



1506
**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI URBINO
CARLO BO**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI URBINO CARLO BO



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria per la Sostenibilità
Industriale

**Progettazione, simulazione termica e validazione
sperimentale di un supporto alettato ottimizzato per
sistemi di visione industriali**

**Design, thermal simulation, and experimental validation
of an optimized finned support for industrial vision
systems**

Relatore:

Chiar.mo Prof. Nicola Paone

Tesi di Laurea di:

Maria Azzurra Principi

Anno Accademico 2025/2026

Indice

Introduzione

1. Analisi tecnologica e inquadramento teorico	
1.1 Sistemi di visione artificiale	5
1.2 La problematica termica dell'elettronica	7
1.3 Fondamenti di trasmissione del calore	8
1.3.1 La conduzione	8
1.3.2 La convezione naturale	9
1.3.3 Il funzionamento delle superfici alettate	9
1.3.4 Parametri adimensionali e ottimizzazione delle alette	10
1.4 Dal modello teorico alla definizione del progetto	12
2. Analisi sperimentale e mappatura termica	
2.1 Metodologia di indagine termografica.....	12
2.1.1 Il problema dell'emissività dell'alluminio e calibrazione con nastro isolante.....	13
2.2 Analisi comparativa dello stato termico: telecamera isolata e accoppiamento attuale	14
2.2.1 Transitorio termico della telecamera isolata	14
2.2.2 Analisi dell'interazione termica con il supporto esistente	15
2.3 Sviluppo di un tool in Python per l'analisi dei dati termografici.....	16
2.3.1 Analisi della curva di riscaldamento sperimentale	18
3. Progettazione del supporto ideale	
3.1 Obiettivi del design e vincoli del sistema	18
3.2 Selezione del materiale	19
3.3 Calcoli di dimensionamento	20
3.3.1 Definizione geometrica del corpo d'alloggiamento della telecamera e delle aree di contatto	20
3.3.2 Dimensionamento locale per singola faccia	21
3.4 Modellazione CAD	25
3.5 Simulazione termica ad elementi finiti e validazione dei risultati	26
3.5.1 Condizioni al contorno	26
3.5.2 Analisi dei risultati	27
4. Realizzazione del supporto reale	
4.1 La scelta dei componenti	28
4.1.1 Il dissipatore di calore	28
4.1.2 La base cilindrica del supporto	29
4.2 Ciclo di lavorazione meccanica e fasi di assemblaggio del prototipo	30
4.3 Discrepanze tra modello CAD nominale e prototipo reale	32

5. Validazione sperimentale tramite rilievo termografico	
5.1 Obiettivi della campagna sperimentale.....	34
5.2 Strumentazione di misura e configurazione del test	34
5.3 Analisi termica del supporto alettato.....	35
5.3.1 Confronto tra modello FEM e rilievo sperimentale	35
5.3.2 Risultati sperimentali e discussione	36
6. Conclusioni e sviluppi futuri	
7. Bibliografia	
Sistemi di visione, termografia e illuminazione industriale	40
Fondamenti di scambio termico e formule di dimensionamento	40
Ricerche sulla dissipazione passiva e componenti hardware.....	40
Immagini	40
Appendice A: Codice sorgente in Python per l'analisi termografica	

Introduzione

L'industria odierna è basata sempre di più sull'automazione e una delle conseguenze di ciò è l'aumento dell'utilizzo di sistemi di visione artificiale, diventati dei pilastri fondamentali per:

- Garantire il controllo di qualità e il monitoraggio del processo: rilevano tempestivamente difetti estetici o anomalie funzionali nei prodotti.
- Automatizzare la tracciabilità: gestiscono la lettura di codici per una logistica senza errori.
- Effettuare misurazioni di precisione: calcolano dimensioni, distanze e tolleranze con un'elevata accuratezza. ^[1]

Quando si parla sistemi di visione artificiale si deve necessariamente parlare anche di illuminatori e telecamere ad alta risoluzione. Tuttavia, questo tipo di telecamere per via delle piccole dimensioni che le caratterizzano e l'intenso lavoro svolto dal processore comportano criticità termiche non trascurabili.

Nel caso specifico trattato in questa tesi il gruppo camera Teledyne DALSA Genie Nano (mostrata nella Figura I.1) integrata in un illuminatore a cupola IMAGESS serie BMT-BIDL presso il laboratorio di Misure dell'Università Politecnica delle Marche è soggetta ad un significativo surriscaldamento. Il supporto che attualmente tiene il tutto insieme, per via del design e del materiale di cui è composto, non garantisce una dissipazione termica adeguata.



Figura I.1: Teledyne DALSA Genie Nano. ^[12]

Il surriscaldamento influisce negativamente sulle prestazioni delle telecamere industriali causando vari problemi come:

- Deterioramento della qualità dell'immagine per via dell'aumento del rumore.
- Malfunzionamenti e instabilità operativa come spegnimento automatico, disconnessioni della rete e lentezza dei tempi di risposta.
- Danni permanenti ai componenti elettronici e riduzione della vita utile della camera.

Il presente lavoro di tesi è focalizzato quindi sul progettare e produrre un nuovo supporto che permetta la dissipazione del calore della telecamera mediante convezione naturale, utilizzando superfici alettate e materiali ad alta conducibilità termica. Si parla quindi di dissipazione passiva che mira a sottrarre il calore senza l'utilizzo di sistemi di ventilazione forzata per garantire così una maggiore affidabilità e assenza di vibrazioni.

Il lavoro di questa tesi si articola in diverse fasi trattate durante il tirocinio formativo svolto nel laboratorio precedentemente citato. Inizialmente è stata eseguita una mappatura termica con il supporto attuale tramite termocamera ad infrarossi. In seguito, sulla base dei dati raccolti, è stato fatto il dimensionamento delle superfici dissipanti alettate con la successiva modellazione CAD di un prototipo di supporto "ideale" per il raffreddamento della telecamera. La fase successiva si è incentrata sulla realizzazione di un supporto "reale" con parti standard il più simile possibile al prototipo ideato. Infine si è proceduto alla validazione sperimentale dei risultati ottenuti mediante un'ulteriore misurazione.

1. Analisi tecnologica e inquadramento teorico

1.1 Sistemi di visione artificiale

Quando si parla di sistemi di visione artificiale moderni non si parla di una semplice macchina fotografica ma di un complesso ecosistema progettato per operare in ambiente industriale. Il sistema analizzato in questo lavoro si basa sullo standard GigE Vision (la cui architettura è mostrata nella Figura 1.1) che è lo standard mondiale per la trasmissione di immagini e dati di controllo su reti Ethernet ad alta velocità utilizzando componenti standard. Questa tecnologia è stata resa industriale per via di vari vantaggi quali:

- Lunghezza dei cavi: è possibile posizionare la camera a molti metri di distanza dal PC senza perdite di segnale.
- Velocità di trasferimento: permette di inviare grandi quantità di dati al secondo.
- Integrazione: permette di connettere più telecamere alla stessa rete facilmente.

La camera utilizzata in questo caso di studio è una Teledyne Genie Nano, all'interno di questa si trova un sensore di tipo CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor). Il funzionamento di questo sensore può essere riassunto in tre fasi principali:

- Conversione fotoelettrica: il sensore è composto da milioni di piccoli pixel che, una volta colpiti dalla luce, trasformano i fotoni in cariche elettriche.

- Digitalizzazione: le cariche vengono trasformate in numeri dall'elettronica interna della camera, creando così l'immagine digitale.
- Trasmissione: i dati ottenuti vengono "impacchettati" dal processore interno e inviati attraverso il cavo di rete. [3]

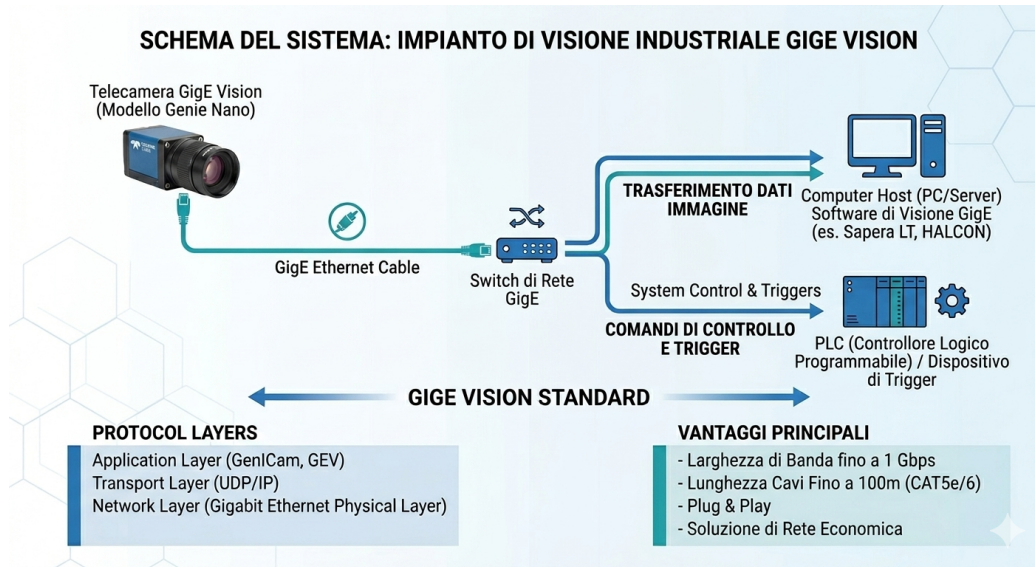


Figura 1.1: Architettura tipica di un sistema di visione industriale basato su standard GigE Vision (Immagine generata tramite intelligenza artificiale Gemini su prompt dell'autore).

In un contesto di automazione, la camera non opera mai da sola, ma è inserita in un assieme meccanico. Nel caso in esame, la camera è accoppiata ad un illuminatore a cupola (dome light). Questo dispositivo è composto da sorgenti LED disposte sulla base della cupola e orientate verso l'alto in modo da non proiettare la luce direttamente sull'oggetto che si vuole analizzare, ma far sì che venga diffusa in ogni direzione possibile dalle pareti interne della cupola, come mostrato nella Figura 1.2, che sono rivestite da materiale bianco opaco altamente diffondente. Al vertice della cupola è situato un foro in cui va inserita la componente ottica della telecamera.

Gli illuminatori a cupola sono frequentemente utilizzati perché agiscono da "cielo nuvoloso", facendo in modo che l'oggetto venga colpito da luce che proviene da ogni angolazione, ciò elimina l'illuminazione direzionale e crea un ambiente luminoso uniforme. Questo tipo di illuminazione è fondamentale quando si devono ispezionare oggetti riflettenti o metallici poiché elimina riflessi diretti e ombre che potrebbero ingannare l'algoritmo di visione.

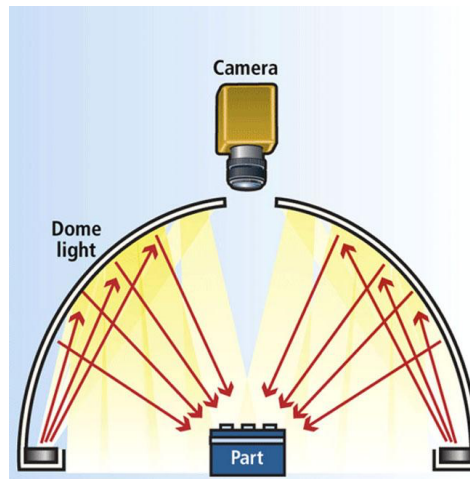


Figura 1.2: Principio di funzionamento e riflessione diffusa in un illuminatore a cupola (Dome Light). [13]

1.2 La problematica termica dell'elettronica

I sistemi di visione sono estremamente efficienti, ma il loro funzionamento interno genera calore che, per non compromettere le prestazioni, deve essere smaltito in qualche modo.

All'interno della Teledyne Genie Nano le principali cause di generazione del calore sono due processi elettronici:

- L'elaborazione dei dati (processore): i chip interni alla camera lavorano intensamente per trasformare ad altissima velocità la luce in segnali digitali. Questo sforzo elettrico genera calore per via dell'effetto Joule.
- La trasmissione GigE: grazie alla tecnologia GigE Vision è possibile inviare grandi quantità di dati. Tuttavia, i componenti che gestiscono la connessione di rete richiedono una potenza costante che causa un significativo incremento della temperatura del corpo macchina.

