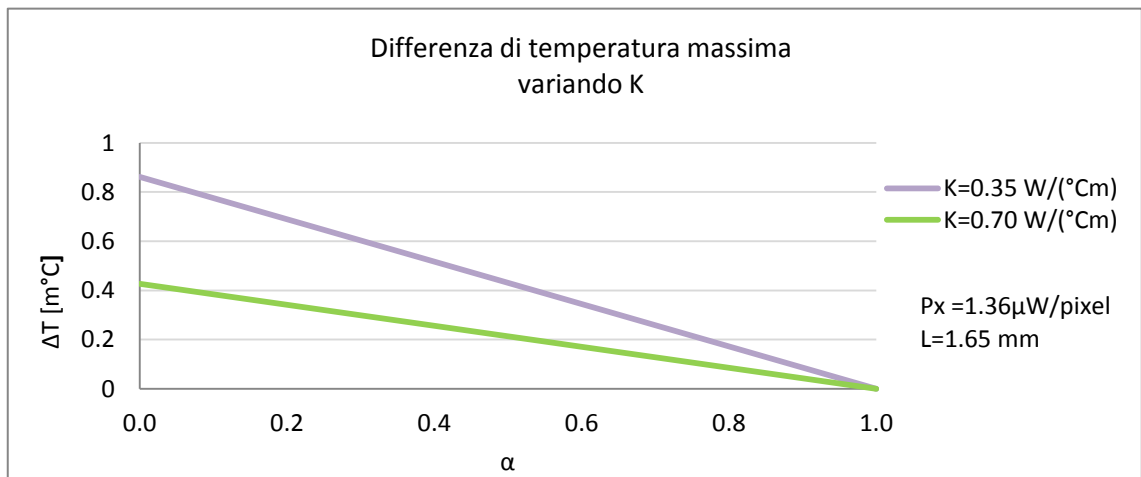


Figura 18: Variazione di temperatura tra pixel centrale e pixel al margine dell'area variando  $K$ .

Come era prevedibile, la variazione di temperatura tra pixel vicini diminuisce all'aumentare della conducibilità del *package*, siccome l'aumento di conducibilità tende ad uniformare la temperatura del *package*, diminuendo la resistenza termica di collegamento tra pixel  $R_c$ .

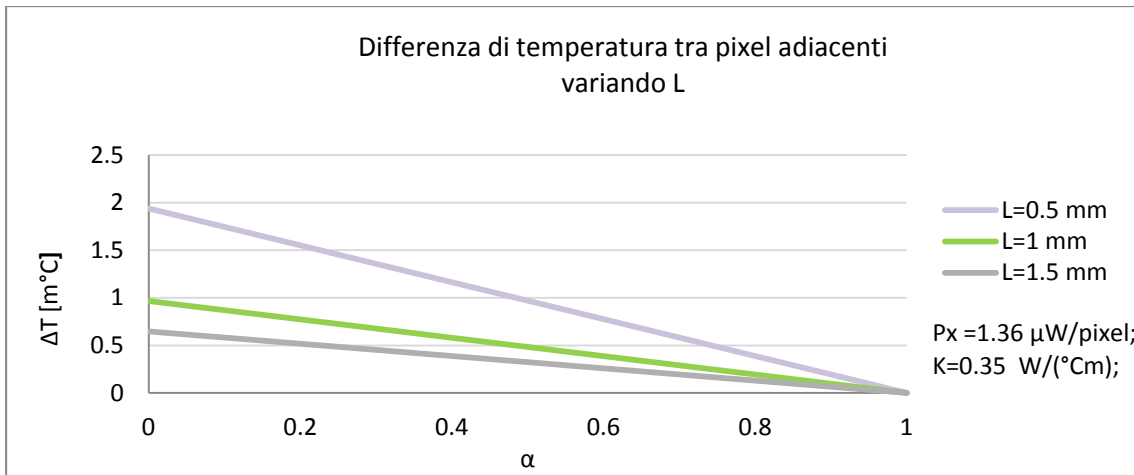


Figura 19: Variazione di temperatura tra pixel centrale e pixel adiacente al variare della lunghezza del package.

Diminuendo l'altezza del package, si ha l'effetto opposto, in questo caso aumenta la variazione di temperatura tra sezione centrale e la vicina, a causa della diminuzione della sezione trasversale di collegamento tra pixel, il che significa un aumento di  $R_c$ .

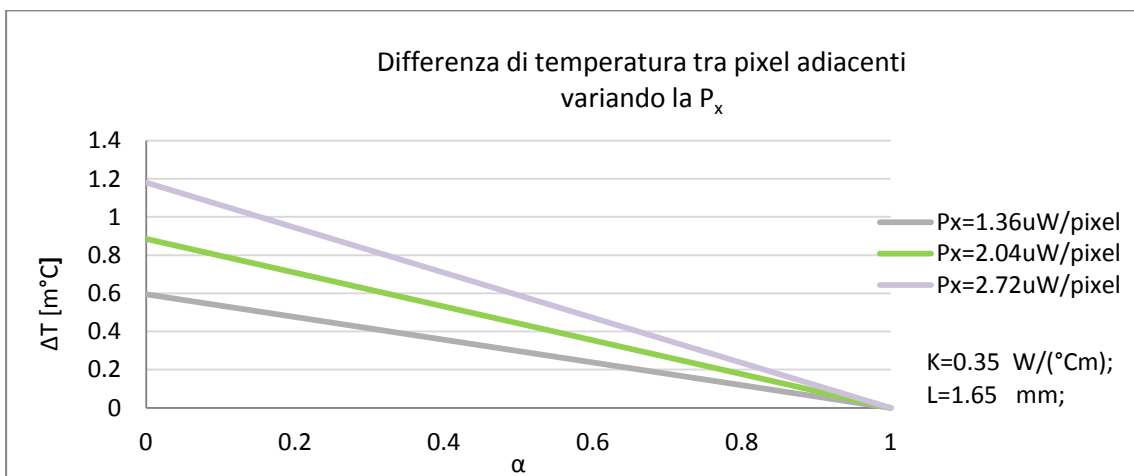


Figura 20: Variazione di temperatura tra pixel centrale e pixel adiacente al variare della potenza dissipata per pixel.

Stesso andamento lo si ottiene con un aumento della potenza dissipata per pixel, il  $\Delta T$  infatti è direttamente proporzionale alla potenza dissipata in ogni pixel.

### Aumento dell'area di simulazione con potenza nulla al centro

Visto il basso valore di sensibilità che sarebbe necessaria per rilevare la differenza di temperatura nel package, nel caso in cui la diminuzione di potenza interessasse solamente la superficie di un pixel, e vista la sensibilità della termocamera utilizzata,

che è di 5 centesimi di °C, è conveniente svolgere un'analisi per sapere quant'è la superficie del chip che deve smettere di erogare potenza affinché si ottenga una variazione di temperatura maggiore uguale alla sensibilità, tra l'area interessata e quelle vicine.

Le condizioni descritte sopra sono ricreabili estendendo il circuito in Figura 15, oppure in maniera fittizia aumentando il valore dell'area del pixel, utilizzando lo stesso circuito.

Di seguito si riportano i risultati della simulazione eseguita aumentando l'area di ogni pixel di un fattore  $a$ , mentre si mantiene nulla la potenza corrispondente all'area centrale.

Si ricorda che il valore dell'area di un pixel è  $A_p = 826.5 \mu\text{m}^2$ .

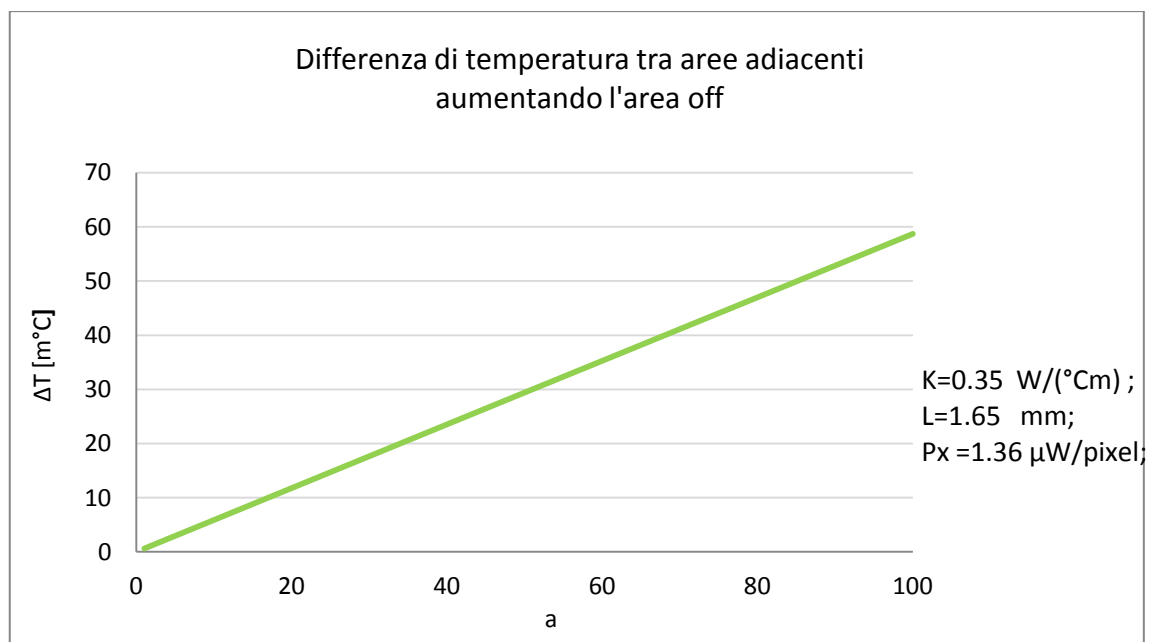


Figura 21: Variazione di temperatura tra area centrale e aree adiacenti, con area centrale che non eroga potenza.

Come si nota occorre che almeno una superficie di circa 90 volte quella di un pixel ( $90 \cdot A_p = 74385 \mu\text{m}^2$ ) smetta di erogare potenza rispetto alle altre per notare una differenza di 5 centesimi di °C tra le due aree. Questa superficie corrisponde ad un quadrato di lato di circa 10 pixel (287  $\mu\text{m}$ ).

## Simulazione di incrementi di potenza dissipata

Un aumento della potenza in un'area corrispondente ad un singolo pixel, può verificarsi in presenza di un danno ad un dispositivo, come può essere un corto circuito.

In questa simulazione si è ipotizzato che la potenza dissipata nell'area corrispondente al pixel centrale aumentasse di un coefficiente  $\alpha$  ( $P_1 = \alpha P_x$ ), con  $\alpha$  maggiore di uno.

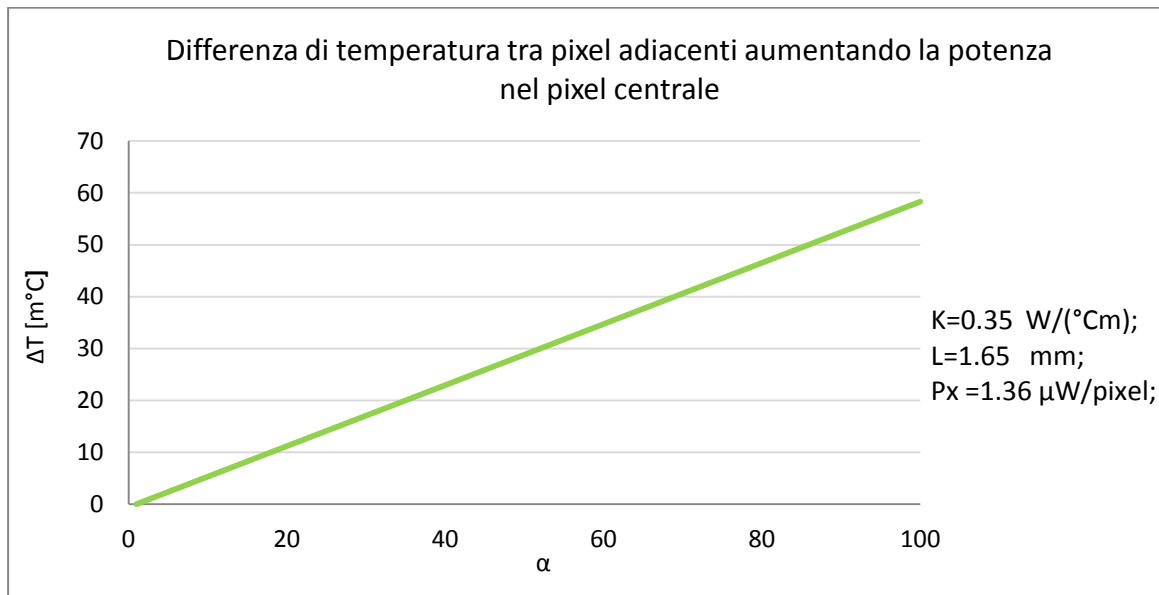


Figura 22: Variazione di temperatura tra pixel adiacenti aumentando la potenza nel pixel centrale.

In questo caso è necessario aumentare la potenza nel pixel centrale rispetto al valore nominale di circa un fattore 100 rispetto ai pixel vicini, per rilevare una variazione di potenza di 5 centesimi di °C.

## Conclusioni simulazione

La simulazione mostra che la variazione di potenza che deve avere luogo in un dispositivo per riuscire ad ottenere una variazione di temperatura nel *package* maggiore della sensibilità di misurazione (5 centesimi di °C in questo caso), dipende ovviamente dalle geometrie e dal tipo di materiale del *package*, ma anche dal tipo di guasto e dall'area considerata.

Nel caso di un *package* di tipo DIP8, e tenuto conto delle approssimazioni e condizioni di simulazione fatte sopra, un guasto che causi un aumento di potenza in un'area corrispondente a quella di un pixel ( $28.7 \times 28.7 \mu\text{m}^2$ ), affinché porti ad una variazione di



temperatura di 5 centesimi di °C nel *package*, in quell'area la potenza deve aumentare di quasi 100 volte rispetto alle aree vicine.

Mentre nel caso di un guasto che causi l'annullamento della potenza dissipata in un'area del chip, è necessario che la superficie che smetta di erogare potenza sia 100 volte più grande dell'area di un pixel, per ottenere una variazione di temperatura nel *package* di almeno 5 centesimi di °C, ovvero stiamo parlando di un area di  $287 \times 287 \mu\text{m}^2$ .