La generazione di calore non correttamente dissipato provoca un aumento della temperatura che genera vari problemi sia al funzionamento che alla durata della vita della camera. Uno dei fenomeni conseguenti al surriscaldamento è noto come rumore termico. Il sensore della camera è costituito da milioni di pixel che dovrebbero attivarsi solo quando colpiti dalla luce. Quando la temperatura sale troppo, l'energia termica agita gli elettroni all'interno del sensore e questo fa sì che alcuni pixel si attivino da soli, anche in assenza di luce. Per via di questo fenomeno, l'immagine finale è disturbata dal calore e il software, che deve controllare se un pezzo è difettoso, potrebbe incorrere in errori di valutazione.

Oltre alla qualità dell'immagine, il calore eccessivo può causare problemi di stabilità. Infatti, superata la soglia di sicurezza termica, la telecamera può manifestare:

- Lentezza nella risposta o disconnessioni improvvise dalla rete.
- Spegnimenti automatici di sicurezza per evitare di danneggiare i circuiti.
- Riduzione della vita utile, poiché le elevate temperature comportano un'usura più veloce dei componenti elettronici.

Per questi motivi è fondamentale garantire la progettazione di un supporto per la telecamera che assicuri il corretto dissipamento del calore, per far sì che questa rimanga entro i limiti termici stabiliti dal costruttore anche dopo ore di utilizzo. [3][4]

1.3 Fondamenti di trasmissione del calore

Al fine di realizzare un sistema di dissipazione efficace, è necessario analizzare i meccanismi fisici mediante i quali il calore si sposta dalla telecamera all'ambiente esterno. Nel caso in esame, sono rilevanti i fenomeni di conduzione e convezione naturale.

1.3.1 La conduzione

La conduzione termica è uno dei meccanismi di propagazione del calore. Può avvenire all'interno di un corpo o tra diversi corpi a contatto, dalle zone a temperatura maggiore a quelle a temperatura minore. Si basa sull'interazione molecolare che trasferisce energia senza movimento di materia. Nel nostro sistema questo processo permette il trasferimento di calore dalla superficie esterna della telecamera al supporto.

Il fenomeno della conduzione è regolato dalla Legge di Fourier^[6]:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

Dove:

- k è la conducibilità termica del materiale
- A è l'area della superficie a contatto
- ΔT è la differenza di temperatura
- L è lo spessore del materiale

Come si può notare dalla legge, per far passare tanto calore dalla camera al supporto, è fondamentale: la scelta di un materiale che sia un buon conduttore, una buona superficie di contatto e minimizzare lo spessore del supporto.

1.3.2 La convezione naturale

La convezione è un meccanismo di trasmissione del calore nei fluidi tramite lo spostamento macroscopico di materia.

Una volta che il calore è arrivato al supporto, deve essere ceduto all'aria circostante e questo avviene mediante la convezione naturale. Questo è un fenomeno in cui il movimento dell'aria non è generato da ventole ma dalla sola differenza di densità: L'aria più vicina al supporto si scalda e sale verso l'alto richiamando l'aria più fredda dal basso.

Questo scambio è regolato dalla Legge del Raffreddamento di Newton^[6]:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Dove:

- h è il coefficiente di scambio termico.
- A è la superficie a contatto con l'aria.
- T_s è la temperatura della superficie.
- T_∞ è la temperatura ambiente.

Il problema principale della convezione naturale è che il coefficiente di scambio termico è molto basso in quanto l'aria ferma scambia poco calore. L'unica soluzione per riuscire a smaltire una buona quantità di calore allora è quella di aumentare drasticamente l'area della superficie.

1.3.3 Il funzionamento delle superfici alettate

Per aumentare la superficie di scambio termico vengono utilizzare le alette di raffreddamento. Le alette sono componenti fondamentali in ingegneria, utilizzate ovunque vi sia la necessità di potenziare lo scambio termico tra una superficie solida e un fluido. Il loro impiego varia su larga scala, dai tubi negli scambiatori di calore fino alle applicazioni in minuscoli componenti elettronici. Il funzionamento delle alette si basa sull'aggiungere materiale ad una superficie di base, aumentando così l'area totale per lo scambio di calore. Il calore raggiunge l'aletta attraverso la sua base per conduzione e si sposta progressivamente verso la punta, durante questo tragitto l'energia termica viene dissipata verso l'esterno tramite convezione.^[7]

Nella figura 1.3 si può vedere un esempio di superficie alettata.

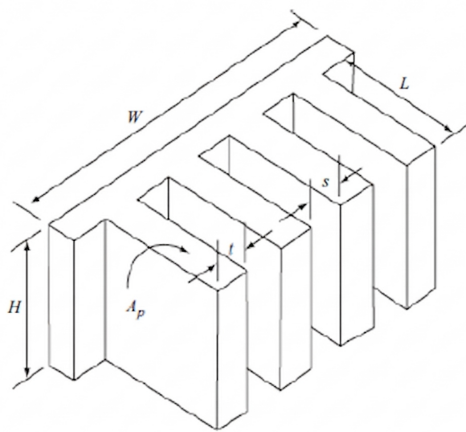


Figura 1.3: nomenclatura superficie alettata (Immagine generata tramite intelligenza artificiale).

1.3.4 Parametri adimensionali e ottimizzazione delle alette

Per il dimensionamento di un dissipatore di calore a convezione naturale, le alette devono essere progettate correttamente. Non è sufficiente aumentare la superficie esterna, ma va tenuto conto anche della fluidodinamica dell'aria tra le alette. Se per esempio le alette sono troppo vicine l'un l'altra, l'aria calda rimane "intrappolata" tra loro e non circola.

Il comportamento del fluido (aria) viene analizzato mediante tre numeri adimensionali fondamentali:

- **Numero di Rayleigh** (Ra)^[6]: esprime il rapporto tra la spinta idrostatica (che fa salire l'aria calda) e le forze viscosse che si oppongono al moto.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot H^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (3)$$

Dove:

- g è l'accelerazione di gravità.
- β è il coefficiente di espansione volumetrico dell'aria.
- H è l'altezza caratteristica, la dimensione verticale della superficie.
- ν è la viscosità cinematica dell'aria.
- α è la diffusività termica dell'aria.
- **Numero di Nusselt** (Nu)^[6]: rappresenta il rapporto tra lo scambio convettivo e quello conduttivo del fluido. Per piastre verticali, si utilizza la correlazione di Churchill-Chu.

$$Nu = \left[0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2 \quad (4)$$

Dove:

- Pr è il numero di Prandtl.
- **Numero di Elenbaas** (El)^[8]: definisce se l'aria riesce a scorrere liberamente tra le alette o se rimane "incastrata" a causa dell'attrito viscoso.

$$El = \frac{\rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot c_p \cdot S^4 \cdot (T_b - T_\infty)}{\mu \cdot k \cdot H} = \frac{S}{H} \cdot Ra_s \quad (5)$$

Dove:

- ρ è la densità dell'aria.
- c_p è il calore specifico a pressione costante.
- S è la spaziatura tra le alette.
- μ è la viscosità dinamica.

Dagli appunti di progetto, si identificano le formule chiave per determinare la geometria "ideale" delle alette:

- **Spaziatura ottima** (S_{opt})^[6]: secondo la relazione di Bar-Cohen e Rohsenow, esiste una distanza ideale tra le alette che massimizza il trasferimento di calore evitando la sovrapposizione degli strati limite:

$$S_{opt} = 2.71 \cdot \left(\frac{H \cdot \nu^2}{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot Pr} \right)^{1/4} \quad (6)$$

- **Efficienza dell'aletta** (η)^[8]: descrive quanto l'aletta sia effettivamente sfruttata rispetto a una condizione ideale, legata al parametro m che combina geometria e conducibilità dell'alluminio:

$$\eta = \frac{\tanh(m \cdot L)}{m \cdot L} \quad (7)$$

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{k \cdot t}} \quad (8)$$

Dove:

- L è la lunghezza dell'aletta.
 - h è il coefficiente di scambio convettivo.
 - t è lo spessore dell'aletta.
- **Spessore ottimo** (t_{opt})^[8]: determinato tramite la relazione di Kern e Kraus per ottimizzare il peso e l'ingombro del supporto.

$$t_{opt} \approx 0.5 \cdot \frac{h \cdot L^2}{k} \quad (9)$$

1.4 Dal modello teorico alla definizione del progetto

In questo capitolo è stata condotta un'analisi che ha permesso di individuare e comprendere le criticità termiche dei sistemi di visione GigE Vision non solo come un limite operativo, ma come un fattore che degrada la qualità del dato di uscita attraverso il rumore termico. La comprensione dei meccanismi di conduzione e convezione naturale, supportata da correlazioni analitiche, fornisce gli strumenti necessari per superare i limiti del supporto attualmente in uso presso il laboratorio.

La teoria necessita però di una solida base sperimentale per essere applicata correttamente. È indispensabile, quindi, conoscere l'effettiva distribuzione delle temperature sulla camera nelle reali condizioni di lavoro. Proprio per questo nel capitolo seguente verrà descritta la fase di mappatura termica effettuata tramite termocamera ad infrarossi. Sulla base dei dati sperimentalmente ottenuti avverrà poi il dimensionamento delle superfici alettate e la successiva modellazione CAD di un prototipo "ideale" del supporto, con l'obiettivo di trasformare le leggi fisiche appena descritte in una soluzione meccanica ottimizzata.

2. Analisi sperimentale e mappatura termica

2.1 Metodologia di indagine termografica

Per comprendere i reali flussi termici tra telecamera e supporto e validare la necessità di progettare uno nuovo, si è optato su un'analisi sperimentale basata sulla termografia a infrarossi (IR). Questa è una tecnica di misurazione senza contatto che permette di misurare l'energia radiante emessa da un corpo nella banda dello spettro elettromagnetico dell'infrarosso e di convertirla in una mappa di temperature bidimensionale (termogramma).

Il principio fisico su cui si basa il funzionamento di una termocamera è la Legge di Stefan-Boltzmann, la quale stabilisce che la radiazione totale di un corpo nero è proporzionale alla sua temperatura assoluta elevata alla quarta potenza:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (10)$$

Dove:

- E è l'energia emessa per unità di superficie e di tempo (potenza specifica).
- σ è la costante di Stefan-Boltzmann.

Tuttavia, i corpi reali non sono corpi neri ideali. Proprio per questo, quando si vuole misurare la temperatura reale di un oggetto, la termocamera deve tenere conto dell'emissività (ϵ), un parametro adimensionale compreso tra 0 e 1 che esprime la capacità di un materiale reale di irradiare energia rispetto al corpo nero.

2.1.1 Il problema dell'emissività dell'alluminio e calibrazione con nastro isolante

L'ostacolo principale incontrato durante i test in laboratorio è stato rappresentato dal case della telecamera Genie Nano, realizzato in lega in alluminio. Questo tipo di materiale non trattato o parzialmente lucido presenta un'emissività molto bassa e fortemente variabile, che risente dei riflessi ambientali circostanti. Misurare direttamente la superficie metallica avrebbe portato ad un errore sistematico grossolano, sottostimando la temperatura reale.

Per rimediare a questo problema, sul case della fotocamera sono stati applicati dei piccoli tasselli di nastro adesivo nero come mostrato nella figura 2.1. Questo nastro di tipo opaco ha un'emissività nota, molto stabile e vicina a quella del corpo nero ideale, pari a circa il 93% ($\epsilon = 0.93$).



Figura 2.1: Applicazione del nastro isolante nero per la correzione dell'errore di emissività.

Nel software di analisi utilizzato (IRSOFT), è stata impostata l'emissività corretta ($\epsilon = 0.93$). Il confronto diretto tra la temperatura misurata sul nastro e quella misurata sull'alluminio nudo ha evidenziato uno scostamento di circa $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, confermando che l'uso del nastro ha permesso di azzerare l'errore di riflessione, garantendo l'accuratezza scientifica del dato memorizzato.

2.2 Analisi comparativa dello stato termico: telecamera isolata e accoppiamento attuale

La campagna di misurazione in laboratorio è stata divisa in due sessioni distinte: la prima incentrata sul comportamento termico della telecamera isolata, la seconda sull'interazione termica tra la telecamera e il suo alloggiamento meccanico attuale.