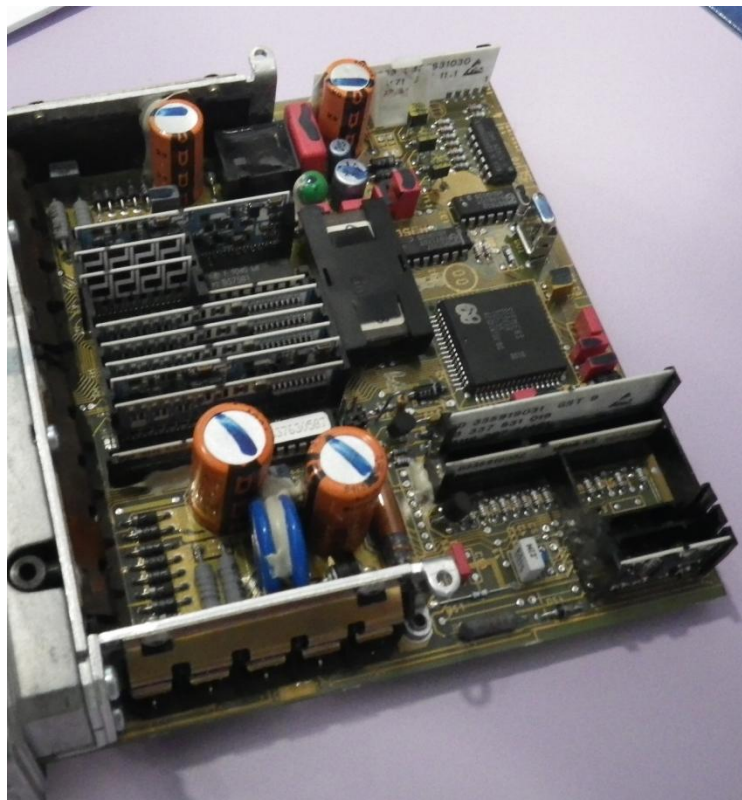
Tenuto conto che ad esempio, uno stadio di uscita di un *buffer* CMOS a 24mA (con una tecnologia di  $0.35 \mu\text{m}$ ) può avere dimensioni di  $100 \times 150 \mu\text{m}^2$  mentre le dimensioni sono maggiori di almeno un fattore due se consideriamo i MOS di uno stadio *push pull* di un amplificatore operazionale, viene naturale chiedersi se riusciamo almeno teoricamente secondo questa trattazione a rilevare un danneggiamento di un dispositivo di potenza come quelli sopra citati. Se il dispositivo è interessato da un aumento di potenza almeno di 100 volte rispetto ai componenti vicini è teoricamente rilevabile. Nel caso di un guasto che causi invece una diminuzione o un annullamento della potenza siamo al limite, nel senso che dipende molto dal tipo di dispositivo considerato.

Nella realtà, c'è da considerare il rumore, che è la prima causa di non idealità oltre a tutte le approssimazioni fatte, tra le quali il fatto che la temperatura ambiente sia sempre ad un valore costante così come il coefficiente di convezione dell'aria.

Inoltre i dispositivi on chip non di potenza, ma di segnale, sono più piccoli di quelli di potenza, quindi l'individuazione della eventuale variazione di temperatura dovuta ad un loro guasto appare ancora più critica; c'è da dire che la probabilità di guasto di un dispositivo di segnale è tipicamente minore della probabilità di guasto di un dispositivo di potenza.

# Sviluppo di un banco di prova automatico per il test della centralina di riferimento

## Centralina elettronica di riferimento



*Figura 23: Immagine della centralina di riferimento utilizzata nei test*

La centralina nella Figura 23 è una centralina di controllo di un cambio automatico, per essa si è sviluppato il banco di test automatico LabVIEW.

La centralina è composta da degli slot verticali su cui sono inseriti altri componenti, questo rende lo studio termico sicuramente meno preciso siccome non si ha la possibilità di osservare ogni singolo componente dello slot.

## Funzionamento

L'interfaccia con il veicolo comprende segnali di potenza e non, entrambi a 24V. I segnali di potenza sono gestiti da transistor e hanno il compito di pilotare alcune elettrovalvole all'interno del cambio.

Il principale compito della centralina è quello di attivare 8 elettrovalvole (A B C D E F G WK) all'interno del cambio, le quali gestiscono l'inserimento della marcia, in particolare, la sequenza di inserimento marce è la seguente:

- A & F prima marcia
- A & E seconda marcia
- A & D terza marcia
- A & B quarta marcia
- B & D quinta marcia
- B & E sesta marcia
- C & F retro marcia

## Gestione cambiate

La gestione delle cambiate è regolata dalla centralina a seconda di segnali fondamentali che le arrivano in ingresso:

- Segnali di giri turbina e giri d'uscita, essi sono fondamentali per la gestione del cambio. Vengono forniti dal cambio tramite due sensori magnetici che generano una forma d'onda quadra (0-24V), con frequenza proporzionale al numero di giri.
- SPV, selezione programma di marcia, permette di scegliere tra due differenti mappature della centralina, una *Normal* ed una *Power* nella quale vengono spostate in alto le cambiate (vengono eseguite ad un numero di giri turbina maggiore).
- SKD, segnale che si attiva quando l'acceleratore è al 100% con un'ulteriore pressione del pedale da parte del conducente, l'effetto è simile ad una mappatura power della centralina.

### Giri d'uscita

Corrispondono alla velocità di rotazione dell'albero all'uscita del cambio, ovvero essi sono proporzionali alla velocità del veicolo. I fattori che legano i giri d'uscita alla velocità del veicolo sono: il rapporto al ponte e il raggio dinamico degli pneumatici.

$$V \left[ \frac{Km}{h} \right] = \frac{0.377 \cdot R_{din}[m] \cdot nAb[giri/min]}{Ra_{ratio}} \quad (4)$$

Dove  $R_{din}$  è il raggio dinamico degli pneumatici,  $Ra_{ratio}$  è il rapporto al ponte,  $nAb$  sono i giri d'uscita e 0.377 è il rapporto  $\frac{2 \cdot \pi \cdot 60}{1000}$ .

### Giri turbina

Indicano la velocità di rotazione della turbina del convertitore di coppia.

I giri turbina quando la marcia è inserita sono legati al numero di giri d'uscita dal rapporto del cambio;

$$nAb = \frac{nT}{G_{ratio}}$$

Dove  $nT$  sono i giri turbina mentre  $G_{ratio}$  è il rapporto di marcia.

Nel passaggio di marcia invece, cioè l'istante di tempo che va tra il vecchio rapporto del cambio e il nuovo, il numero di giri turbina cala (se siamo in incremento di marcia altrimenti cresce) a causa del fatto che essi si devono adattare al numero di giri dell'albero d'uscita con il nuovo rapporto. La centralina, che è munita di autodiagnosi, si porta in uno stato d'errore se questa variazione dei giri turbina è troppo repentina o non rispetta l'andamento fisico di una reale cambiata.

### Convertitore di coppia

E' un dispositivo idraulico che permette di moltiplicare la coppia applicata in uscita dal cambio. In genere esso viene attivato in prima marcia e parte della seconda marcia, comunque la sua gestione dipende dal software caricato in centralina. Il comando che gestisce il convertitore di coppia è l'elettrovalvola WK. Quando WK=1 il convertitore è disinserito e si dice che il cambio è in meccanica, siccome fisicamente i giri turbina sono gli stessi dei giri motore; quando WK=0 il convertitore è inserito e si dice che il cambio è in idraulica, in questo modo si ha un incremento di coppia in uscita dal cambio.

## Rallentatore idraulico

Detto anche *retarder*, è un dispositivo che viene attivato dal conducente del veicolo e permette di rallentare il veicolo senza sollecitare i freni o comunque limitandone l'usura, fornendo una coppia frenante.

Questo tipo di *retarder* è un rallentatore primario cioè svolge la sua funzione sull'albero di ingresso del cambio e dunque il suo effetto frenante dipende dal rapporto inserito.

Il comando del rallentatore è svolto da un elettrovalvola on/off (chiamata Y1) che apre e chiude il passaggio dell'olio nella camera del rallentatore, in parallelo a Y1 è collegata un'altra elettrovalvola (chiamata Y2) che apre e chiude il passaggio dell'olio da un accumulatore idraulico allo scopo di diminuire il tempo di intervento del rallentatore.

## Gestione inserimento marce

La gestione dell'inserimento marce è legata anche ad altri segnali provenienti dal veicolo, quali ad esempio:

- posizione del pedale acceleratore, segnale analogico in tensione 1÷4V.
- SGF, liberazione marcia, si attiva premendo a fondo il pedale del freno.
- SNE folle esterna, manda il cambio in folle se basso.

## Descrizione generale del banco

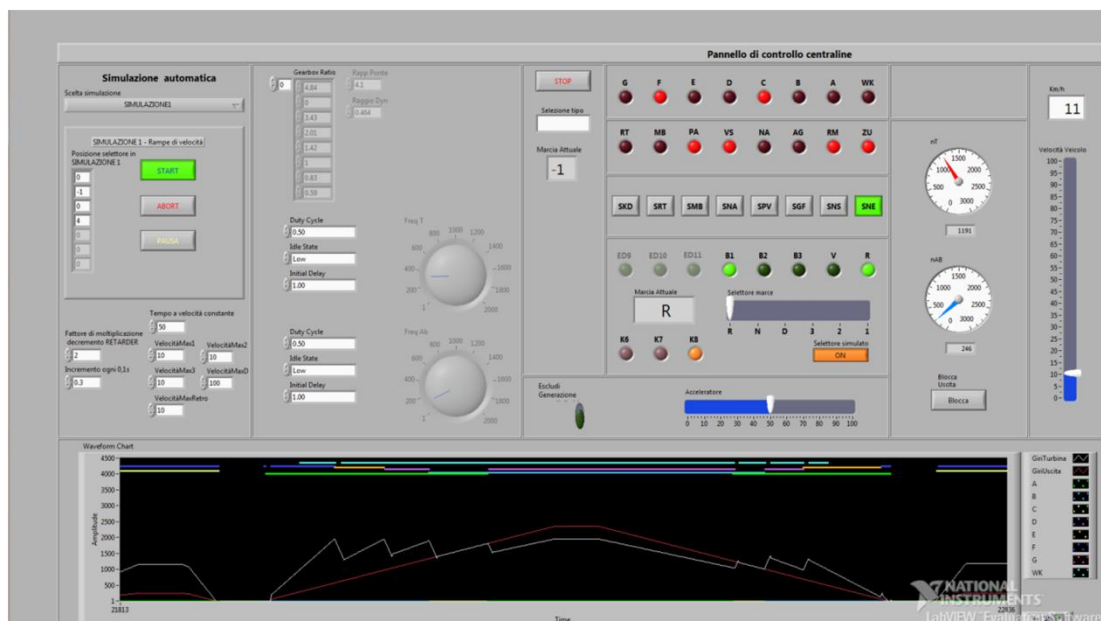


Figura 24: Front panel Labview del banco di test

Il banco di prova per la centralina elettronica è stato realizzato allo scopo di fornire uno strumento di collaudo veloce ed affidabile per il test della centralina, inoltre verrà impiegato per generare le diverse configurazioni nelle rilevazioni termiche della centralina.

Nel realizzare il banco di prova LabVIEW si sono dovute ricreare le condizioni di funzionamento della centralina all'interno del veicolo il più verosimilmente possibile.

Le elettrovalvole del cambio sono state simulate collegando sulle uscite corrispondenti della centralina dei resistori di potenza, con valori di resistenza simili alla parte resistiva delle elettrovalvole reali, ignorando per semplicità la parte induttiva (è sufficiente la parte resistiva per un test funzionale).

L'interfaccia di collegamento tra applicativo LabVIEW e centralina è fornita da un compactDAQ, un dispositivo I/O apposito della National Instruments, le cui uscite sono state opportunamente optoisolate.

L'applicativo realizzato si compone delle varie parti principali:

- Macchina a stati che gestisce la simulazione automatica.
- Blocco che calcola i segnali di giri.
- Blocchi di acquisizione e generazione segnali.

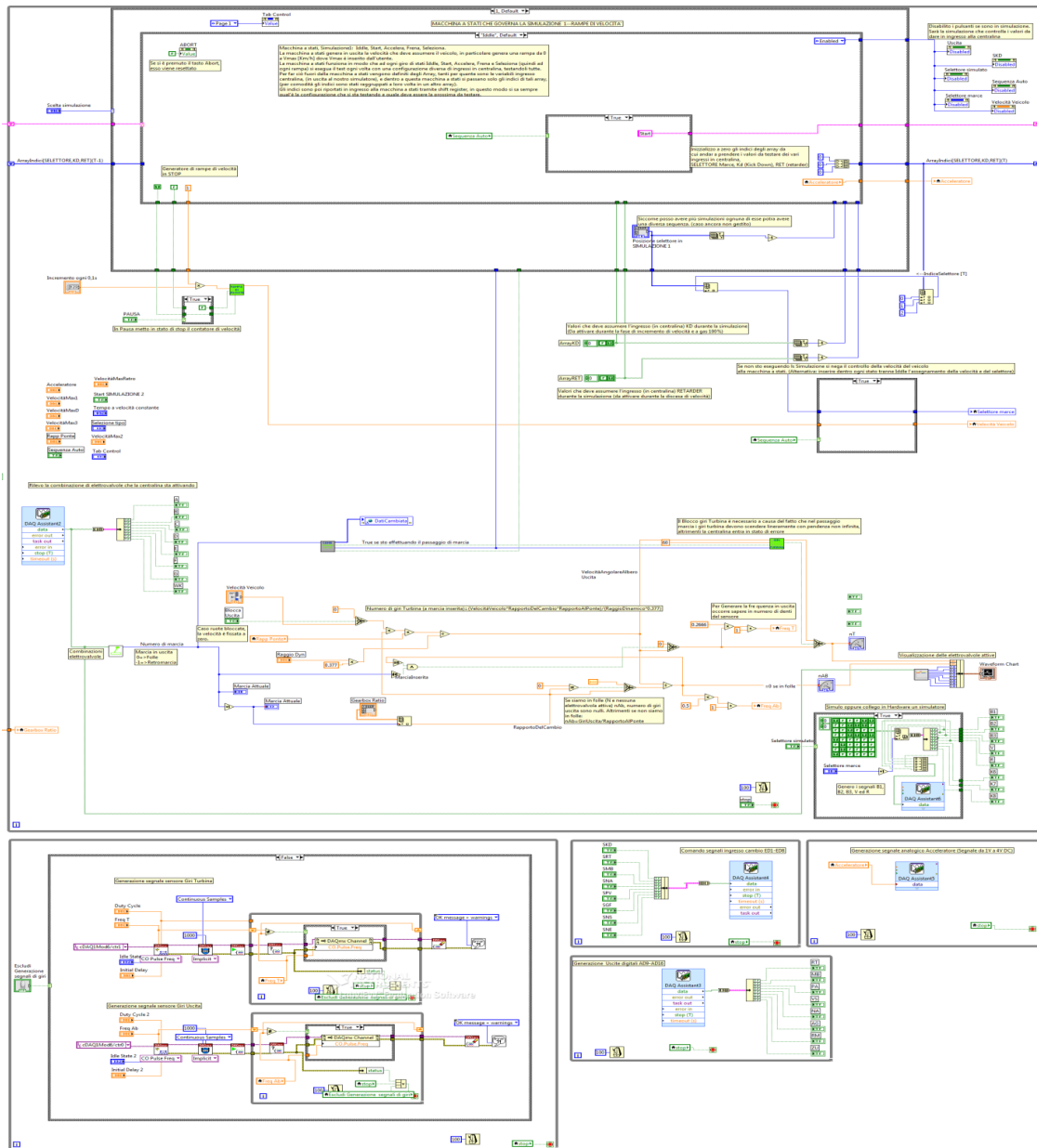


Figura 25: Block diagram simulatore centralina.