Questa divisione in due fasi distinte è stata definita per comprendere l'esatta dinamica di surriscaldamento della telecamera e per vedere se il riscaldamento della camera era uniforme o meno.

Infatti era fondamentale, per poter poi progettare un nuovo sistema di dissipazione, mappare la distribuzione spaziale e temporale del calore sul case in alluminio. Questo ha permesso di verificare se vi fossero zone critiche destinate a raggiungere temperature più elevate, i così detti “hotspot”, ad esempio in corrispondenza del sensore CMOS o del processore d'immagine interno; o se il flusso termico si distribuisse in modo omogeneo, indirizzando così la scelta della geometria ottimale per il futuro supporto.

2.2.1 Transitorio termico della telecamera isolata

La telecamera è stata posizionata su una superficie piana in condizioni di funzionamento continuo (figure 2.2 e 2.3). Questo test è servito a determinare la curva di riscaldamento normale del componente, dovuto solo all'inefficienza dei chip elettronici interni e del sensore CMOS.



Figura 2.2: Test 1 con telecamera isolata



Figura 2.3: Termogramma della camera

L'acquisizione dei dati è stata divisa in due slot temporali:

- Primi 15 minuti: la telecamera ha subito un gradiente termico iniziale molto rapido. Partendo da una temperatura iniziale di circa 20 °C (temperatura ambiente), il case ha raggiunto i 52 °C.
- Successivi 15 minuti: avviata la seconda registrazione sul software usato, si è notato che la velocità di innalzamento della temperatura è diminuita drasticamente. Il sistema ha iniziato a stabilizzarsi e ad avvicinarsi allo stato stazionario, fermandosi a circa 55 °C.

Al termine di questa sessione la telecamera è stata ruotata di 180° per ispezionare le temperature delle facce non visibili direttamente dall'obiettivo della termocamera. Questa analisi visiva ha determinato che la temperatura era uniforme su tutte le facce della camera. Questo dato è molto importante in quanto dimostra che il case di alluminio conduce ottimamente il calore, distribuendolo in maniera uniforme e comportandosi come una superficie isoteramica.

2.2.2 Analisi dell'interazione termica con il supporto esistente

Nella seconda fase la camera è stata inserita nel supporto attualmente usato in laboratorio e il sistema è stato ripreso lateralmente come mostrato nelle figure 2.4 e 2.5. L'obiettivo era quello di valutare la capacità di dissipazione del supporto attuale.

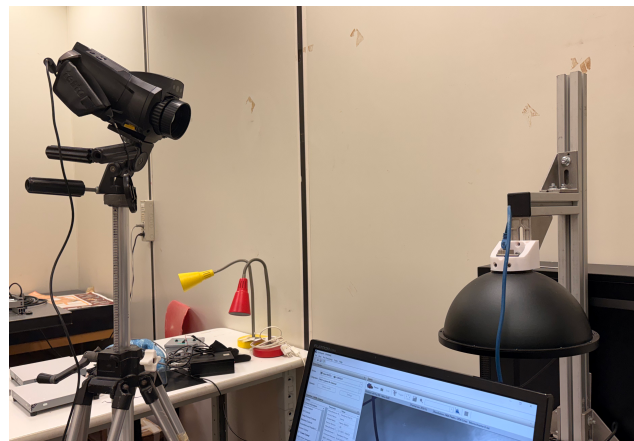
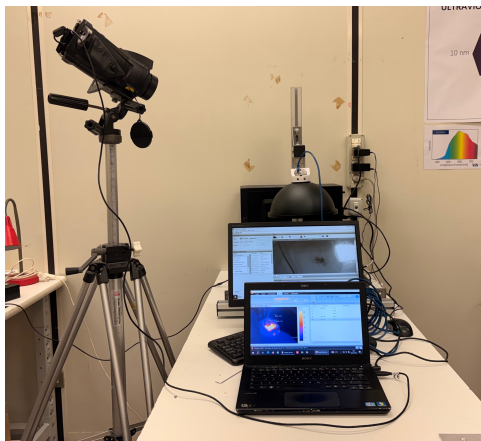


Figura 2.4 e Figura 2.5: Test 2 con camera inserita nel supporto

I risultati di questo secondo test hanno evidenziato una grande criticità progettuale:

- Durante il funzionamento, il supporto esterno non si è surriscaldato particolarmente, registrando temperature molto contenute, comprese tra i 25 °C e i 30 °C.
- Estruendo rapidamente la telecamera dal supporto, si è scoperto che il case aveva raggiunto una temperatura di 60 °C.

Questo scenario evidenzia come l'attuale supporto non stia dissipando calore, ma si stia comportando come un vero e proprio isolante termico. Infatti la telecamera

montata nel supporto si scalda di più rispetto a quando è libera nell'aria. Conseguenze di questo surriscaldamento sono l'accorciamento della vita dei componenti elettronici e l'aumento del rumore termico del sensore. Tutto ciò giustifica la necessità di riprogettare interamente il supporto, in quanto quello attuale presenta una resistenza termica elevatissima data dalla presenza di aria nei giochi di accoppiamento e dal materiale usato.

2.3 Sviluppo di un tool in Python per l'analisi dei dati termografici

I dati salvati durante i test in laboratorio tramite il software della termocamera (IRSOFIT) sono stati esportati sotto forma di file Excel. Ogni file contiene una matrice numerica in cui ogni cella rappresenta la temperatura misurata in un preciso punto dello spazio.

Per riuscire a leggere questi dati in modo automatico e studiare come cambia la temperatura in funzione del tempo, è stato sviluppato un algoritmo dedicato in linguaggio Python. Il codice usufruisce della combinazione di diverse librerie specializzate, ciascuna per una specifica fase del flusso di elaborazione.

L'architettura del software si articola in cinque macro-fasi sequenziali:

1. Selezione automatizzata della cartella di lavoro: una volta avviato, il programma mostra una finestra di dialogo che consente all'utente di selezionare la cartella del computer con memorizzati i file Excel del test. Il codice rileva i file con estensione .xlsx e li ordina cronologicamente.
2. Caricamento e selezione del primo frame: la funzione di lettura del codice acquisisce il primo file Excel della sequenza (frame0) e lo converte in una matrice di temperature che viene poi mostrata a schermo come immagine termica bidimensionale, utilizzando una scala di colori per individuare vivamente le zone a maggiore temperatura.
3. Selezione interattiva dell'area di interesse (ROI): tramite un comando grafico interattivo, all'utente viene dato il compito di tracciare un rettangolo con il mouse direttamente sull'immagine, questa sarà la zona da analizzare, definita ROI (Region of Interest), visualizzata nella figura 2.6.
4. Filtraggio dei dati e calcolo della media spaziale: una volta definita la ROI, il programma esegue un ciclo di calcolo automatico su tutti i file della sequenza. Per ciascun file l'algoritmo isola la porzione di matrice racchiusa nel rettangolo e calcola la temperatura media dei pixel all'interno di essa. Questa operazione è molto importante dal punto di vista sperimentale in quanto permette di abbattere il rumore di fondo dello strumento.

5. Generazione della curva del transitorio termico: i valori di temperatura medi ottenuti per ogni istante temporale vengono rielaborati per generare un grafico finale. Questo grafico mostra la variazione della temperatura in funzione del tempo, permettendo di valutare la rapidità della variazione termica e il valore asintotico in cui la temperatura della telecamera tende a stabilizzarsi. Il grafico è visualizzabile nella figura 2.7, nell'asse delle ordinate vi è la temperatura e nell'asse delle ascisse ogni trattino rappresenta un'immagine diversa, ognuna scattata con un intervallo di 3 secondi l'una dall'altra.

(Nota: Il codice completo scritto in Python è stato riportato all'interno dell'appendice A alla fine della tesi).

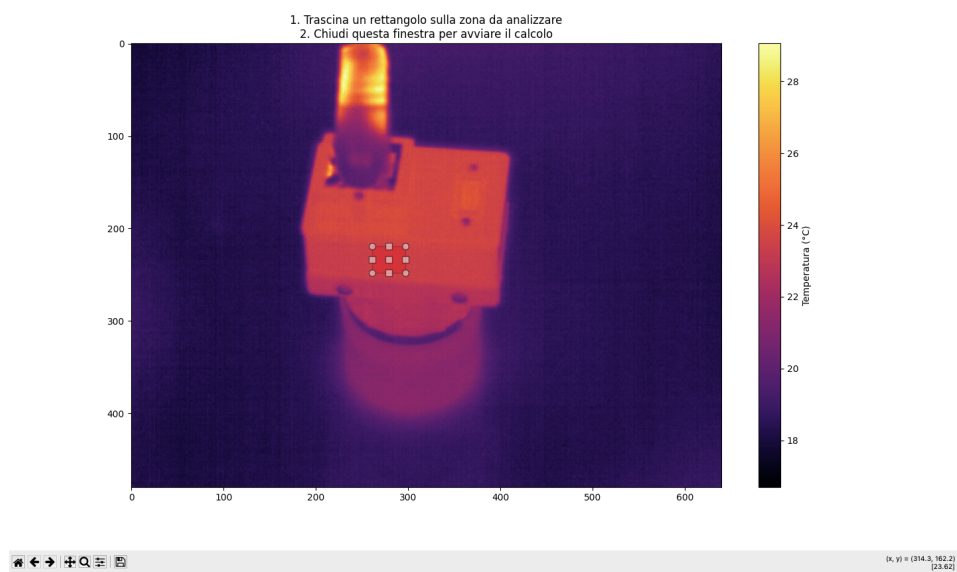


Figura 2.6: Screenshot dell'interfaccia interattiva del tool Python. Viene mostrato il primo frame termico con la selezione interattiva del rettangolo (ROI).

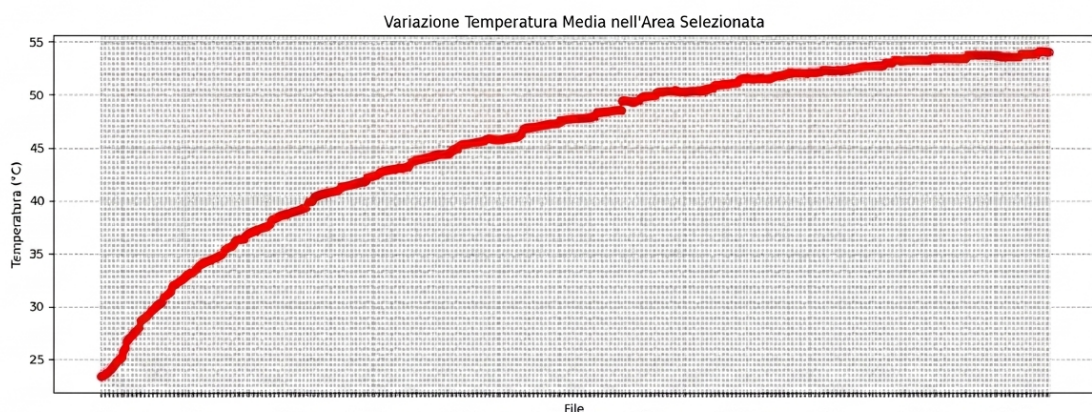


Figura 2.7: Andamento temporale della temperatura media calcolata sulla ROI della telecamera isolata durante i 15 minuti di funzionamento continuo.

2.3.1 Analisi della curva di riscaldamento sperimentale

L'interpretazione della curva sperimentale permette di comprendere la fisica del fenomeno e fornisce i parametri numerici macroscopici che verranno utilizzati nel capitolo successivo per la progettazione del nuovo supporto.

All'interno del grafico si possono chiaramente identificare due regioni distinte:

- Il regime transitorio iniziale: nei primi minuti del test la curva presenta una derivata termica molto elevata. Partendo da una temperatura iniziale di circa 23 °C, che è la temperatura ambiente del laboratorio, la linea sale in modo repentino. In questa prima fase il calore generato dalla camera viene immagazzinato quasi interamente nel case. La dissipazione del calore verso l'esterno è minima in quanto la differenza di temperatura tra la telecamera e l'aria circostante è ridotta.
- Il regime quasi stazionario: con il passare del tempo, la pendenza della curva diminuisce gradualmente, tendendo a flettere verso l'orizzontale nella parte finale del grafico. Questo fenomeno evidenzia che il sistema si sta avvicinando allo stato stazionario, e quindi alla condizione di equilibrio termico in cui il calore generato dalla camera viene bilanciato da quello scambiato con l'ambiente per convezione naturale. Al termine dei 15 minuti di registrazione la temperatura si attesta a circa 54.2 °C.

I dati evidenziati da questa analisi mettono in luce elementi cruciali per il proseguimento del lavoro dal punto di vista progettuale. Il fatto che la telecamera da sola sfiori i 55 °C in soli quindici minuti dimostra che il componente ha un'inerzia termica relativamente bassa e raggiunge temperature critiche in tempi molto ridotti dall'accensione dell'impianto.

I 54.2 °C misurati in questo grafico rappresentano il "limite inferiore" a cui la telecamera tende spontaneamente senza un sistema di dissipazione ausiliario. Nel Capitolo 4 l'obiettivo della progettazione sarà proprio quello di sviluppare un supporto alettato che, aumentando la superficie di scambio e ottimizzando i flussi convettivi, sia in grado di abbattere questo asintoto termico, riportando la temperatura del corpo macchina all'interno di un range di sicurezza ottimale.

3. Progettazione del supporto ideale

3.1 Obiettivi del design e vincoli del sistema

I risultati dei test sperimentali descritti nel Capitolo 2 hanno dimostrato che il supporto attualmente in uso si comporta come un isolante termico, portando la telecamera fino a 60 °C dopo 15 minuti in condizioni operative continue. Per via delle varie

problematiche, conseguenti al surriscaldamento della camera, spiegate nel Capitolo 2, si rende necessaria la completa riprogettazione del supporto.

Il nuovo componente è stato progettato come un dissipatore di calore a convezione naturale. La progettazione ha dovuto rispettare diversi vincoli geometrici imposti dall'applicazione industriale:

- Vincoli di accoppiamento: il supporto deve accoppiarsi stabilmente con il sistema di illuminazione a cupola e con la struttura meccanica principale che tiene sollevato l'intero apparato. Per permettere ciò, sono stati previsti dei fori posizionati in punti specifici della struttura e l'aggiunta di una flangia verticale. Alcuni fori sono stati fatti anche per poter fissare la camera al supporto (Figure 3.1 e 3.2).
- Accessibilità meccanica: due delle facce della telecamera devono essere lasciate libere per consentire il passaggio dei cavi di alimentazione e per l'ottica. Per soddisfare questa esigenza il nuovo supporto è stato configurato per avvolgere la telecamera su 4 facce, queste sono dotate di alette a profilo rettangolare orientate verticalmente per assecondare il moto ascensionale dell'aria calda (Figura 3.2).

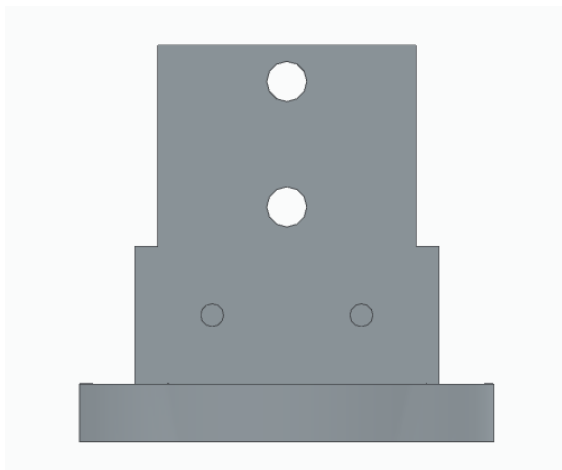


Figura 3.1: Vista da dietro del nuovo supporto (non ancora alettato). Si notano i fori per fissare la telecamera e i fori nella flangia per l'accoppiamento con la struttura meccanica esterna.

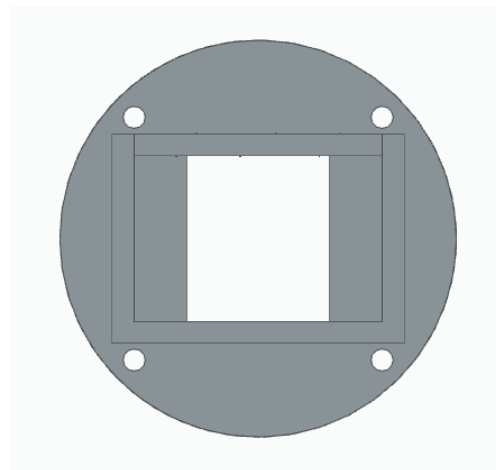


Figura 3.2: Vista dall'alto del nuovo supporto (non ancora alettato). Si notano i 4 fori per fissare l'illuminatore a cupola al supporto e la cavità in cui va inserito l'obiettivo della telecamera.

3.2 Selezione del materiale

Per la realizzazione del pezzo è stata scelta la lega di alluminio. Questo perché l'alluminio rappresenta il miglior compromesso tra prestazioni e costi:

- Proprietà termofisiche: garantisce un'elevata conducibilità termica, fondamentale per trasferire rapidamente il calore dalla camera alle alette.
- Fattore economico e peso: rispetto al rame, che ha una maggiore conducibilità, l'alluminio risulta leggero e meno costoso, garantendo comunque un'eccellente lavorabilità. ^[11]

3.3 Calcoli di dimensionamento

Per rispettare i vincoli di accoppiamento meccanico e le necessità di abbattimento termico e tradurli in entità geometriche definite, è stato sviluppato un sottomodulo analitico basate sulle equazioni fisiche della teoria termodinamica. Il processo si divide in due macro-fasi: la definizione della geometria macroscopica dell'alloggiamento della telecamera, e il calcolo fluidodinamica e conduttivo delle alette da applicare su di esso.

Di seguito sono riassunti i dati termofisici ricavati dai parametri di targa del componente e dalle proprietà dell'aria ad una temperatura di film stimata ($T_{film} = 37.5 \text{ °C} = 310.65 \text{ K}$):

- Potenza termica dissipata dalla telecamera (Q): 4.6 W
- Temperatura ambiente di riferimento (T_{∞}): 20 °C
- Temperatura limite della telecamera (T_{cam}): 55 °C
- Conducibilità termica ideale dell'alluminio (k): 237 W/(mK)
- Conducibilità termica dell'aria (k_{aria}): 0.027 W/(mK)
- Coefficiente di espansione volumetrica dell'aria (β): 0.00322 K^{-1}
- Viscosità cinematica dell'aria (ν): $16.92 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Diffusività termica dell'aria (α): $23.8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

3.3.1 Definizione geometrica del corpo d'alloggiamento della telecamera e delle aree di contatto

La telecamera Genie Nano ha dimensioni nominali pari a $W = 44 \text{ mm}$, $L = 29 \text{ mm}$ e $H = 21 \text{ mm}$ ^[11]. Per avvolgere il corpo macchina facendo sì che la struttura sia comunque abbastanza robusta, è stata progettata una "gabbia" in alluminio avente pareti spesse 4 mm e un gioco di accoppiamento pari a 1 mm.

In base a queste scelte, le superfici esterne da alettare sono state calcolate considerando un'altezza di aletta verticale di $H_{aletta} = 22 \text{ mm}$. Allora le aree delle facce esterne dell'alloggiamento sono:

- Faccia 1: con altezza esterna di 22 mm e base esterna di 38 mm l'area nominale della superficie vale $S_1 = 836 \text{ mm}^2$.
- Faccia 2: con altezza esterna di 22 mm e base esterna di 53 mm l'aria nominale vale $S_2 = 1166 \text{ mm}^2$.

La superficie esterna totale teorica adibita all'alettatura è data dalla combinazione simmetrica delle facce:

$$S_{esterna-tot} = 2 \cdot S_1 + 2 \cdot S_2 = 4004 \text{ mm}^2 \quad (11)$$

Per far sì che le alette siano staccate dalla base del supporto, in modo da garantire il corretto flusso dell'aria dal basso verso l'alto, si sono aggiunti 2 ulteriori millimetri all'altezza delle facce per un totale di $H_{esterna} = 24 \text{ mm}$.

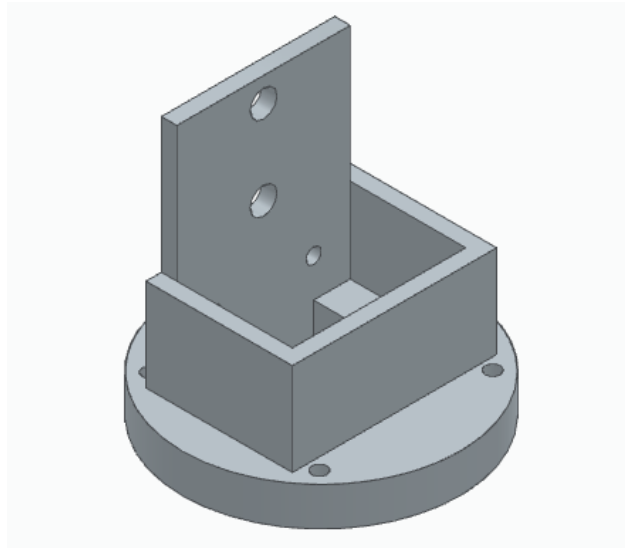


Figura 3.3: Struttura del supporto da alettare.

3.3.2 Dimensionamento locale per singola faccia

Sulla base della ripartizione geometrica dell'alloggiamento, lo studio dello scambio termico convettivo e il successivo inserimento delle alette è stato affrontato analizzando singolarmente le quattro facce verticali, applicando rigorosamente i modelli introdotti nel Capitolo 1.

A) Lati corti (facce laterali):

- Temperatura alla base (T_b): sfruttando l'area di contatto tra la camera e il supporto $A_{contatto} = 748 \text{ mm}^2 = 0.000748 \text{ m}^2$. Si applica la Legge di Fourier (1) per determinare il salto termico introdotto dalla parete spessa 4 mm.

$$T_b = T_{cam} - \frac{Q \cdot s_p}{k \cdot A_{contatto}} = 55 \text{ °C} - \frac{4.6 \text{ W} \cdot 0.004 \text{ m}}{237 \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \cdot 0.000748 \text{ m}^2} = 55 - 0.103 = 54.897 \text{ °C} \approx 55 \text{ °C}$$

- Numero di Rayleigh (Ra): sfruttando la (3) si determina il regime fluidodinamico dell'aria in convezione naturale lungo l'altezza H:

$$Ra = \frac{9.8 \cdot 0.00322 \cdot (55 - 20) \cdot (0.022)^3}{(16.92 \cdot 10^{-6}) \cdot (23.8 \cdot 10^{-6})} = 29203.89$$

- Spaziatura ottima (S_{opt}): applicando il modello di ottimizzazione convettiva di Bar-Cohen e Rohsenow per massimizzare il flusso eliminando il ristagno termico ($El \approx 50$) si ottiene dalla (6):

$$S_{opt} = 2.71 \cdot \frac{0.022}{(29203.89)^{1/4}} = 4.56 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 4.56 \text{ mm}$$

- Coefficiente di scambio convettivo (h): assumendo il Numero di Nusselt ottimale di canale pari a $Nu=1.25$, il coefficiente d'interfaccia vale:

$$h = \frac{1.25 \cdot k_{aria}}{S_{opt}} = \frac{1.25 \cdot 0.027}{4.56 \cdot 10^{-3}} = 7.4 \text{ W/(m}^2\text{K)} \quad (12)$$

- Geometria ed efficienza dell'aletta: ipotizzando uno spessore dell'aletta realistico $t = 1 \text{ mm} = 0.001 \text{ m}$, sfruttando la (8), si ricava il parametro conduttivo m:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot 7.4}{237 \cdot 0.001}} = 7.9 \text{ m}^{-1}$$

Utilizzando la formula per il calcolo della lunghezza ideale dell'aletta si ottiene un valore molto elevato, questo perché più l'aletta è lunga maggiore sarà la sua efficienza, ma questo valore non è compatibile con i vincoli spaziali di impianto quindi si sceglie di fissare la lunghezza dell'aletta a $L_{aletta} = 20 \text{ mm} = 0.020 \text{ m}$. Sostituendo tale valore nell'equazione (7) dell'efficienza si ottiene:

$$\eta_f = \frac{\tanh(7.9 \cdot 0.020)}{7.9 \cdot 0.020} \approx 1 \Rightarrow 100 \%$$

Il valore limite di spessore ottimo di Kern e Kraus (9) risulta microscopicamente non producibile, confermando la bontà della scelta tecnologica di adottare lo spessore standard $t = 1 \text{ mm}$.