Il simulatore è stato sviluppato in maniera tale che possa venir utilizzato sia in modalità automatica, in questo caso è la macchina a stati che pilota i vari ingressi in centralina, sia in modalità manuale, in questo caso è l'utente che controlla manualmente gli ingressi in centralina, compresa la velocità del veicolo.

## Macchina a stati che gestisce la simulazione automatica

La macchina a stati che gestisce la simulazione automatica ricrea le condizioni di funzionamento che troverebbe la centralina montata su un veicolo; in particolare si simula un'accelerazione da zero ad una certa velocità massima ( $V_{max}$  impostata dall'utente) ed una successiva decelerazione.

Gli stati della simulazione sono: Idle, Start, Accelera, Frena, Seleziona.

La macchina a stati funziona in modo che ad ogni giro di stati Idle, Start, Accelera, Frena e Seleziona si esegua una rampa di velocità da 0 a Vmax testando ogni volta una configurazione diversa di ingressi in centralina.

Per far ciò fuori dalla macchina a stati vengono definiti degli *array*, tanti per quante sono le variabili ingresso centralina, ogni *array* è lungo quanto sono le configurazioni da testare di tale ingresso (ad esempio per un booleano saranno due i valori. *True e False*), nella macchina a stati vengono passati tramite *shift register* solo gli indici di tali array, in questo modo si sa sempre qual'è la configurazione che si sta testando e quale deve essere la prossima da testare.

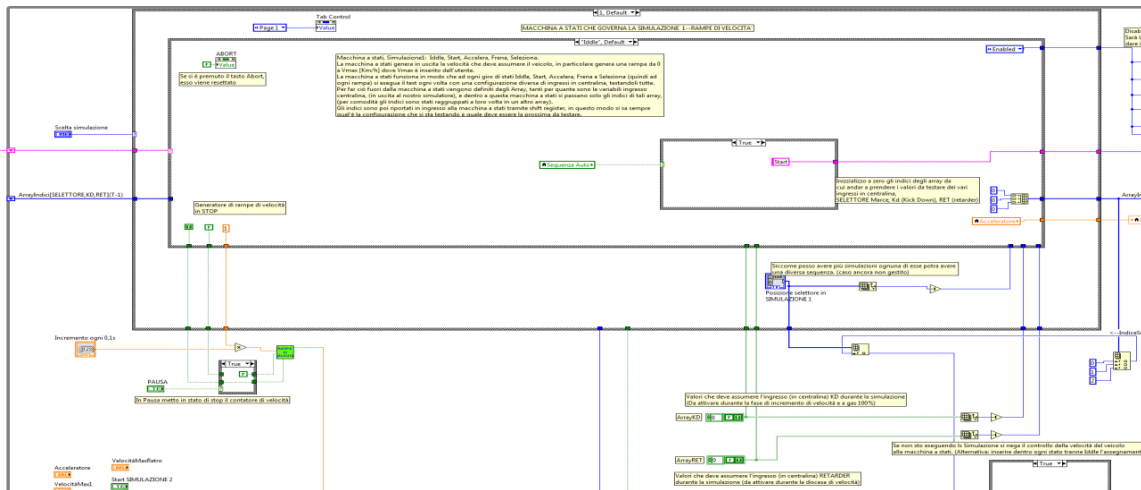


Figura 26: Macchina a stati.

La rampa di velocità è generata da un SubVI chiamato *Rampe*, esso non è altro che un contatore che incrementa l'uscita, che è appunto la velocità. La macchina a stati, in base allo stato in cui si trova, fornisce a questo SubVI i segnali in ingresso opportuni.

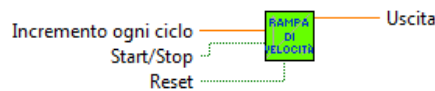


Figura 27: Icona SubVI Rampe.

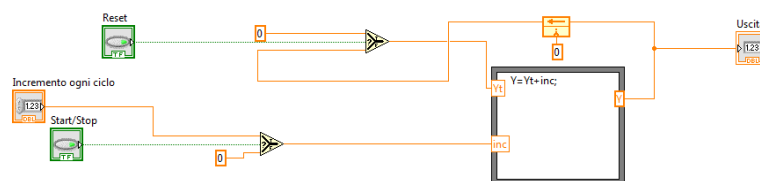


Figura 28: SubVI Rampe



## Blocco che calcola i segnali di giri

Il blocco che calcola i segnali di giri ha il compito di calcolare il valore di frequenza che devono assumere i due segnali di giri. Nel caso in cui la marcia sia inserita, esso svolge l'operazione (4), ovvero prendendo in ingresso la velocità del veicolo, o generata dalla macchina a stati o inserita dall'utente, fornisce in uscita il numero di giri turbina e d'uscita.

Il legame tra la frequenza del segnale di giri ed il numero di giri dipende dal numero di denti del sensore magnetico, per questo vi è un ulteriore fattore di moltiplicazione.

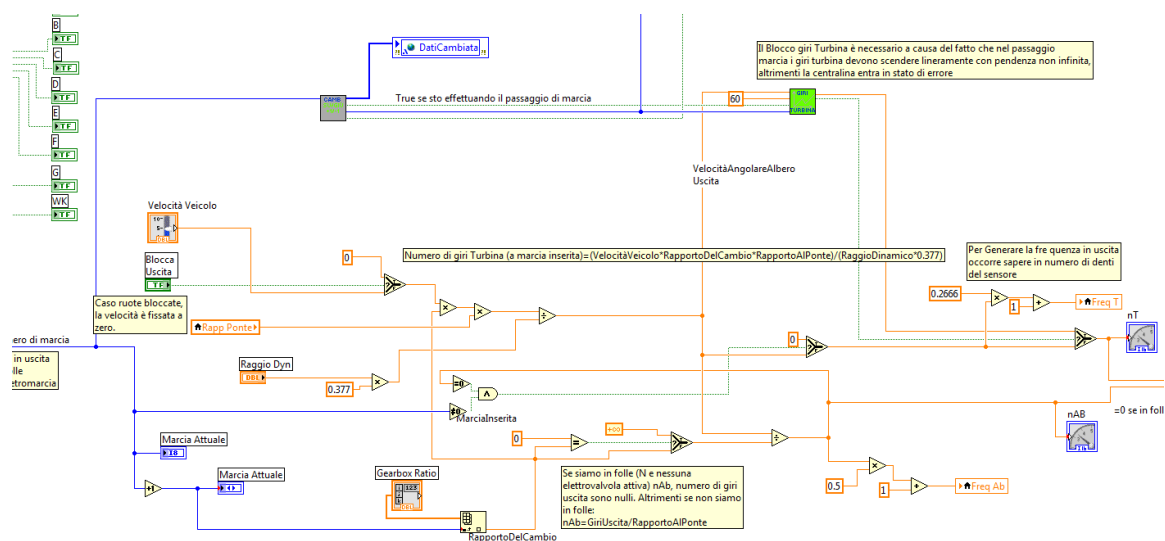


Figura 29: Blocco che calcola i segnali di giri motore e turbina.

Nel caso in cui il SubVI DatiCambiata (vedi Figura 31) rilevi un passaggio di marcia eseguito della centralina, il controllo dei giri turbina deve passare al SubVI GiriTurbina (vedi Figura 33) il quale simula il reale andamento di tali giri in un veicolo, i quali devono calare o aumentare (a seconda che la marcia stia incrementando o decrementando) fino a che non raggiungono i giri d'uscita.

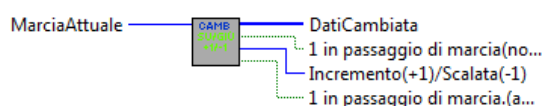


Figura 30: Icona DatiCambiata

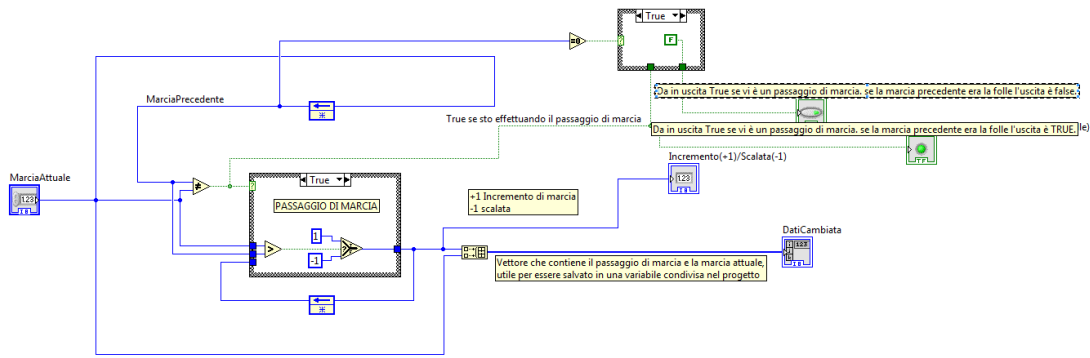


Figura 31: SubVI DatiCambiata.

Il compito principale del SubVI DatiCambiata quindi è rilevare la cambiata della centralina, attivando un segnale binario in uscita, ed in base al tipo di cambiata, incremento di marcia o decremento di marcia, fornire in uscita un ulteriore segnale che può assumere  $\pm 1$ .

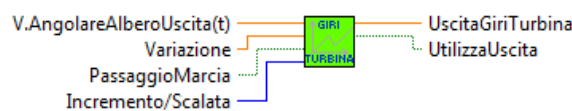


Figura 32: Icona GiriTurbina

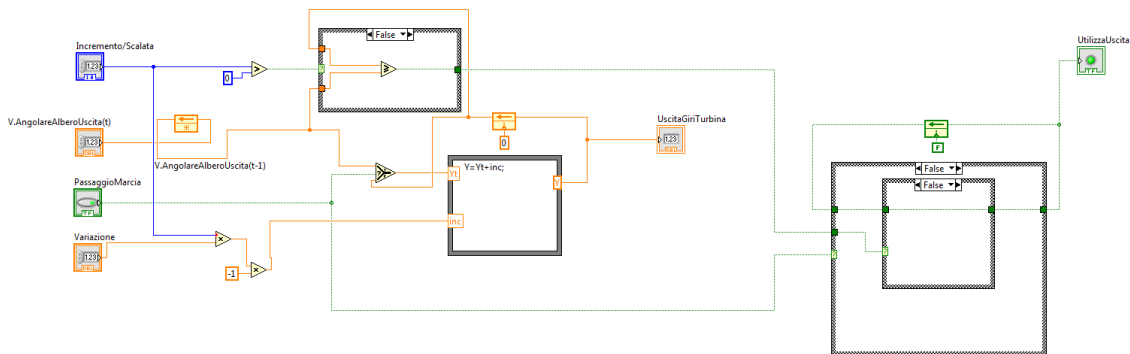


Figura 33: SubVI GiriTurbina.

## Blocchi che generano i segnali di interfacciamento

In Figura 34 è riportato il blocco che genera i due segnali di frequenza da dare in uscita al compact DAQ. È stata inserita una selezione nel caso in cui si voglia escludere la simulazione, questo è utile durante lo studio termico della centralina, in questo modo si riesce ad individuare la parte della centralina adibita al condizionamento di quei segnali.

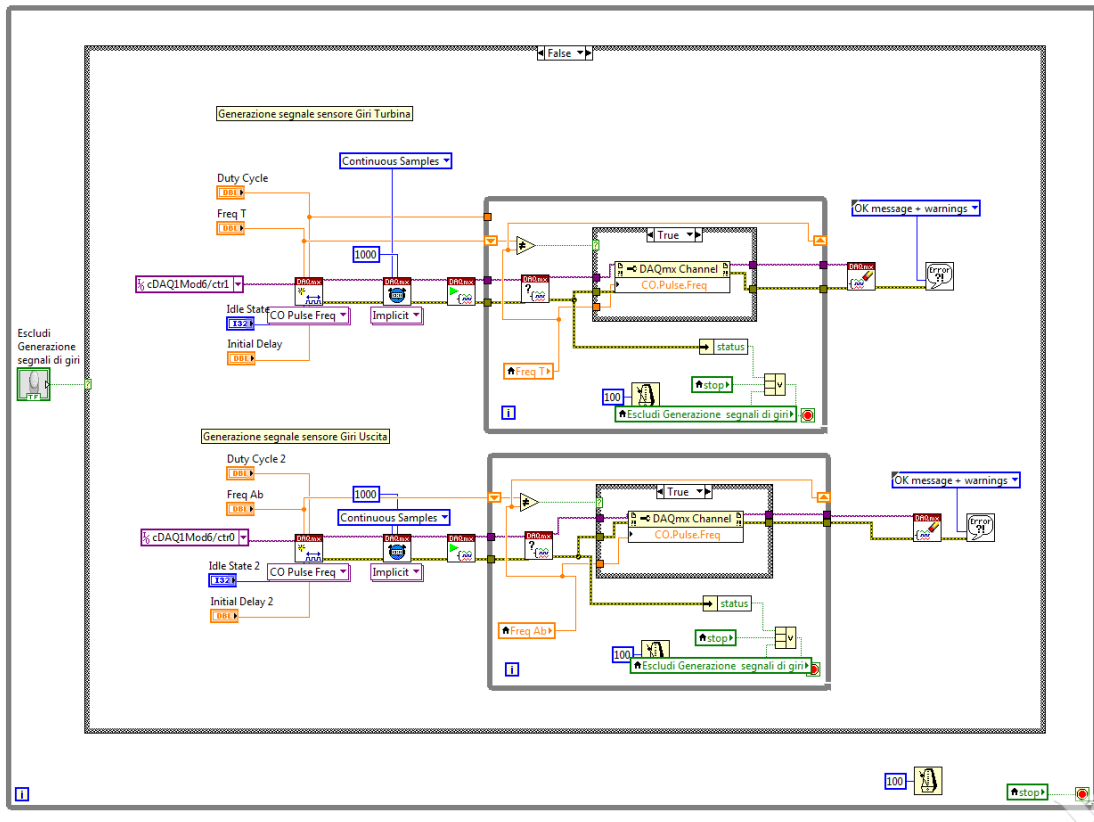


Figura 34: Blocco che genera fisicamente i segnali di giri.

In Figura 35 invece sono riportati i blocchi che generano e acquisiscono i segnali digitali e il blocco che genera l'unico segnale analogico, il segnale acceleratore, un segnale di tensione che può assumere valori che variano tra 1V e 4V.

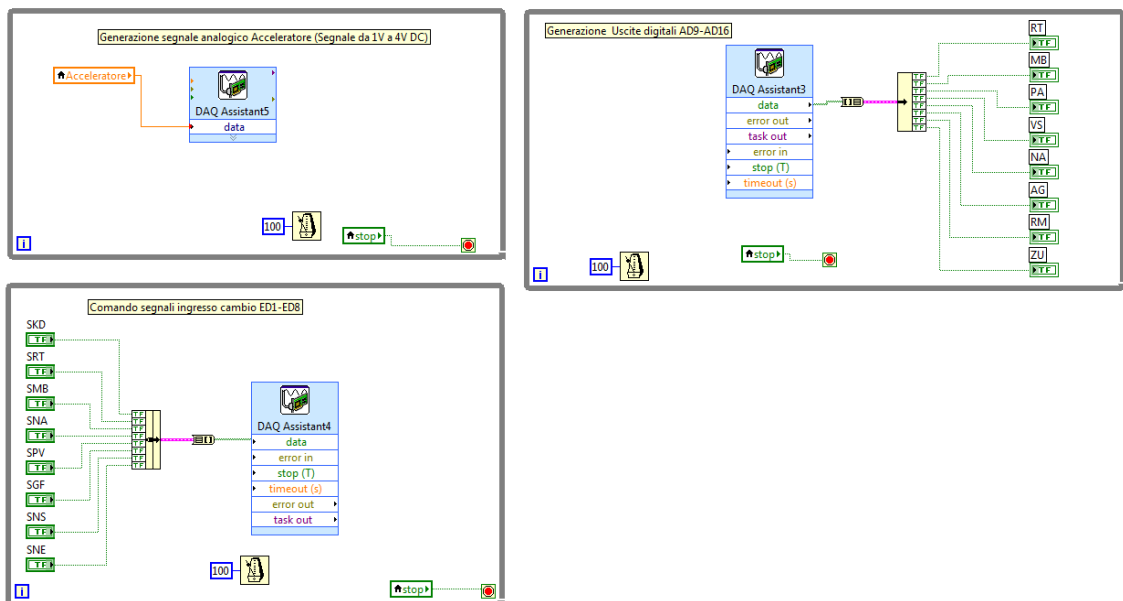


Figura 35: Acquisizione e generazione dei segnali digitali e analogici.

# Rilevazioni termografiche sulla centralina



Figura 36: Banco di lavoro.

## Scopo

Poiché non sono risultate disponibili centraline guaste, ma solo centraline funzionanti, si sono effettuate delle rilevazioni di immagini termiche su queste ultime, sottoposte dal simulatore LabVIEW a diverse condizioni di ingresso/uscita. Lo scopo di queste rilevazioni è collezionare informazioni sul *footprint* termico della centralina funzionante, individuando in maniera più precisa possibile sia le zone adibite al condizionamento dei segnali in ingresso, sia le zone dei driver che pilotano le uscite. Questi dati saranno poi utilizzati quando occorrerà riparare una centralina dello stesso tipo, a quel punto se ne osserverà il *footprint* termico nelle stesse condizioni, e per confronto con le immagini raccolte si cercherà di individuare il guasto, fornendo così un primo strumento di analisi alla riparazione.

## Misure termografiche

La termocamera utilizzata è una FLIR T425 con risoluzione di 320x240p.

Il set-up di misura è il seguente: la centralina è posizionata sotto alla termocamera che è agganciata ad un supporto metallico, il quale può scorrere lungo un'asta graduata (vedi Figura 36). La centralina e la termocamera sono state posizionate dentro ad un contenitore, foderato di stoffa nera per evitare riflessioni esterne.

Le misure sono state eseguite a distanza di almeno 10 minuti le une dalle altre ed eseguendo almeno 30 misure ripetute, andando poi a mediare per ottenere l'immagine termografica corrispondente a ciascuno stato, allo scopo di filtrare il rumore.

### Variazione degli ingressi in centralina:

Di seguito si riportano le misure eseguite attivando singolarmente ogni ingresso in centralina e visualizzando la differenza tra ingresso presente e ingresso assente.

La condizione ingresso assente verrà chiamata nel seguito centralina in N, siccome in questo stato non è presente nessun ingresso in centralina, quindi tale configurazione si ottiene semplicemente alimentando la centralina.

La rilevazione termica relativa alla centralina in configurazione in N è stata eseguita inizialmente, e questa verrà usata nel seguito per effettuare la differenza tra ingresso presente ed assente.

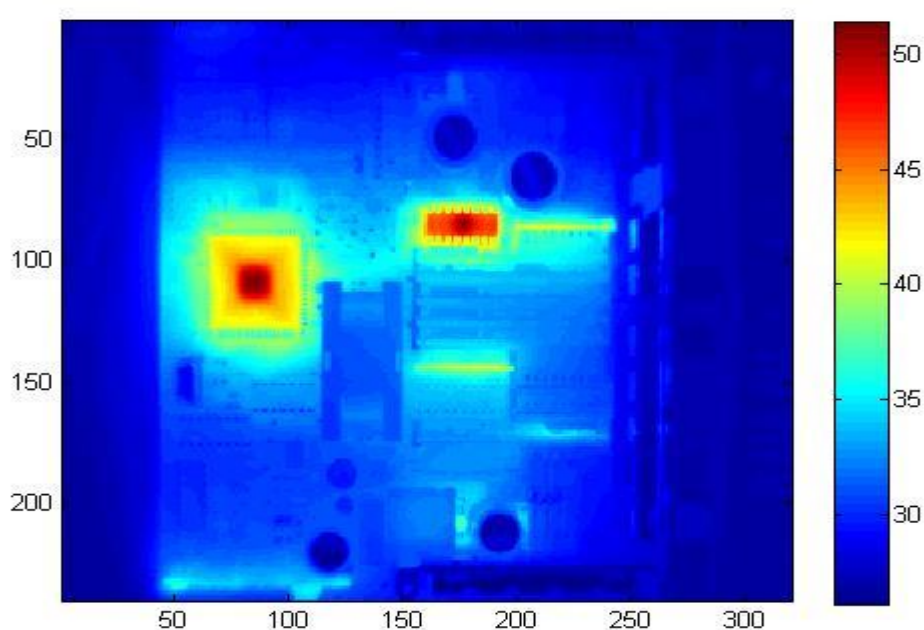


Figura 37: Centralina in N.

## Ingresso in centralina SNE

Il segnale SNE è un segnale digitale a 24 V in ingresso alla centralina. Di seguito si va a riportare il termogramma della centralina con ingresso SNE attivo ( Figura 38) e si farà la differenza con l'immagine termica relativa alla centralina con ingresso SNE disattivato (Figura 37).

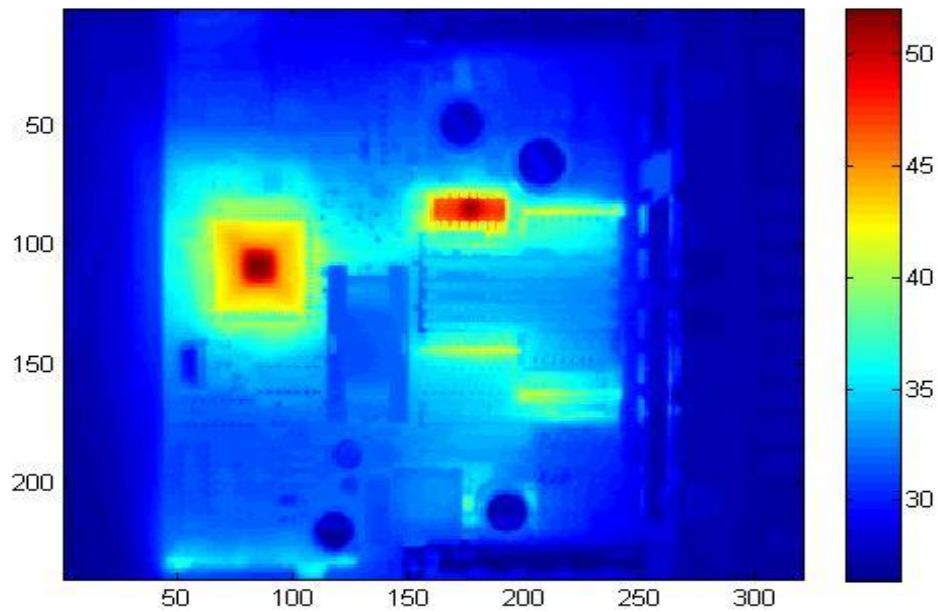


Figura 38: Centralina in SNE.

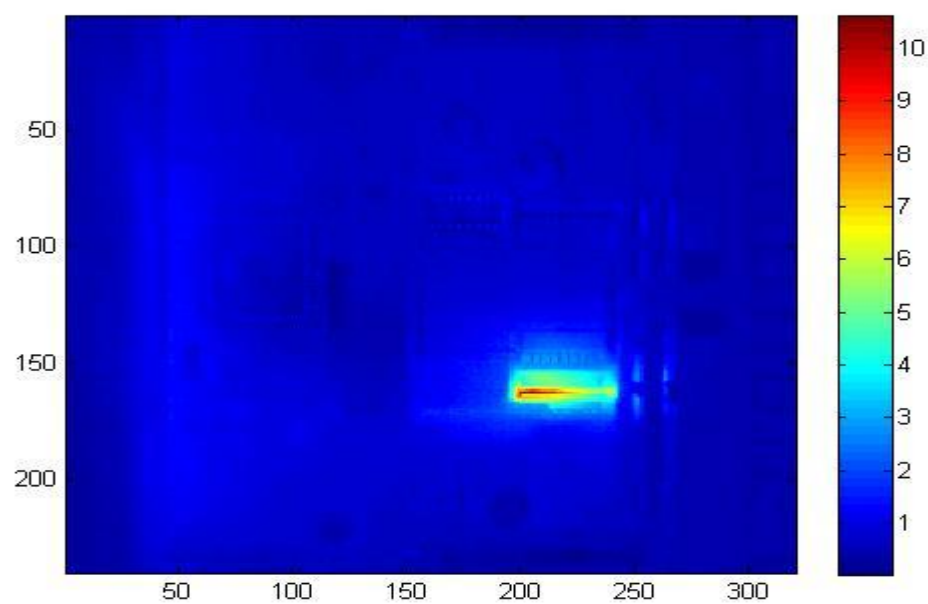
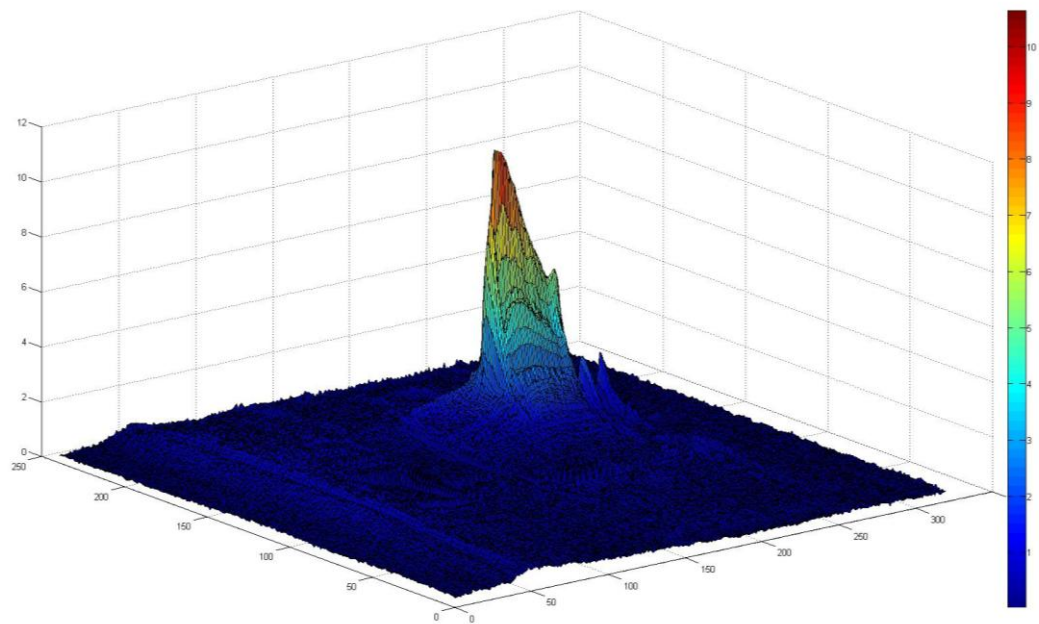


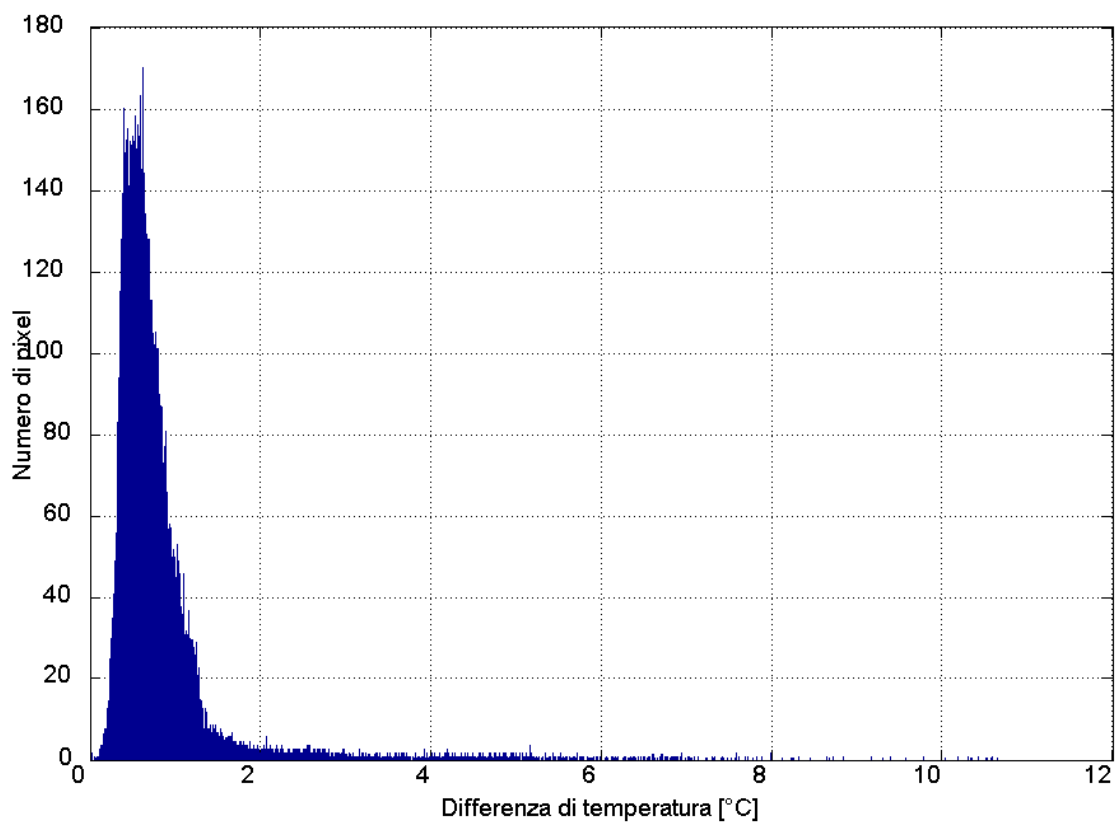
Figura 39: Differenza centralina in SNE – centralina in N.