- Numero di alette e superficie totale estesa: il numero di canali inseribili sulla larghezza di 38 mm risulta:

$$N = \frac{b}{S + t} = \frac{38}{4.5 + 1} = 6.9 \Rightarrow 6 \text{ alette effettive} \quad (13)$$

La superficie reale totale così sviluppata su questo lato ammonta a:

$$A_{fin} = N \cdot 2 \cdot L \cdot H = 5280 \text{ mm}^2 \quad (14)$$

Le due facce laterali sono uguali quindi queste dimensioni varranno per entrambe.

Per il dimensionamento delle altre due facce è stato utilizzato lo stesso procedimento.

B) Lato posteriore (longitudinale):

Considerando di dover lasciare libera dalle alette parte della superficie (figura 3.4), per via dei fori per accoppiare supporto e illuminatore, si considera una superficie da alettare di 902 mm^2 .

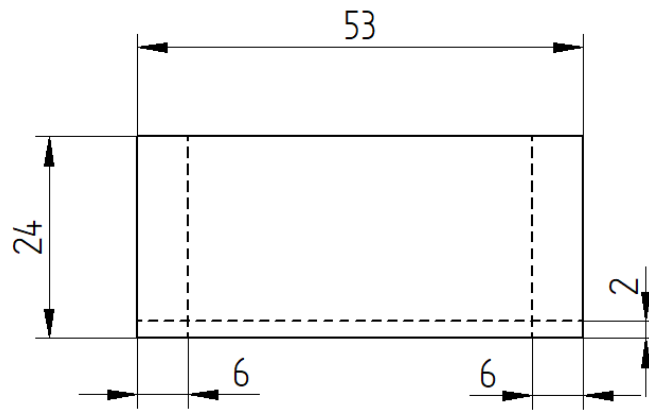


Figura 3.4: Disegno del lato posteriore. La porzione di superficie centrale è quella che è possibile alettare.

- Temperatura alla base (T_b): l'area di contatto conduttivo locale è pari a $A_{contatto} = 990 \text{ mm}^2 = 0.000990 \text{ m}^2$. Applicando Fourier (1) si ricava:

$$T_b = 54.922 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Parametri adimensionali e spaziatura: essendo l'altezza verticale $H=22 \text{ mm}$ identica alla precedente, il numero di Rayleigh si mantiene stabile a $Ra=29203.89$, definendo la medesima spaziatura ottima di Bar-Cohen e Rohsenow pari a $S_{opt}=4.56 \text{ mm}$ (approssimata a 4.5) e un coefficiente di convezione locale $h=7.4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.
- Efficienza e configurazione geometrica: mantenendo lo spessore dell'aletta a $t = 1 \text{ mm}$ e la lunghezza dell'aletta a $L = 20 \text{ mm}$, il parametro d'aletta si attesta a $m = 7.9 \text{ m}^{-1}$, preservando l'efficienza di punta ottimale del 100% ($\eta_f=1$).

- Numero di alette e superficie totale estesa: sulla larghezza locale di 41 mm, il numero di canali utili inseribili è pari a:

$$N = \frac{b}{S + t} = \frac{41}{4.5 + 1} = 7.45 \Rightarrow 7 \text{ alette effettive}$$

La superficie estesa totale netta ricavata per la faccia posteriore è pari a:

$$A_{fin} = N \cdot 2 \cdot L \cdot H = 6160 \text{ mm}^2$$

C) Lato anteriore (longitudinale):

La terza e ultima porzione del nucleo da alettare è quella più irregolare dal punto di vista geometrico, come si può vedere nella figura 3.5, in quanto si devono tenere in considerazione sia i fori per l'accoppiamento con l'illuminatore sia i fori per poter fissare la telecamera al supporto.

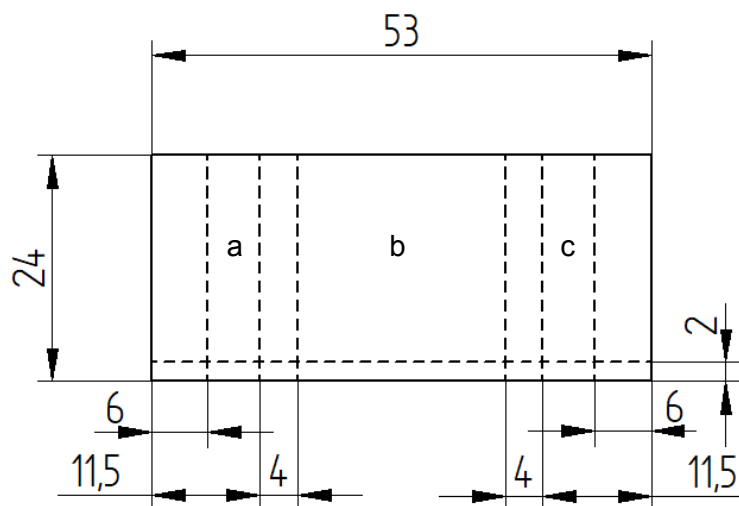


Figura 3.5: Disegno del lato anteriore. Le porzioni da alettare sono contrassegnate dalle lettere a, b e c.

I vari parametri calcolati per la faccia B restano invariati anche per questo lato, quindi si ha:

- Temperatura alla base (T_b):

$$T_b = 54.922 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Parametri adimensionali e spaziatura: il numero di Rayleigh si mantiene stabile a $Ra=29203.89$, la spaziatura ottima di Bar-Cohen e Rohsenow rimane pari a S_{opt}

=4.56 mm (approssimata a 4.5) e il coefficiente di convezione locale è $h=7.4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

- Efficienza e configurazione geometrica: mantenendo lo spessore dell'aletta a $t = 1 \text{ mm}$ e la lunghezza dell'aletta a $L = 20 \text{ mm}$, il parametro d'aletta è sempre di $m = 7.9 \text{ m}^{-1}$, preservando l'efficienza di punta ottimale del 100% ($\eta_f=1$).

Ciò che varia ora è come disporre le alette sulla superficie, considerando la porzione di area tra i fori per l'accoppiamento della telecamera, cioè la zona b, ($b = 22 \text{ mm}$) si possono inserire:

$$N = \frac{b}{S + t} = \frac{22}{4.5 + 1} = 4.9 \Rightarrow 4 \text{ alette effettive}$$

Per aumentare l'efficienza nel dissipare calore, si aggiungono due alette anche nella porzione di superficie tra i fori per l'accoppiamento con il dome e quelli per la telecamera (zone a e c). In questo modo il lato anteriore avrà 6 alette totali.

3.4 Modellazione CAD

I parametri geometrici ricavati dal sottomodulo analitico sono stati trasferiti nell'ambiente CAD di Solid Edge per la modellazione tridimensionale del pezzo.

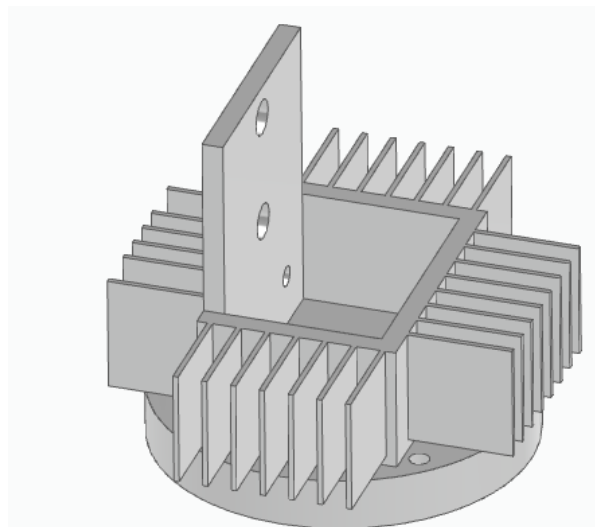


Figura 3.6: Modello tridimensionale del supporto ottimizzato sviluppato in Solid Edge.

Come si vede nella figura 3.6, il nuovo supporto è stato modellato a partire dalla base cilindrica, che è stata forata al centro per far entrare l'obiettivo della telecamera all'interno della cupola dell'illuminare. Dalla base si ergono le quattro pareti spesse 4 mm che costituiscono l'alloggio della camera, è stato lasciato un gioco di montaggio di 1 mm per facilitare l'inserimento senza compromettere la conducibilità termica di contatto. Una di queste pareti è stata estesa in una flangia forata per l'accoppiamento

con la struttura meccanica esterna. Le pareti dell'alloggiamento sono state poi alettate seguendo le dimensioni calcolate nel capitolo 3.3.2 .

Di seguito, nella figura 3.7, si può vedere la tavola tecnica del nuovo supporto.

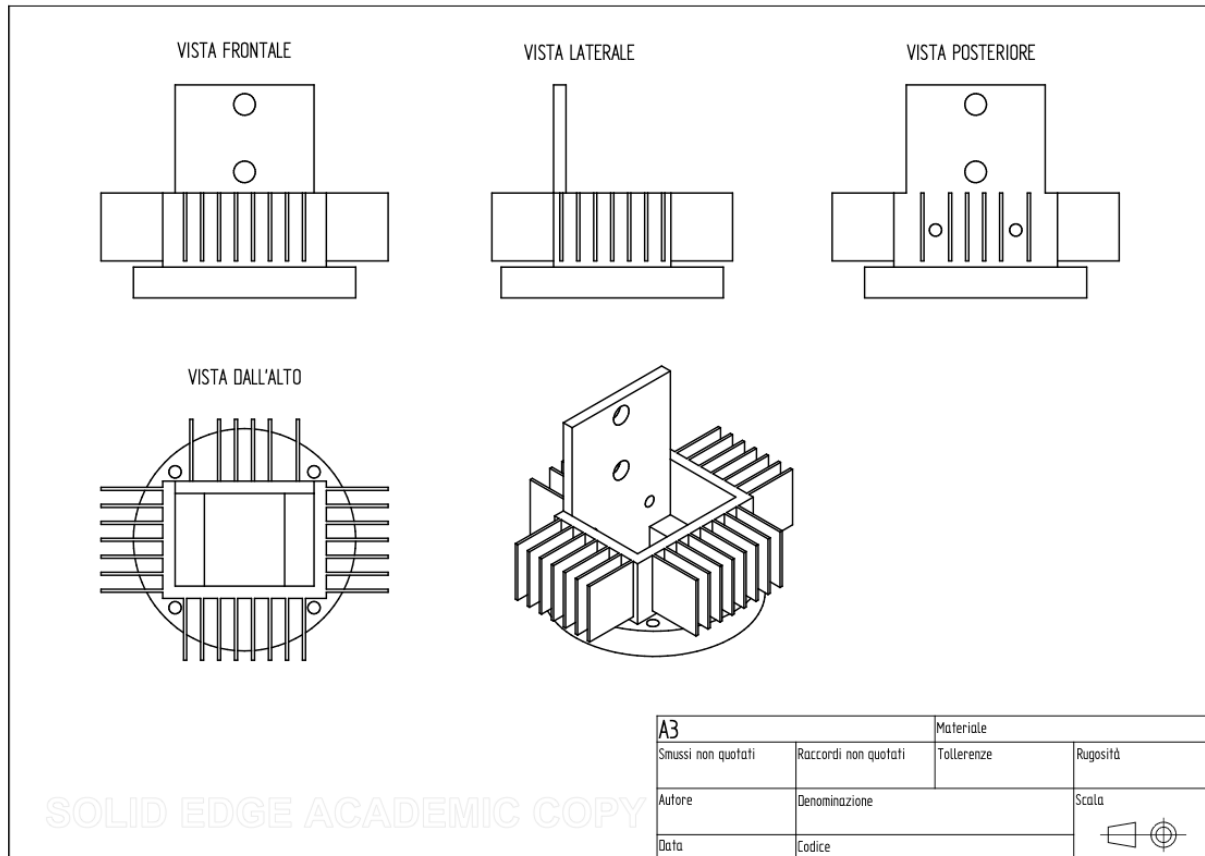


Figura 3.7: Tavola del supporto finito con varie viste.