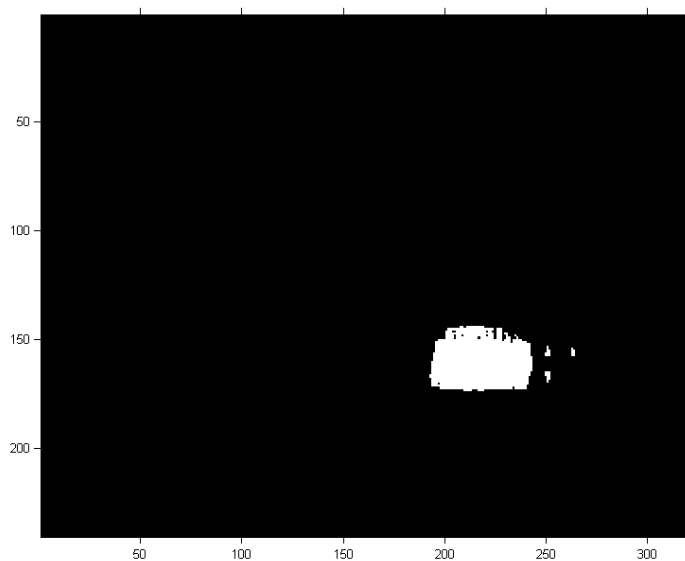
*Figura 40: Differenza centralina in SNE – centralina in N \_ 2.*

Come si vede nella Figura 40 vi è una differenza marcata nella dissipazione specialmente in un'area, la quale probabilmente è adibita al condizionamento di quel segnale.



*Figura 41: Istogramma della differenza SNE-N*

Come esempio di elaborazione dell'immagine, applicabile nello sviluppo futuro del lavoro, si presenta una binarizzazione dell'immagine, con calcolo della soglia con il metodo di Otsu (utilizzando il metodo di Otsu si ottiene una soglia 2.311°C).



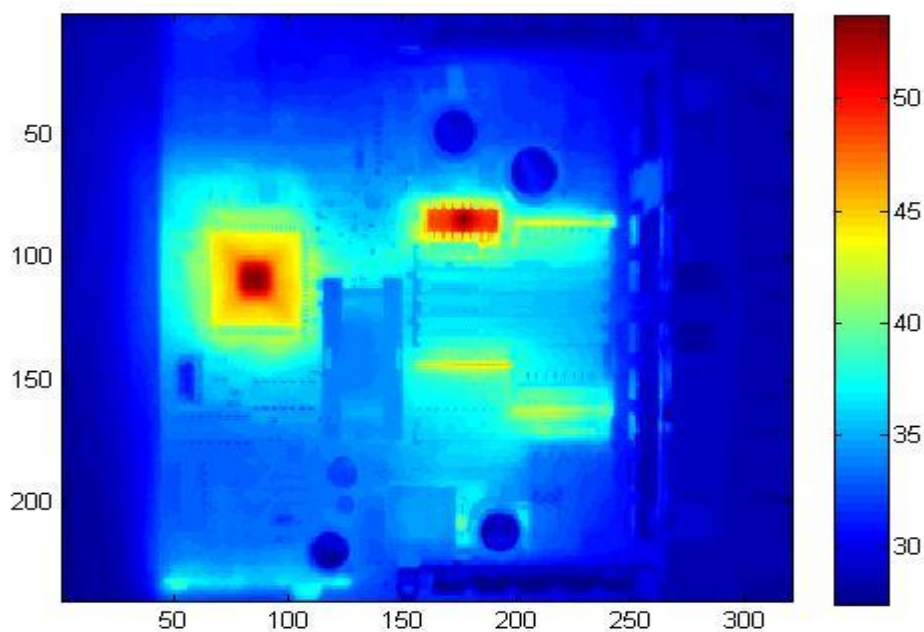
*Figura 42: Binarizzazione della differenze SNE – N con soglia di Otsu.*



Si vede chiaramente la regione di interesse, evidenziata dalla binarizzazione, nella quale vi è una scheda verticale con alcune resistenze.

### Ingresso in centralina SGF

Il segnale SGF, segnale di liberazione marcia, è un segnale digitale a 24V in ingresso alla centralina. Di seguito andremo a riportare l'immagine termica corrispondente alla centralina con ingresso SGF attivo (Figura 43), e si riporterà la differenza con l'immagine della centralina in N (Figura 37).



*Figura 43: Centralina con ingresso SGF.*

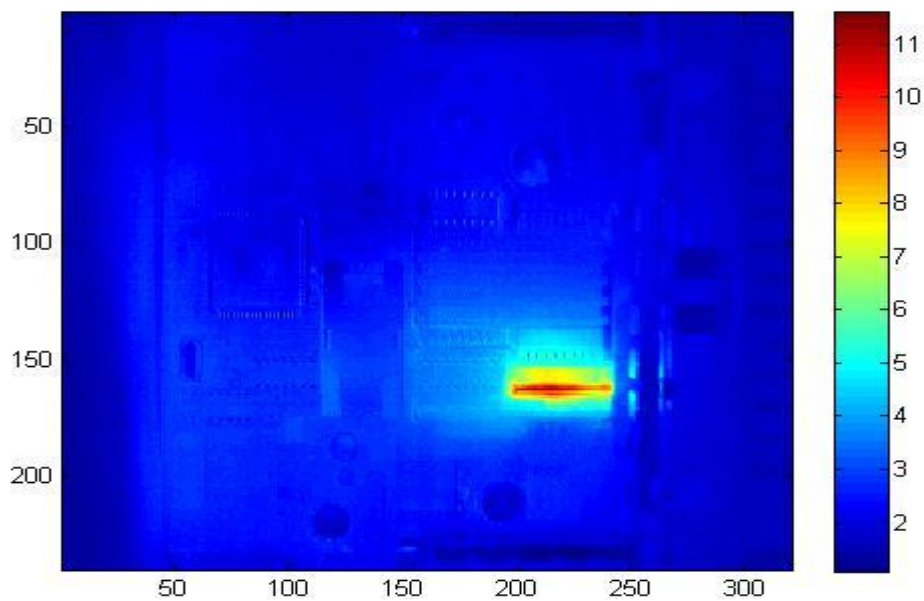


Figura 44: Differenza centralina in SGF – centralina in N.

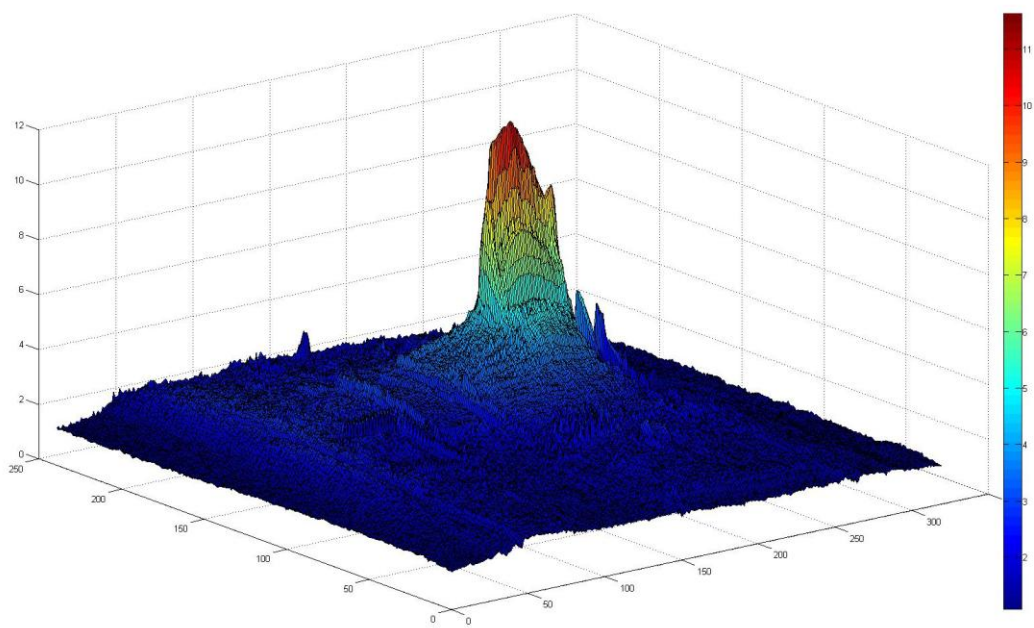
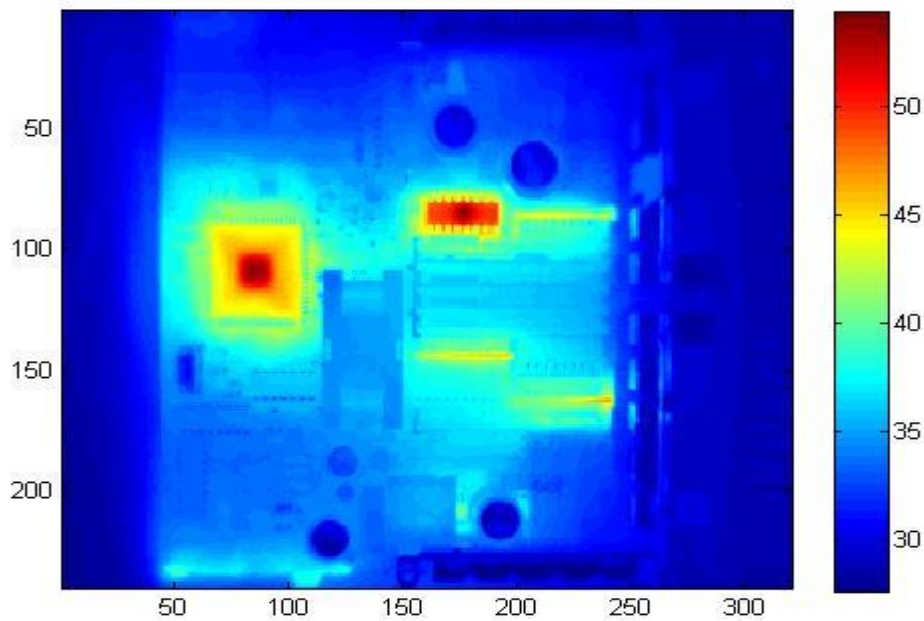


Figura 45: Differenza centralina in SGF – centralina in N\_2.

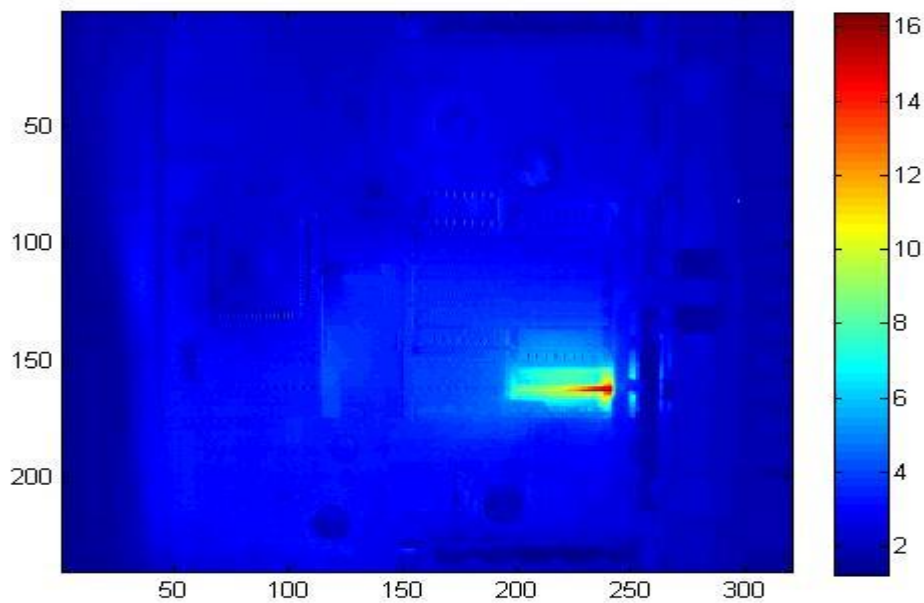
Anche in questa immagine si evidenzia un aumento di temperatura nella stessa scheda contenente la rete di resistori che era coinvolta nel condizionamento del segnale SNE, nel caso dell'ingresso SGF però, il picco di differenza è più localizzato al centro della scheda, mentre nel caso dell'SNE era localizzato a sinistra.

## Ingresso in centralina SKD

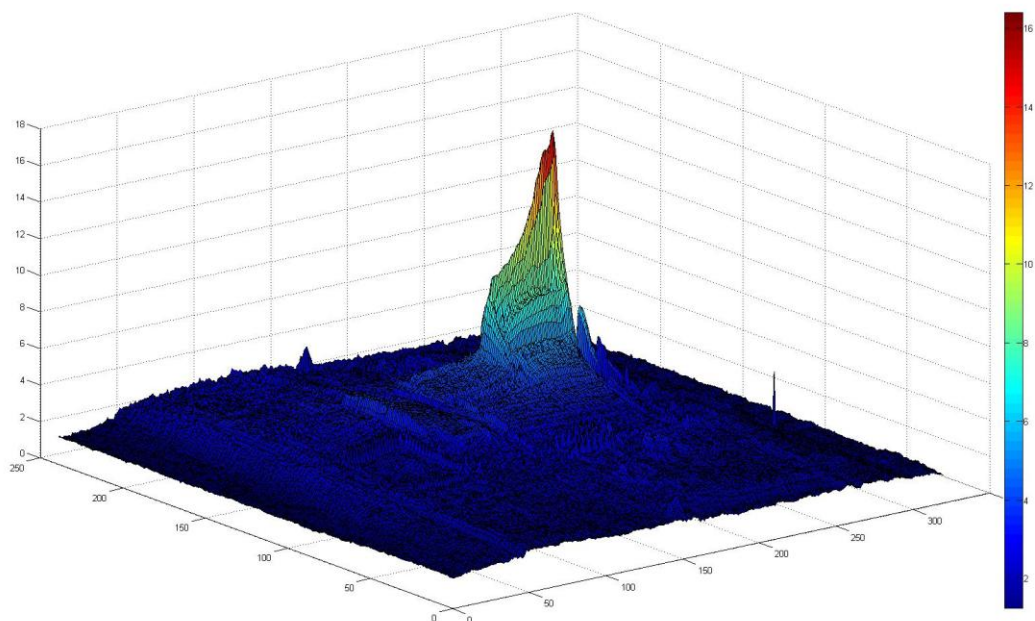
L'ingresso SKD, ingresso inserimento *kick down*, è anch'esso un segnale digitale a 24V. Di seguito andremo a riportare l'immagine termica corrispondente alla centralina con ingresso SKD attivo (Figura 46), e si riporterà la differenza con l'immagine della centralina in N (Figura 37).



*Figura 46: Centralina con ingresso SKD.*



*Figura 47: Differenza centralina in SKD – centralina in N.*

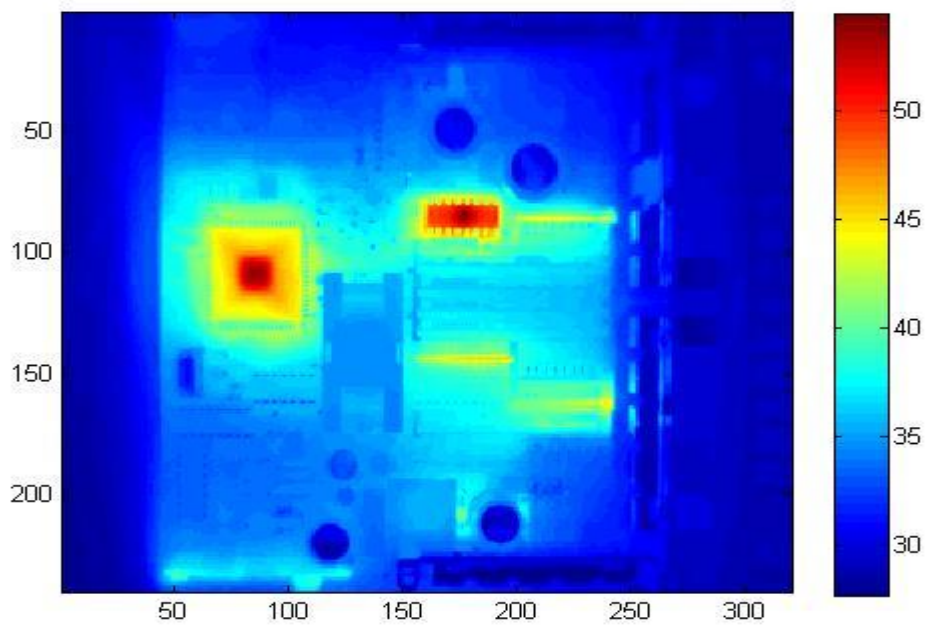


*Figura 48: Differenza SKD – N \_ 2.*

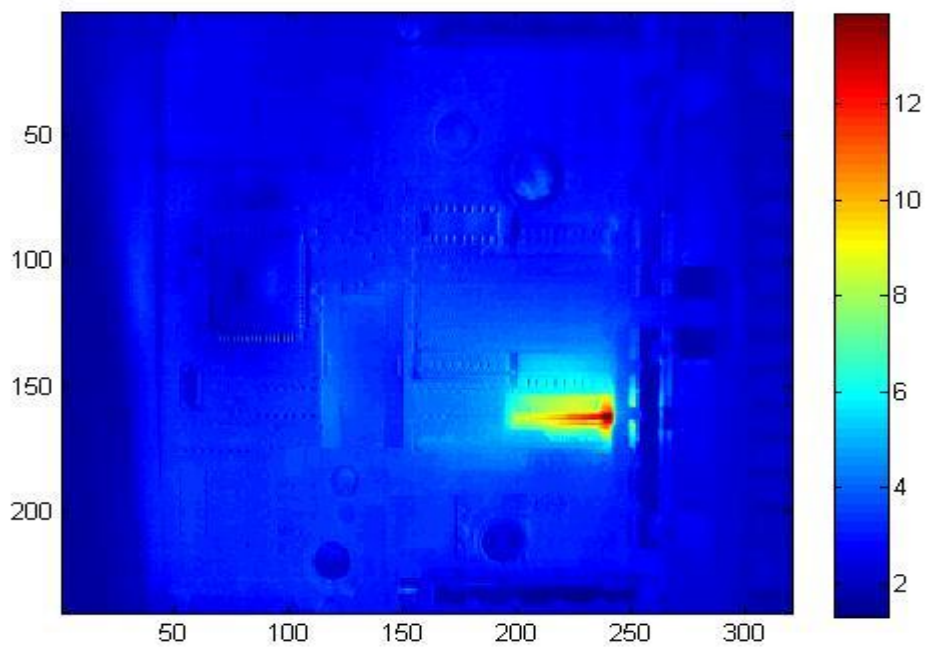
L'immagine termica differenza segue lo stesso andamento dei precedenti ingressi SNE ed SGF. La scheda coinvolta è sempre la stessa contenente la rete resistiva, in questo caso però la zona della scheda in cui si ha la differenza massima è spostata più a destra rispetto alle zone degli ingressi precedenti.

### Ingresso in centralina SRT

L'ingresso SRT, ingresso inserimento rallentatore, è anch'esso un segnale digitale a 24V. Di seguito andremo a riportare l'immagine termica corrispondente alla centralina con ingresso SRT attivo (Figura 49), e si riporterà la differenza con l'immagine della centralina in N (Figura 37).

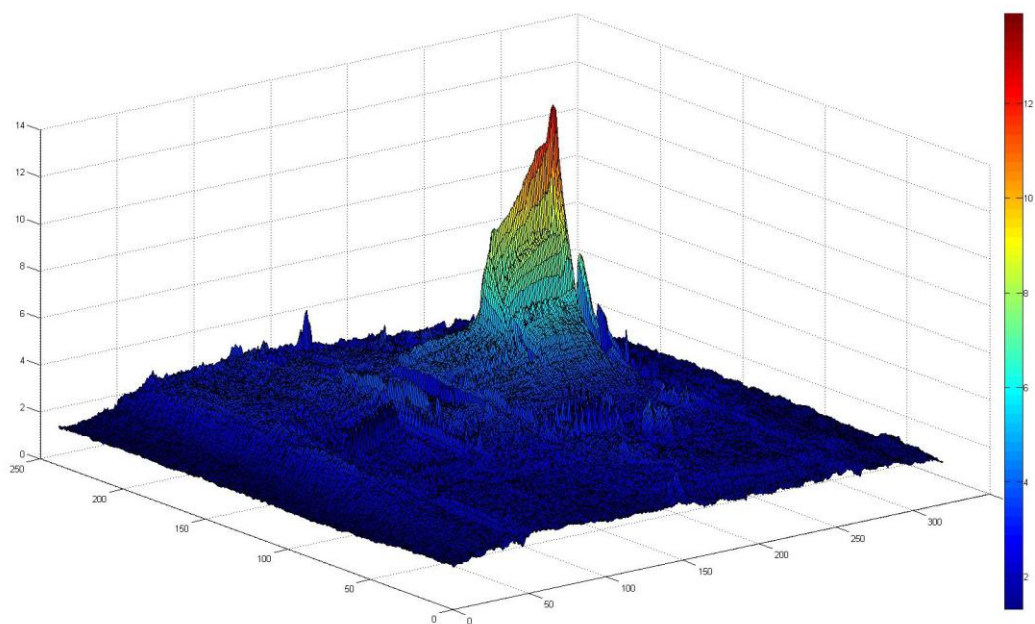


*Figura 49: Centralina con ingresso SRT.*



*Figura 50: Differenza centralina in SRT– centralina in N.*





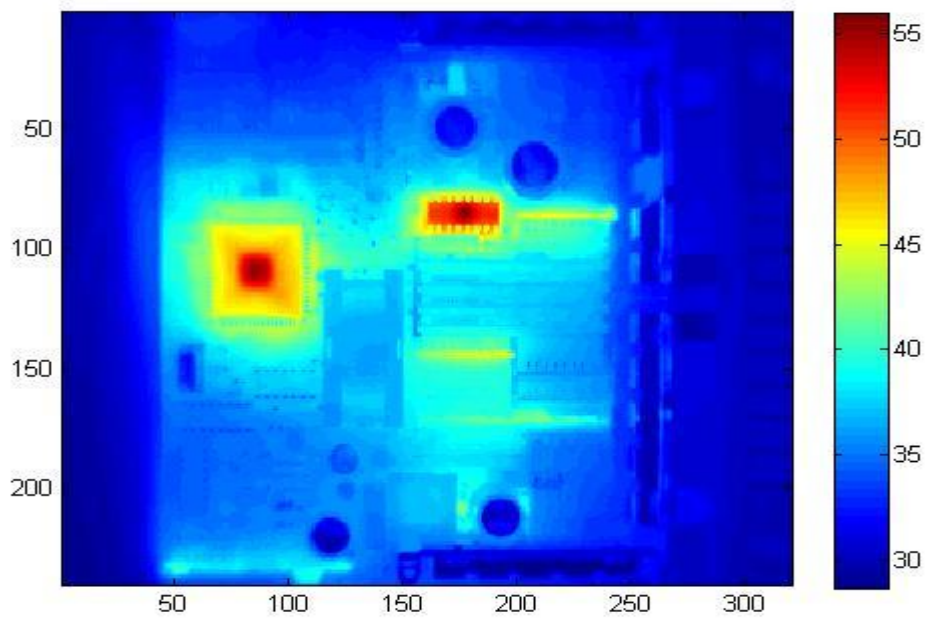
*Figura 51: Differenza centralina in SRT– centralina in N \_ 2.*

Anche nel caso dell'ingresso SRT, la scheda coinvolta è la stessa dei precedenti ingressi, e la zona con differenza di temperatura massima anche qui è spostata verso destra.

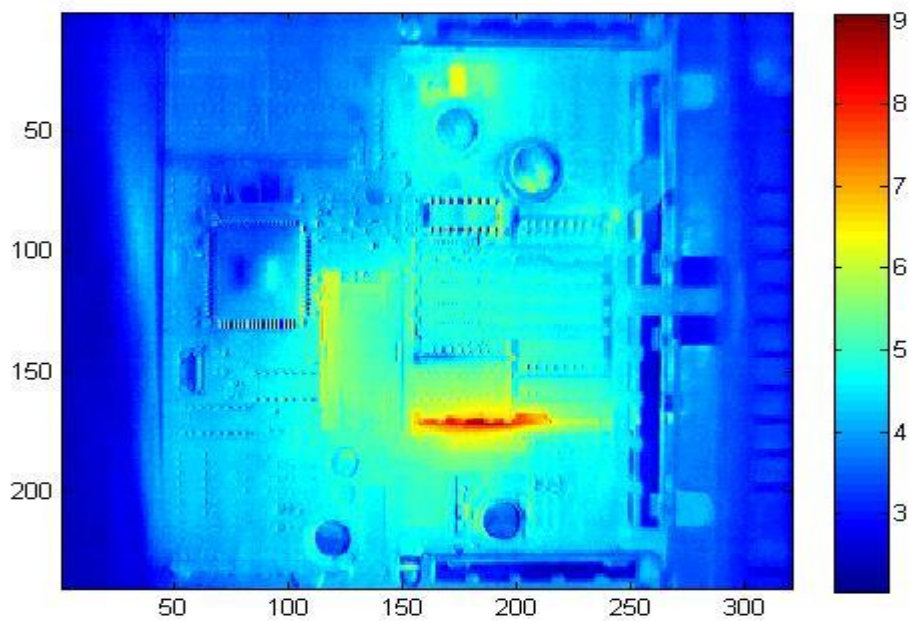
In conclusione, come già accennato precedentemente, la zona coinvolta al condizionamento dei segnali SNE, SGF, SKD e SRT, è una scheda contenente una rete resistiva, che ha il compito di trasformare i segnali da 24V a 5V.

### Ingresso in centralina acceleratore

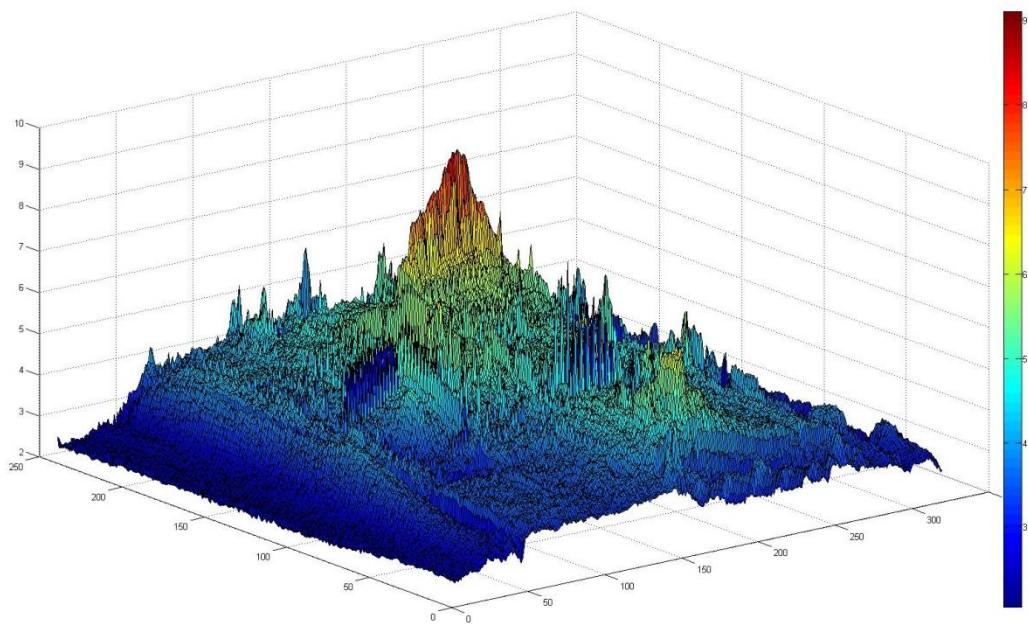
Il segnale acceleratore è un segnale analogico da 0 a 4V in ingresso alla centralina. Di seguito andremo a riportare l'immagine termica corrispondente alla centralina con ingresso acceleratore al 100%, 4V (Figura 52), e si riporterà la differenza con l'immagine della centralina in N, in cui l'ingresso acceleratore è 0%, 1V (Figura 37).