3.5 Simulazione termica ad elementi finiti e validazione dei risultati

Una volta realizzato il modello 3D del nuovo supporto, per convalidare l'efficienza del pezzo prima della sua produzione e per studiare come dissipa il calore con il passare del tempo, è stata eseguita una simulazione termica in regime transitorio utilizzando Solid Edge. A differenza di un'analisi stazionaria, lo studio in transitorio permette di valutare la rampa di riscaldamento del sistema, offrendo un riscontro diretto con le misurazioni sperimentali effettuate in laboratorio.

3.5.1 Condizioni al contorno

Il dominio di calcolo è stato discretizzato mediante una messa volumetrica a elementi tetraedrici. Per rendere la simulazione più credibile, per poterla poi effettivamente confrontare con i test svolti in laboratorio, al modello sono state applicate le proprietà

termofisiche della lega di Alluminio 1060 ($k = 221 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) e impostate le seguenti condizioni al contorno derivate dal sottomodulo analitico:

- Sorgente di calore: un calore termico di potenza costante pari a 4.6 W distribuito uniformemente sulle facce interne del corpo d'alloggiamento a contatto con il case della telecamera.
- Convezione naturale: sull'intera superficie alettata è stato impostato il coefficiente di scambio convettivo calcolato ($h = 7.4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$), considerando un'aria ambiente indisturbata a temperatura stazionaria $T_\infty = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Condizione iniziale: il sistema all'istante iniziale è supposto a temperatura ambiente uniforme.

3.5.2 Analisi dei risultati

L'analisi termica ha permesso di mappare lo stato termico del supporto durante la fase dinamica di riscaldamento. Nelle figure 3.8 e 3.9 viene illustrato il termogramma numerico esatto a un tempo di osservazione significativo pari a 300 e 600 secondi (5 e 10 minuti) dall'inizio del fenomeno.

Come evidenziato dalla scala cromatica, dopo 10 minuti di funzionamento continuo (figura 3.9) la struttura presenta una distribuzione di calore molto omogenea, con temperature comprese in un intervallo ristretto tra $30.3 \text{ }^\circ\text{C}$ e $30.6 \text{ }^\circ\text{C}$. Il fatto che non vi siano gradienti marcati tra la base e l'estremità delle alette conferma l'elevata efficienza delle alette prevista analiticamente.

La direzione dei vettori del flusso termico (freccie rosse) conferma visivamente lo smaltimento del calore verso l'aria circostante.

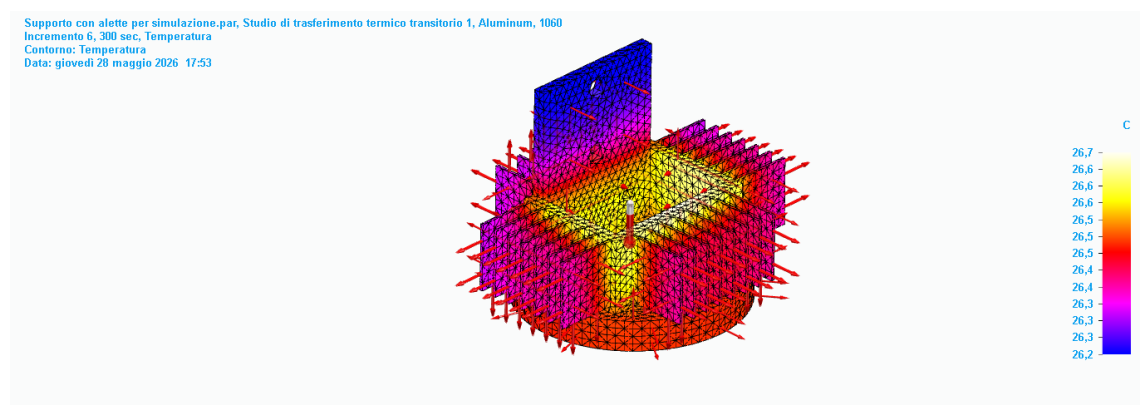


Figura 3.8: Mappatura termica tridimensionale del supporto in lega d'alluminio 1060 calcolata in regime transitorio al tempo $t=300 \text{ s}$ (5 min). I vettori indicano la direzione del flusso termico uscente dalle alette.

SUPPORTO CON ALETTE prova divisione facce.par, Studio di trasferimento termico transitorio 1, Aluminum, 1060
Incremento 11, 600 sec, Temperatura
Contorno: Temperatura
Data: mercoledì 6 maggio 2026 18:36

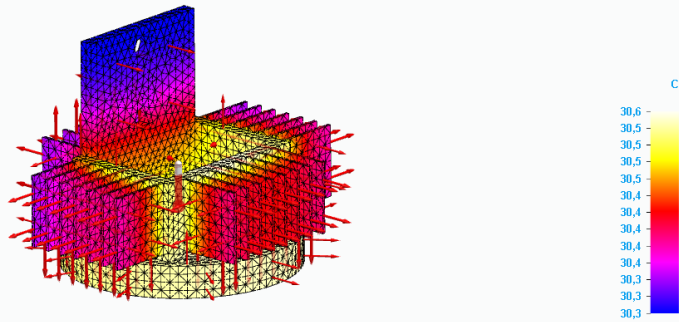


Figura 3.9: Mappatura termica tridimensionale del supporto in lega d'alluminio 1060 calcolata in regime transitorio al tempo $t=600$ s (10 min). I vettori indicano la direzione del flusso termico uscente dalle alette.

4. Realizzazione del supporto reale

4.1 La scelta dei componenti

Il passaggio dalla modellazione geometrica ideale alla realizzazione del prototipo fisico rappresenta uno dei nodi più critici del processo progettuale, in cui le soluzioni ottime dal punto di vista teorico devono necessariamente confrontarsi con i vincoli tecnologici ed economici della realtà manifatturiera.

Per via dell'inefficienza e l'insostenibilità di un approccio "su misura", il progetto si è mosso verso una strategia basata sull'integrazione di componenti standard pre-esistenti sul mercato.

4.1.1 Il dissipatore di calore

Per quanto riguarda il corpo di alloggiamento alettato della telecamera, si è optato per una strategia ibrida: l'approvvigionamento di un profilo commerciale alettato estruso e la sua successiva lavorazione meccanica mirata presso l'officina dell'Ateneo.

La selezione del componente commerciale si è concentrata sulla ricerca di un profilo le cui caratteristiche geometriche si avvicinassero il più possibile ai parametri ottimali calcolati nel sottomodulo analitico. In particolar modo si è data importanza assoluta alla spaziatura ottimale (S_{opt}) e allo spessore delle alette (t). In regime di convezione naturale, infatti, la spaziatura governa l'innescio stesso dei moti convettivi d'aria.

La scelta del pezzo è ricaduta sul dissipatore estruso ad alte prestazioni della Fisher Elektronik, il cui data sheet è nella figura 4.1.

Data sheet Product SK 686 150 AL



Profile heatsinks and liquid coolers > Standard extruded heatsinks
76 x 16.8 mm

Features

thermal resistance:	9 - 3.6 K/W
length:	150 mm
surface:	raw degreased aluminium (by the metre raw aluminium)
height:	16.8 mm
width:	76 mm
plate thickness:	3.1 mm

Technical Drawing

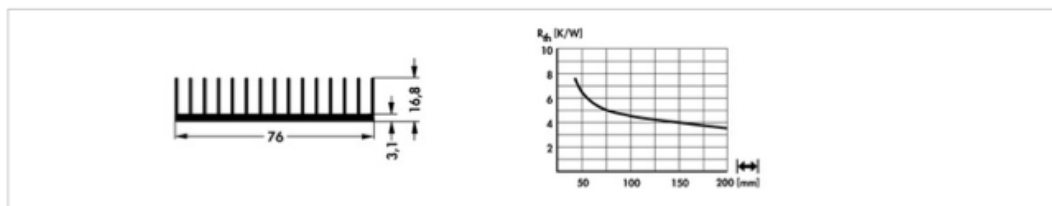


Figura 4.1: Data sheet del dissipatore scelto. [9]

Come si evince dal disegno tecnico l'altezza delle alette risulta nettamente inferiore a quella definita idealmente nel modello CAD; tuttavia dalla larghezza della base estrusa si può ricavare che la spaziatura e lo spessore sono estremamente simili a quelli teorici, garantendo così il rispetto del vincolo fluidodinamico principale.

4.1.2 La base cilindrica del supporto

Come con il profilo alettato, anche la flangia inferiore destinata all'accoppiamento con l'illuminatore a cupola è stata ricavata partendo da un componente semilavorato pre-esistente. Presso i magazzini dell'officina meccanica è stato infatti individuato un elemento cilindrico in alluminio grezzo che si prestava in modo ottimale alle successive operazioni di adattamento.

Dal punto di vista geometrico, il pezzo trovato presentava alcune lievi discrepanze rispetto alle quote ideate nel modello tridimensionale ideale. Nello specifico, il diametro esterno del pezzo modellato al computer era di qualche millimetro inferiore di quello del cilindro reale, e lo spessore assiale della piastra si è rivelato leggermente più sottile rispetto al valore originario di progetto.

Tali variazioni millimetriche sono state tuttavia ritenute trascurabili: l'esiguo incremento del diametro esterno non genera alcuna interferenza con l'alettatura, mentre la riduzione dello spessore della base non danneggia la rigidità strutturale del supporto. L'utilizzo di questo semilavorato ha così permesso di diminuire molto i tempi di lavoro per la realizzazione del pezzo.

4.2 Ciclo di lavorazione meccanica e fasi di assemblaggio del prototipo

Una volta selezionati e recuperati i componenti semilavorati (il profilo estruso alettato e il blocco cilindrico in alluminio), si è passati alla fase operativa. I pezzi sono stati sottoposti, dal tecnico specializzato dell'officina, ad un ciclo di lavorazioni per soddisfare sia i requisiti di alloggiamento della telecamera, sia i vincoli di accoppiamento con l'illuminatore e la struttura portante esterna.

La sequenza di lavorazioni effettuate è stata:

- 1) Finitura e foratura della base cilindrica: la base in alluminio ha subito una prima operazione di finitura superficiale e, poi, è stata predisposta per l'accoppiamento con la cupola dell'illuminatore. La disposizione dei fori è stata rilevata sul campo utilizzando il metodo di tracciatura tramite grani di riscontro. Una volta marcati i centri geometrici, sono stati eseguiti al trapano a colonna 4 fori passanti non filettati. Questa configurazione consente il passaggio di viti che si serrano direttamente sulle madreviti integrate nel corpo della Dome Light, assicurando un accoppiamento rigido e stabile alle vibrazioni. Al fine di consentire il corretto inserimento dell'obiettivo della camera all'interno del vertice della cupola, al semilavorato cilindrico è stato effettuato un ulteriore foro centrale passante. Tale apertura è stata dimensionata con un diametro leggermente maggiore rispetto all'ingombro radiale dell'ottica, questo per scongiurare fenomeni di interferenza meccanica.
- 2) Taglio e fresatura del profilo alettato: il profilo commerciale estruso è stato inizialmente tagliato mediante sega per ricavare 4 pareti distinte, destinate a circondare e stringere geometricamente il corpo macchina della Genie Nano. Una delle pareti è stata volutamente tagliata con un'estensione verticale che funge da flangia e sulla quale sono stati praticati due fori di fissaggio per l'interfaccia con il braccio meccanico di sostegno (figura 4.2). L'esecuzione dei fori di accoppiamento sulle pareti alettate è stata la lavorazione più complessa. Poiché la presenza ravvicinata delle alette impediva il passaggio fisico della testa delle viti, si è resa necessaria un'operazione di fresatura localizzata. In corrispondenza delle sedi dei fori sono state asportate intere porzioni di aletta, questo ha creato delle nicchie

piane orizzontali che consentono l'alloggiamento a battuta delle viti di fissaggio della telecamera.



Figura 4.2: Parete alettata del supporto con estensione verticale forata.