*Figura 52: Centralina con ingresso Acceleratore 100%.*



*Figura 53: Differenza centralina con acceleratore 100% - centralina con acceleratore 0%.*

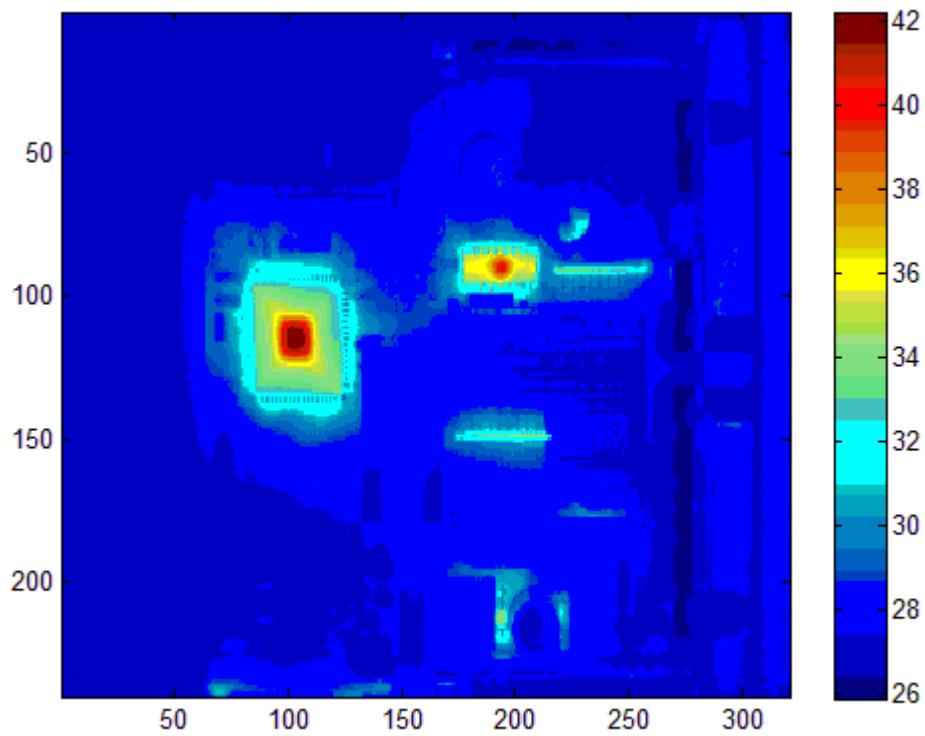


*Figura 54: Differenza centralina con acceleratore 100% - centralina con acceleratore 0% \_ 2.*

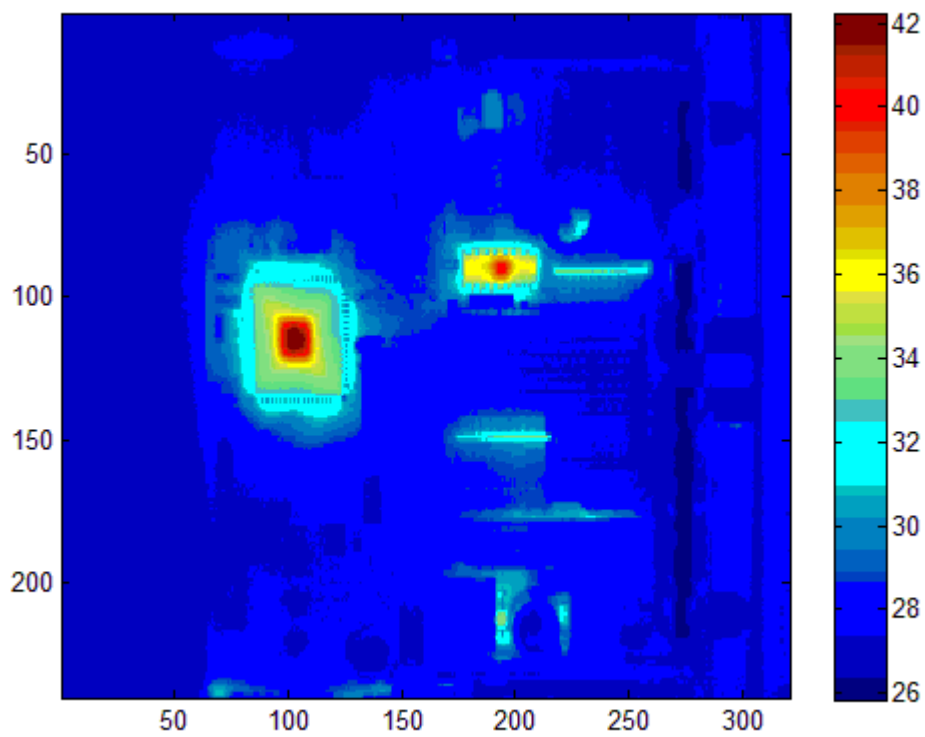
Nel caso dell'ingresso analogico dell'acceleratore, la differenza è meno marcata a confronto con quella degli ingressi digitali. Però è comunque possibile individuare un'area in cui si ha la differenza massima, quest'area è una scheda verticale in cui vi sono inseriti alcuni componenti tra cui transistor, resistenze e un circuito integrato di tipo SMD.

Osservando però le zone esterne alla centralina nella Figura 53, si nota un aumento della temperatura, dovuto al riscaldamento della centralina. Per migliorare questa rilevazione si può far circolare sopra la superficie della centralina un flusso d'aria costante a temperatura ambiente, per evitare il riscaldamento di zone non coinvolte nella dissipazione. Questa tecnica va utilizzata con cautela, siccome in questo modo si diminuisce la temperatura di componenti che già dissipano poco. Di seguito quindi verranno riportate le misure effettuate con un flusso d'aria costante sulla centralina, in particolare ci focalizzeremo sulla differenza tra ingresso acceleratore al 100% (Figura 56) ed ingresso acceleratore 0% (Figura 55) , per riuscire a migliorare l'immagine termica differenza in Figura 53.





*Figura 55: centralina in N con flusso d'aria costante.*



*Figura 56: Centralina con flusso d'aria costante e ingresso acceleratore al 100%.*

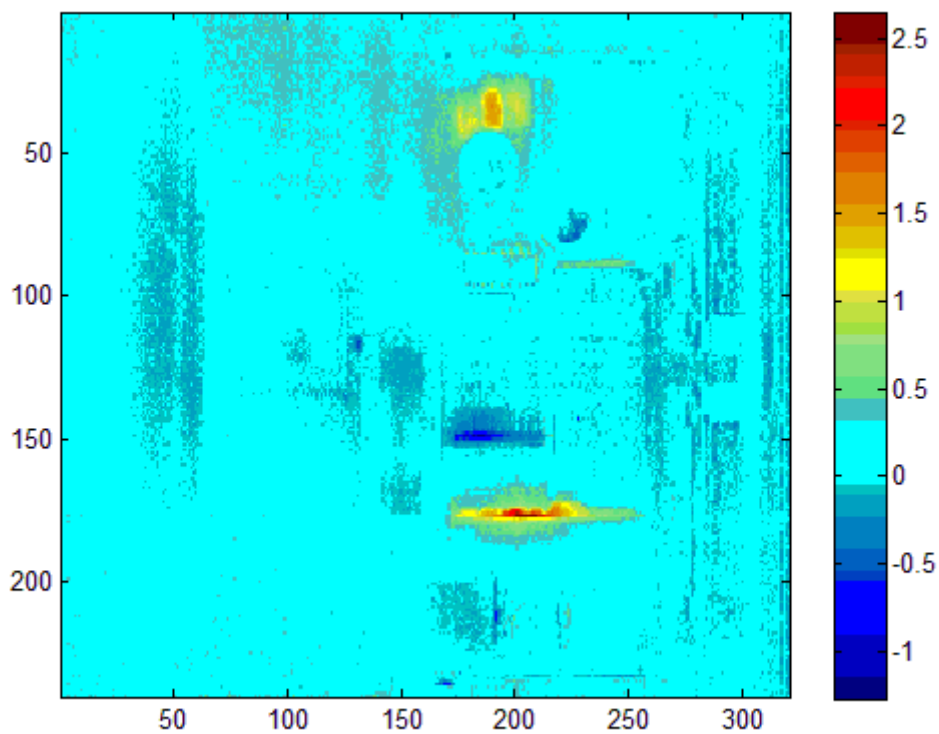


Figura 57: Differenza tra centralina con ingresso acceleratore a 100% e centralina in N con il flusso d'aria.

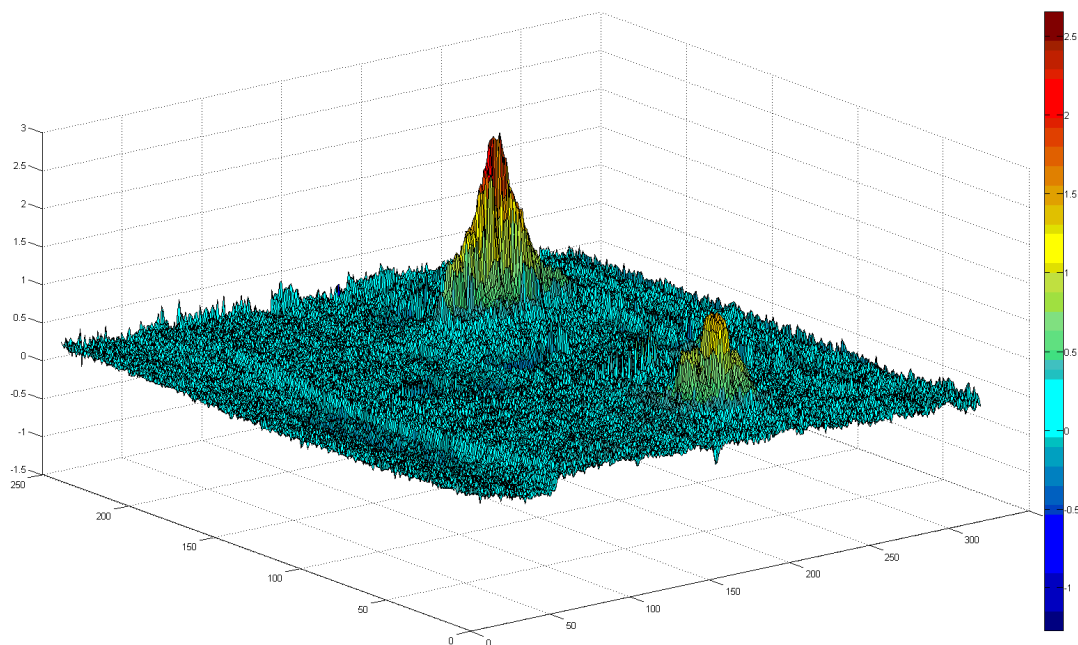


Figura 58: Differenza tra centralina con ingresso acceleratore a 100% e centralina in N con il flusso d'aria costante \_ 2.

Le cose in questo caso sono migliorate, e si evidenzia una differenza nella dissipazione della stessa scheda che era stata individuata in Figura 53. Inoltre un altro componente più difficile da individuare nella rilevazione senza il flusso d'aria è un diodo di potenza.

## Uscite della centralina

In questo caso è stata eseguita la differenza tra le due immagini termiche della centralina in due configurazioni diverse, una con alcune uscite della centralina attive, l'altra configurazione con uscite non attive.

- Configurazione uno: centralina senza elettrovalvole attive, con vari ingressi attivi per permetterle di inserire la marcia (quindi due elettrovalvole), nella configurazione successiva.
- Configurazione due: centralina con prima marcia inserita (transistor che attivano le elettrovalvole A ed F in conduzione) e stessi ingressi attivi.

Siccome la differenza tra le due configurazioni è stata fatta a distanza di 10 minuti non si è evidenziato il problema di riscaldamento della scheda.

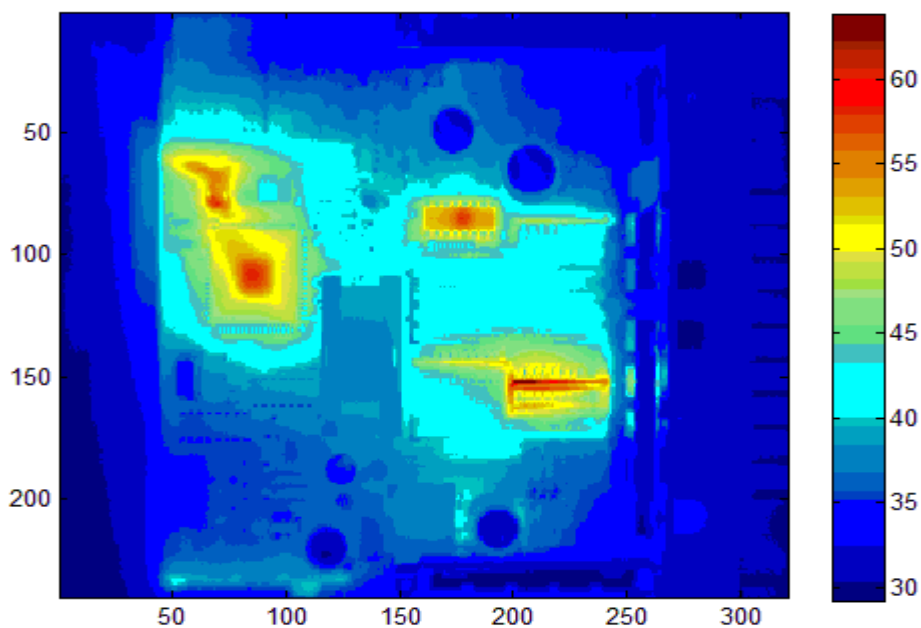


Figura 59: Configurazione uno: Ingressi attivi D, SNE, Generazione segnali di giri.

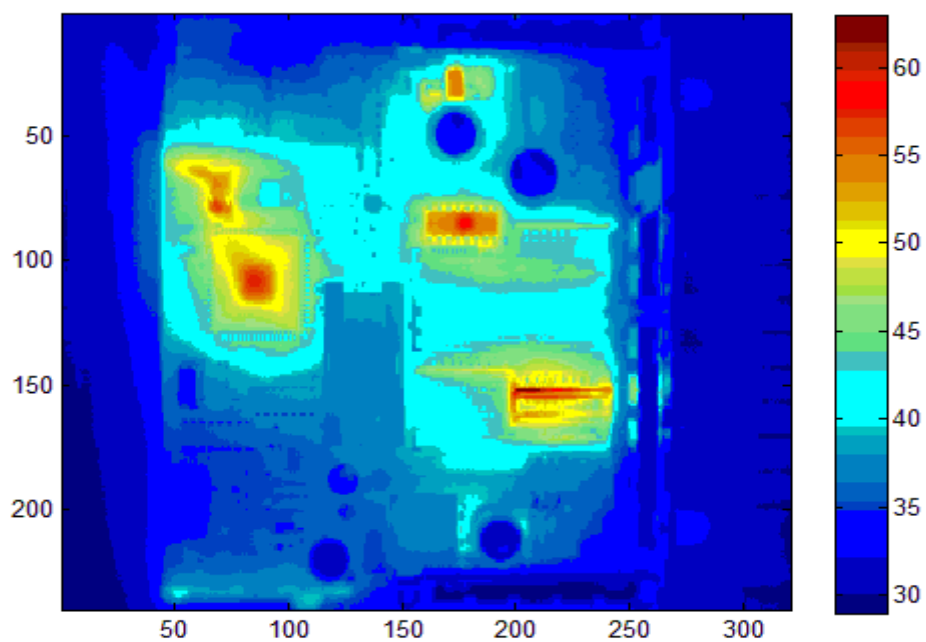


Figura 60: Configurazione due: uscite attive: A,F -- Ingressi attivi D, SNE,  
Generazione segnali di giri.