- 3) Assemblaggio finale dell'assieme: le 4 pareti alettate sono fissate al case della camera e l'illuminatore è avvitato alla base cilindrica. L'unione delle pareti a questa base ha richiesto una soluzione di serraggio verticale robusta e compatibile con gli spazi ristretti dell'alettatura. Il corpo di alloggiamento è stato vincolato stabilmente alla base mediante l'utilizzo di lunghe viti a brugola disposte verticalmente ed incastrate sulla sezione delle alette utilizzando delle rondelle sotto le teste delle viti (figura 4.3).

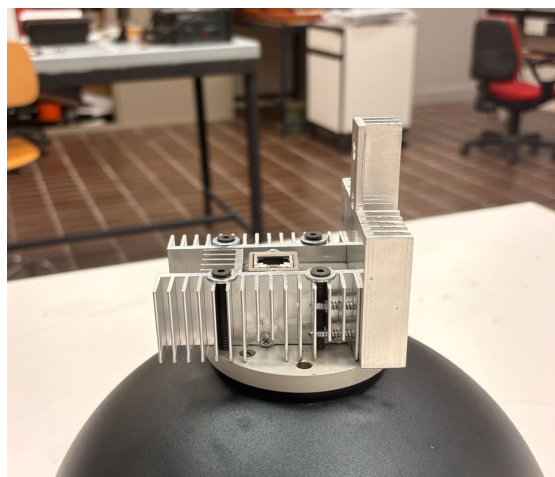


Figura 4.3: Vista laterale del supporto alettato. Si notano le lunghe viti verticali.

L'assieme finale così ottenuto (mostrato nelle figure 4.4 e 4.5) si presenta compatto e robusto, in grado di coniugare la funzione strutturale di sostegno con quella termofisica di dissipazione.

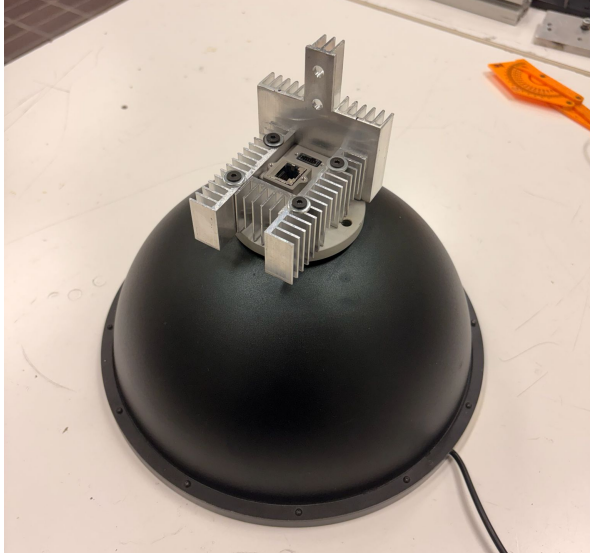


Figura 4.4: Supporto alettato finito e montato alla cupola dell'illuminatore.

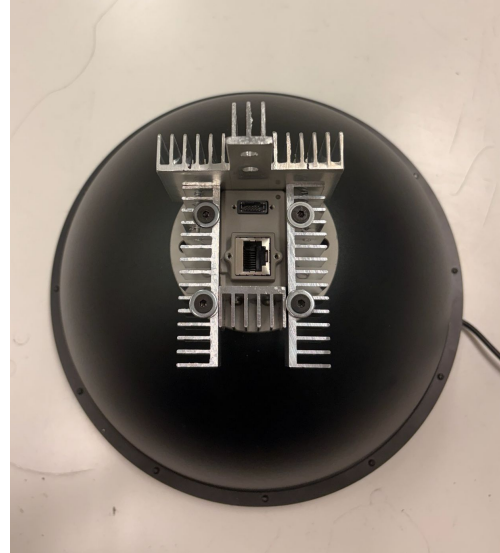


Figura 4.5: Supporto alettato finito e montato alla cupola dell'illuminatore visto dall'alto.

4.3 Discrepanze tra modello CAD nominale e prototipo reale

Il passaggio dalla moderazione geometrica ideale alla manifattura fisica del prototipo comporta l'inevitabile introduzione di scostamenti geometrici, legati ai vari compromessi per le lavorazioni d'officina e alla natura standard dei semilavorati scelti. Per comprendere come queste discrepanze influenzano il comportamento termofisico globale del sistema reale rispetto alle previsioni analitiche e numeriche del Capitolo 4, è necessario mapparle e quantificarle.

Le principali deviazioni rilevate tra il manufatto finale e il modello ideale possono essere raggruppate in tre macro-aree:

- 1) Struttura modulare assemblata vs. Monoblocco ideale: la maggiore discrepanza risiede nell'architettura strutturale del corpo d'alloggiamento della telecamera. Il modello CAD prevedeva un guscio continuo e monoblocco in alluminio, in grado di garantire una conduzione termica pura e omnidirezionale senza interruzioni di materiale, mentre il prototipo reale è costituito da parti distenete e accoppiate tramite viti. I microscopici giochi geometrici comportano una resistenza termica di contatto. La presenza di sottilissimi strati d'aria interstiziale ostacola il flusso termico conduttivo tra i moduli rispetto al comportamento del metallo massiccio,

agendo come una leggera barriera termica locale che influisce sulla velocità di ridistribuzione del calore all'interno del supporto.

- 2) Variazione dell'altezza delle alette e delle dimensioni delle pareti d'alloggiamento: come evidenziato dai dati nella scheda tecnica del profilo commerciale Fisher Elektronik, l'altezza delle alette reali ($L_{reale} = 13,7 \text{ mm}$) è risultata inferiore rispetto alla dimensione nominale ottimizzata al computer ($L_{CAD} = 20 \text{ mm}$). Inoltre, per consentire l'alloggiamento a battuta delle viti di fissaggio, ampie porzioni di alettatura sono state rimosse tramite fresatura localizzata. La combinazione di questi due fattori tecnologici ha comportato una riduzione della superficie esterna totale destinata allo scambio convettivo naturale, che è stata però compensata da un aumento della larghezza delle parti dell'alloggiamento, queste infatti a differenza del modello CAD sono molto più larghe rispetto alle dimensioni della telecamera.
- 3) Morfologia e spessore della base cilindrica: l'utilizzo del semilavorato cilindrico recuperato in officina ha introdotto scostamenti geometrici di tipo dimensionale e geometrico rispetto al modello CAD: il diametro esterno reale è leggermente maggiore di qualche millimetro alla quota teorica, mentre lo spessore assiale del disco è leggermente inferiore a quello ipotizzato. Un diametro maggiore si traduce in un leggero incremento della capacità termica accumulabile del pezzo e il minore spessore riduce la resistenza conduttiva assiale.

Nella tabella a seguito si può osservare una sintesi chiara e quantitativa delle discrepanze sopra osservate.

Caratteristica geometrica	Modello CAD ideale (Cap. 4)	Prototipo reale d'officina (Cap. 5)	Impatto termico atteso
Continuità strutturale	Monoblocco continuo e omogeneo	4 pareti distinte accoppiate meccanicamente	Introduzione di resistenza termica di contatto
Spaziatura alette (S)	4,56 mm (ottimo analitico)	Preservata (vincolo di scelta del profilo)	Invariato innesco della convezione naturale
Sviluppo alette (L)	20 mm (uniforme sui 4 lati)	Ridotto a 13,7 mm (profilo standard)	Riduzione della superficie totale di scambio
Dimensione pareti alettate	Limitate ad avvolgere il case della telecamera	Maggiori del case della telecamera	Aumento della superficie totale di scambio
Geometria della base	Disco flangiato nominale ottimizzato	Diametro maggiore, spessore ridotto	Modifica dell'inerzia termica e del flusso assiale

5. Validazione sperimentale tramite rilievo termografico

5.1 Obiettivi della campagna sperimentale

L'ultima fase del progetto prevede la validazione sul campo del prototipo reale sviluppato in officina. I principali obiettivi di questa campagna di test e analisi termica in laboratorio sono:

- Verificare l'effettivo contenimento della temperatura operativa della telecamera Genie Nano al di sotto dei limiti di danneggiamento.
- Analizzare la distribuzione spaziale del calore sulle superfici del supporto per valutare l'efficienza reale delle alette e l'innesco della convezione naturale.
- Ricostruire la curva temporale del transitorio termico nei primi 15 minuti di funzionamento continuo per osservare come si scalda il nuovo supporto.

5.2 Strumentazione di misura e configurazione del test

Per lo svolgimento di questo test in laboratorio, si è proseguiti sulla stessa linea del Capitolo 2.

É stata usata di nuovo la termocamera in quanto è un dispositivo ideale per mappare in tempo reale e in modo totalmente non invasivo la distribuzione spaziale del calore sulle superfici del prototipo. Lo strumento è stato posizionato stabilmente di fianco all'assieme meccanico, montato su un apposito treppiede, come visibile nella figura 5.1. Questo orientamento è stato scelto per assicurare una visibilità ottimale dei canali d'aria e del corpo centrale di alloggiamento.

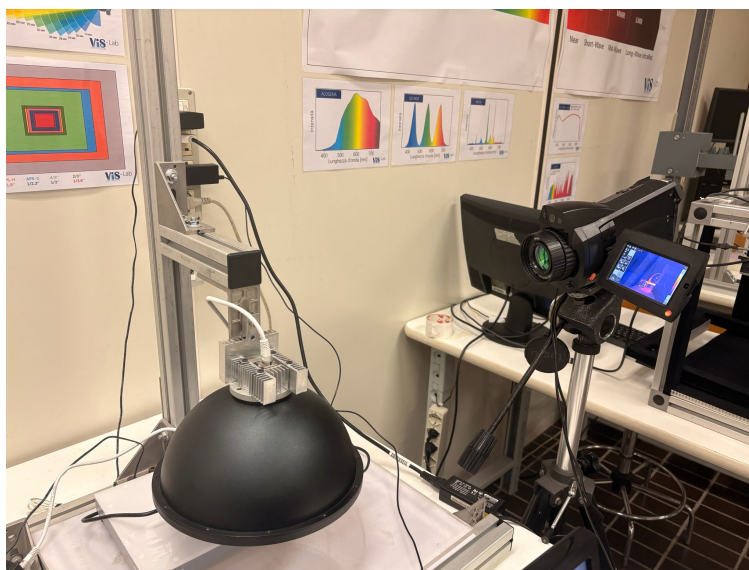


Figura 5.1: Analisi con termocamera su supporto alettato

Un aspetto molto importante nella preparazione del test ha riguardato lo stato superficiale del metallo. L'alluminio grezzo ottenuto dalle lavorazioni d'officina presenta una superficie parzialmente riflettente che, quando inquadrata dalla termocamera, tende a falsare la lettura delle temperature reali a causa dei riflessi ambientali circostanti. Per evitare questo problema, come quando sono state fatte le misurazioni sulla camera da sola, sono stati applicati piccoli pezzetti di nastro adesivo scuro in alcuni punti strategici del supporto.

5.3 Analisi termica del supporto alettato

La prova ha avuto inizio in condizioni di equilibrio termico iniziale in cui l'intero impianto si attestava alla temperatura ambiente del laboratorio, superiore di quella del Capitolo 3, pari a circa 26 °C. Il protocollo sperimentale è stato eseguito secondo le seguenti fasi operative:

- Attivazione del carico termico: la telecamera Genie Nano è stata avviata in modalità di acquisizione d'immagine.
- Campionamento temporale: come per test effettuati in precedenza, il sistema di rilevazione della termocamera è stato programmato per registrare un termogramma ad intervalli regolari di 3 secondi, protraendo l'acquisizione per una finestra temporale di 15 minuti (900 secondi, 300 immagini totali). Questo campionamento ha permesso di catturare l'evoluzione termica del transitorio.
- Misura della temperatura interna: al raggiungimento del quindicesimo minuto, si è rapidamente estratto dal guscio di alluminio la telecamera e si è osservata la temperatura di quest'ultima.

5.3.1 Confronto tra modello FEM e rilievo sperimentale

Per valutare l'affidabilità della progettazione un metodo risiede nel confronto tra le previsioni teoriche ottenute mediante l'analisi agli elementi finiti (FEM) e i riscontri empirici in laboratorio. Proprio per questo, nella figura 5.2 vengono confrontate la mappatura termica del supporto ideale calcolata in ambiente Solid Edge e il termogramma reale, entrambi all'istante $t = 10 \text{ min}$ (600 secondi) dall'avvio del transitorio.