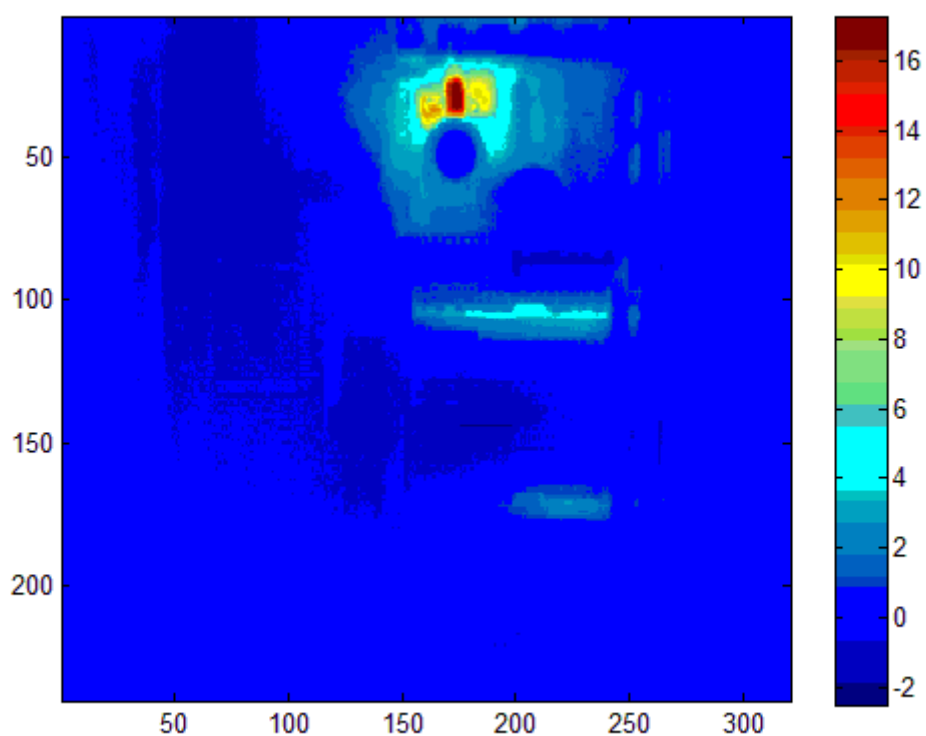
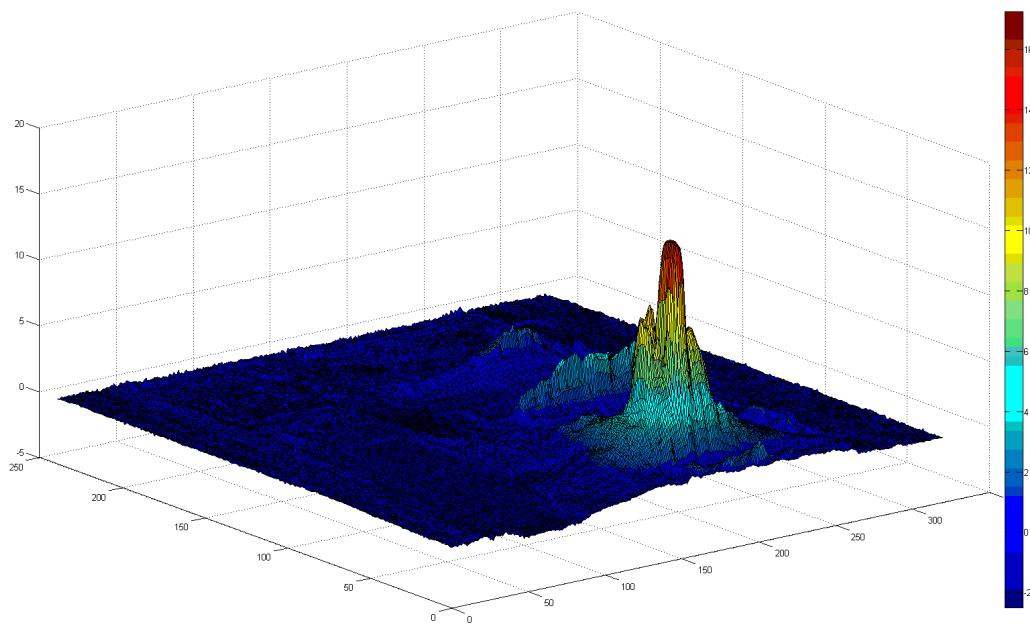
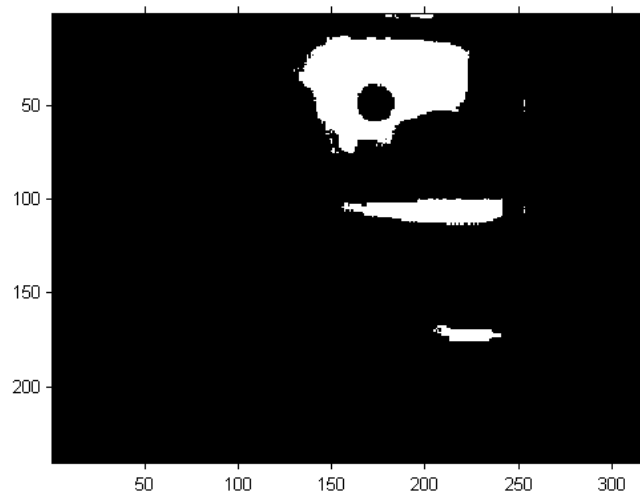


Figura 61: Differenza tra le due configurazioni. Differisco per A e F.



*Figura 62: Differenza tra le due configurazioni sopra. Differisco per A e F\_2.*

In questo caso, non è possibile notare direttamente la variazione di temperatura dei transistor adibiti alla conduzione della corrente nelle uscite A ed F. Questo a causa del fatto che tali transistor sono in questo tipo di centralina avvolti quasi completamente dal dissipatore, questo rende minima la variazione della temperatura sulla superficie immediatamente sopra ai due transistor quando sono accesi (siccome il metallo è un ottimo conduttore di calore). I due transistor sono comunque individuabili o girando la scheda sottosopra, ed osservando il calore delle piste sottostanti che si scaldano per conduzione, oppure inquadrando i transistor di lato, in modo da osservare il package del transistor.



*Figura 63: Binarizzazione dell'immagine differenza in Figura 61.*

Sono comunque individuabili, osservando anche la segmentazione eseguita sempre con il metodo di Otsu (Figura 63), delle zone in cui si ha una differenza marcata: osservando la binarizzazione sopra possiamo notare: una prima zona di differenza, la più ampia, in alto, dovuta alla conduzione di un diodo di potenza messo in serie all'alimentazione dei transistor delle elettrovalvole; una seconda ed una terza zona, rispettivamente più in basso, in cui vi sono due schede verticali con alcuni componenti integrati, adibiti probabilmente al pilotaggio dei transistor di potenza in uscita.

## Conclusioni studio termografico centralina:

Le immagini termografiche e le differenze proposte sopra, sono alcune delle rilevazioni termiche eseguite sulla centralina in diverse condizioni di funzionamento.

Le misure evidenziano che le diverse fasi di funzionamento presentano distribuzioni di temperature caratteristiche distinguibili fra di loro. Comportamenti simili in cui si riesce ad evidenziare altrettanto bene una determinata area della centralina si sono osservati anche con altre configurazioni di ingressi e uscite, come la generazione dei segnali di giri, o l'inserimento di diverse configurazioni del selettore marce.

Finora la riparazione di queste centraline si effettuava mediante analisi visiva e misurazioni di tensione senza l'ausilio di metodologie correttamente definite. Grazie a questo studio il tecnico addetto alla riparazione può cercare differenze nel *footprint* termico della centralina da riparare e, qualora ci fossero, indirizzare le misure di tensione nell'area interessata dalla differenza; in questo modo si ha oltre ad un risparmio notevole di tempo, anche un aumento di probabilità che la centralina venga

riparata, infatti, spesso, se il guasto non era particolarmente evidente la centralina non veniva riparata.

Per potenziare questo metodo di ricerca guasti, un eventuale sviluppo futuro è quello di raccogliere una certa quantità di immagini termiche di centraline non funzionanti, catalogandole in base al tipo di guasto, ottenendo così una serie statisticamente rilevante, le informazioni ottenute potranno essere utilizzate per approfondire le tecniche di indagine sui singoli componenti della scheda nelle diverse fasi di funzionamento.

# Conclusioni

Le immagini termografiche della centralina che sono state raccolte, permetteranno di semplificare la riparazione di centraline dello stesso tipo. Esse potranno essere utilizzate come elementi di paragone, confrontate alle immagini termiche della centralina da riparare. Ovviamente, in questo modo, non si pretende di individuare il guasto in maniera veloce e certa, ma servirà per lo meno ad una prima ispezione ed individuazione dell'area che potrebbe essere interessata dal guasto. E' ragionevole ipotizzare che saranno necessarie tecniche di indagine statistica, una volta disponibili serie di schede danneggiate e funzionanti, per poter procedere ad una classificazione basata su immagini termografiche.

Inoltre, grazie al banco di collaudo LabVIEW realizzato, l'individuazione di eventuali centraline difettose è resa più veloce ed affidabile e, in linea di principio, può essere resa automatica. Infatti, sia generazione dei segnali di controllo che analisi delle immagini sono effettuate mediante controllo software.

In merito all'analisi termografica di una scheda guasta, il cui unico obiettivo sia la riparazione della scheda grazie all'individuazione dei componenti danneggiati possiamo trarre le seguenti conclusioni. Innanzi tutto occorre un'analisi termografica più approfondita di quella proposta nel capitolo precedente, cioè condotta andando ad analizzare i singoli componenti in dettaglio, dettagliatamente nella maniera più accurata possibile; se si nota una differenza notevole in un'area della scheda già ad una prima analisi è possibile procedere per gradi, passando cioè da una analisi termica della scheda in generale, aumentando progressivamente il dettaglio fino ad arrivare al singolo componente.

Detto ciò, non è detto che sia sempre possibile procedere per gradi quando non si hanno elementi per restringere il campo. Occorre allora analizzare componente per componente, e questo può richiedere un tempo rilevante.

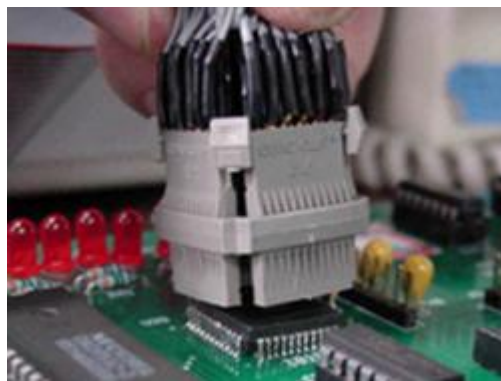
Inoltre conducendo questa analisi non è garantito che si riesca ad individuare il componente guasto, soprattutto in componenti ad alto livello di integrazione come i circuiti integrati. Infatti, come abbiamo visto nella simulazione, se il guasto interessa un dispositivo di potenza all'interno del chip, è per lo meno teoricamente individuabile una variazione di temperatura nel package, anche se, dipendentemente dal tipo di guasto e dall'area del dispositivo, essa può essere anche al limite della sensibilità dello strumento. Tuttavia, se il guasto interessa un dispositivo di segnale, il quale può essere



anche molto più piccolo di un dispositivo di potenza, sicuramente la variazione di temperatura causata è al di sotto della sensibilità dello strumento, e il guasto non può essere rilevato, nemmeno in linea di principio.

Per questo motivo, se l'obiettivo è la ricerca di componenti guasti in schede elettroniche di cui non si dispongono di molte informazioni inerenti allo schema elettrico, così come se non è possibile effettuare uno studio termico statistico su serie numerose di campioni, cioè non ci sia la possibilità di analizzare la risposta termica di una serie di centraline a diversi tipi di guasto già classificati, e l'unica possibilità è quella di analizzare una singola scheda funzionante, una proposta che potrebbe compensare parzialmente la mancanza di informazioni potrebbe essere quella di allestire un sistema combinato di rilevazioni termiche con misure di tensione.

In questo modo si potrebbe utilizzare la termografia per fare una prima analisi generale e per controllare i componenti discreti nei quali l'analisi termica è più affidabile, mentre sarebbe tediosa complessa e lunga, a causa dell'elevato numero, una misurazione di tensione, lasciando l'analisi dei componenti integrati, dove la termografia è più problematica a causa dell'elevata integrazione, alle misurazioni di tensione, le quali possono essere implementate in maniera veloce tramite apposite test clip.



*Figura 64: Esempio Test Clip per SOIC SMD [9].*

# Bibliografia

- [1] Wikipedia. [Online]. Available:  
[http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:EM\\_Spectrum\\_Properties\\_it.svg&page=1](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=File:EM_Spectrum_Properties_it.svg&page=1).
- [2] Wikipedia. [Online]. Available: <http://it.wikipedia.org/wiki/File:Blackbody.svg>.
- [3] U. A. document. [Online].
- [4] Wikipedia. [Online]. Available:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:SilverSulfideWhiskers1.jpg>.
- [5] 3. E. Ragnar Holm (1958, Electric Contact Handbook. Springer-Verlag, Berlin/Gottingen/Heidelberg. pp331-342.
- [6] 2. "Lab Note#105 Contact Life - Unsupressed vs. Suppressed Arcing" Arc Suppressed Technologies. August 2011. Retrieved March 10.
- [7] A. I. H. C. 1. p. 9. I. 0.-8.-2.-1. Electronic Materials Handbook: Packaging By Merrill L. Minges.
- [8] electronics-cooling. [Online]. Available: [www.electronics-cooling.com](http://www.electronics-cooling.com).
- [9] Indiana mart, [Online]. Available: <http://www.indiamart.com/qmax-test-pvtltd/products.html>.