L'analisi comparativa mostra una straordinaria convergenza tra i due modelli, sia dal punto di vista della distribuzione spaziale del calore sia dal punto di vista quantitativo:

- Accuratezza dei valori di temperature: la simulazione numerica di Solid Edge (figura 5.2a) stimava per il supporto in alluminio una temperatura distribuita in un range molto ristretto, compreso tra i 30,3 °C e i 30,6 °C. L'esame del termogramma reale (figura 5.2b) mostra come il corpo alettato si attesti nella fascia compresa tra i 30 °C e i 32 °C.

- Validazione dell'efficienza delle alette: entrambe le immagini confermano visivamente la distribuzione termica omogenea del supporto. Sia nella mappa FEM che nel test in laboratorio, non si vedono salti termici tra la radice e l'estremità delle alette. Questo dimostra la validità del dimensionamento geometrico dell'alettatura in fase di design.

In conclusione, questo confronto mostra la qualità del lavoro d'officina: nonostante le modifiche geometriche apportate al supporto reale rispetto al solido ideale, il comportamento termofisico globale non ha subito alterazioni penalizzanti.

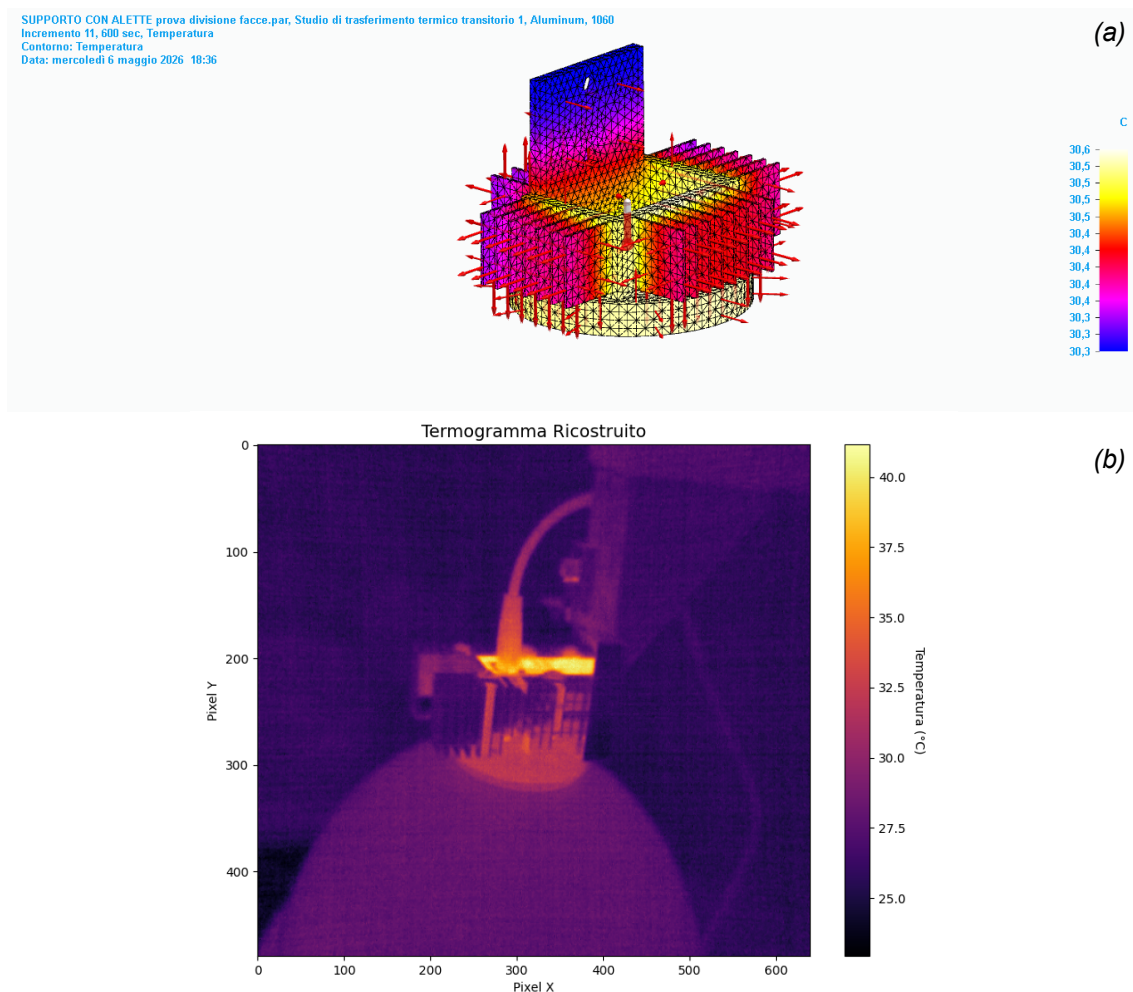


Figura 5.2: Confronto del campo termico sul supporto alettato dopo 10 minuti di funzionamento continuo: (a) Mappa delle temperature risultante dalla simulazione numerica transitoria FEM [Capitolo 4]; (b) Termogramma sperimentale registrato dalla termocamera radiometrica.

5.3.2 Risultati sperimentali e discussione

I dati numerici ottenuti descrivono un comportamento termofisico del supporto reale di ottimo livello, validando le scelte geometriche effettuate in fase di progetto.

Allo scadere del transitorio programmato di 15 minuti, le temperature superficiali del supporto sono stabilizzate sui seguenti valori locali:

- Punta delle alette: 31 °C
- Base delle alette: 32 °C
- Corpo centrale dell'alloggiamento: 34 °C

La ridotta differenza di temperatura tra base ed estremità delle alette (di circa 1 grado) costituisce la prova sperimentale della validità del modello analitico. Questo andamento dimostra che il materiale del supporto ha un'ottima conducibilità e che l'efficienza dell'aletta reale è estremamente elevata, confermando l'ottimale dimensionamento del profilo commerciale selezionato.

Il buon riscontro del progetto trova la sua conferma definitiva nel valore di temperatura raggiunto dalla telecamera all'interno del supporto. Passati i 15 minuti di lavoro a regime, la Genie Nano è stata infatti estratta molto rapidamente dal suo alloggiamento e si è osservata una temperatura di 43 °C.

Tenendo conto che la temperatura ambientale di partenza del laboratorio era penalizzante rispetto ai test svolti in precedenza (26 °C invece di 20 °C), il mantenimento della temperatura della telecamera a 43 °C garantisce un ampio margine di sicurezza rispetto alla soglia termica massima imposta dal costruttore. Il supporto alettato realizzato, nonostante le modifiche geometriche introdotte dalle lavorazioni meccaniche d'officina, si è dimostrato pienamente capace di smaltire il carico termico, risolvendo in modo definitivo i problemi di surriscaldamento riscontrati con il vecchio sistema di fissaggio isolante.

6. Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro di tesi ha risposto in modo efficace e concreto alla necessità di dissipazione termica riscontrata nel laboratorio di Misure dell'Università Politecnica delle Marche, dove si sono riscontrate criticità legate a un severo surriscaldamento operativo della telecamera industriale Teledyne DALSA Genie Nano. L'obiettivo principale del progetto è stato raggiunto: la progettazione e la successiva realizzazione di un supporto alettato hanno permesso di gestire lo smaltimento termico del dispositivo sfruttando esclusivamente i moti convettivi naturali.

La solidità della metodologia adottata risiede in quattro fasi fondamentali:

- 1) Caratterizzazione iniziale: il progetto si è avviato con lo studio sperimentale della telecamera sia isolata sia all'interno del vecchio supporto. I rilievi termografici iniziali hanno evidenziato come la telecamera si scaldasse in maniera uniforme e come l'assenza di superfici estese e l'inadeguatezza del materiale isolante

impedissero lo smaltimento di calore generato dal processore interno. Questo passaggio ha permesso di definire con precisione il problema ingegneristico da risolvere.

- 2) L'approccio analitico e numerico: la scelta dei parametri geometrici ottimali delle alette di raffreddamento (spaziatura e spessore) in relazione al carico termico della telecamera, è stato guidato dallo studio teorico preliminare. Questo modello geometrico è stato sviluppato in ambiente CAD e ha trovato una prima importante conferma nella simulazione agli elementi finiti condotta con il software Solid Edge.
- 3) La realizzazione manifatturiera: nella transizione dal modello teorico al modello fisico si è agito in una logica di ottimizzazione dei costi e dei tempi di produzione, scendendo a dei compromessi. La struttura di alloggiamento a quattro pareti è stata ricavata adattando un profilo estruso commerciale ad alte prestazioni della Fisher Elektronik, mentre gli altri componenti del supporto sono stati realizzati utilizzando semilavorati inutilizzati trovati nell'officina dell'Università.
- 4) La validazione sperimentale: i test eseguiti in laboratorio tramite nuovi rilievi con termocamera radiometrica hanno confermato la validità del componente reale. Nonostante le inevitabili imperfezioni introdotte dalle lavorazioni e una temperatura ambiente iniziale superiore alla norma, pari a circa 26 °C, il supporto ha dimostrato una straordinaria conducibilità termica. Con la prova di estrazione rapida si è ottenuta la prova definitiva della validità del nuovo supporto: il case della telecamera si è stabilizzato ad una temperatura di 43 °C, nettamente inferiore ai 60 °C che raggiungeva con il vecchio supporto isolante.

I risultati ottenuti dimostrano come la dissipazione passiva in convezione naturale sia una possibile ed ottima soluzione impiantistica per i sistemi di visione compatti, in quanto permetta di preservare la qualità dell'immagine, riducendo il rumore termico, e garantire la stabilità senza introdurre vibrazioni meccaniche o componenti soggetti ad usura. Inoltre, l'utilizzo combinato di pezzi standard e di scarto con le lavorazioni mirate in officina si è rivelata una strategia vincente per abbattere i tempi ed i costi di produzione.

Il lavoro svolto in questo lavoro di tesi pone anche buone basi per successive fasi di otturazione e ricerca. Una possibile e interessante evoluzione del prototipo potrebbe prevedere un processo di anodizzazione del supporto di alluminio. Questo tipo di trattamento superficiale consentirebbe di innalzare significativamente il coefficiente di emissività del metallo, in questo modo si aumenterebbe molto la quantità di calore scambiata per irraggiamento verso l'ambiente esterno. In alternativa, dal punto di vista costruttivo, si potrebbe valutare l'introduzione di appositi materiali d'interfaccia termica (come paste termoconduttive ad alta efficienza). L'utilizzo di questi elementi tra le

pareti del supporto e la telecamera potrebbe abbattere la resistenza termica di contatto andando a colmare i microscopici giochi geometrici superficiali. Infine, si potrebbe estendere la durata dei test di laboratorio, per avere una migliore validazione sperimentale. Condurre campagne di monitoraggio superiori, per esempio, alle quattro ore di funzionamento continuo, permetterebbe di avvicinarsi di più agli scenari industriali reali caratterizzati da cicli di produzione ininterrotti sulle ventiquattro ore.

7. Bibliografia

Sistemi di visione, termografia e illuminazione industriale

[1] Demant, C., Streicher-Abel, B., and Waszkewitz, P., Industrial Image Processing: Visual Quality Control in Manufacturing, Berlin: Springer-Verlag.

[2] Baumer Group, "Operating principle and features of CMOS sensors", Technical Article. (Link: <https://www.baumer.com/it/en/service-support/function-principle/operating-principle-and-features-of-cmos-sensors/a/EMVA1288>).

[3] Teledyne DALSA, "Genie Nano Series: User's Manual", Manuale Tecnico. (Link: https://www.1stvision.com/cameras/dalsa/dataman/Nano_Series_User.pdf).

[4] Segura, J. and Hawkins, C. F., CMOS Electronics: How It Works, How It Fails, John Wiley & Sons. (Link: https://docs.amprnuts.ru/eevblog.docs/_Books/ASIC_Design/cmos%20electronics%20%28segura%2Chawkins-2004%29.pdf).

Fondamenti di scambio termico e formule di dimensionamento

[5] Bar-Cohen, A. and Rohsenow, W. M., "Thermally Optimum Spacing of Vertical, Natural Convection Cooled, Parallel Plates," Journal of Heat Transfer.

[6] Çengel, Y. A. and Ghajar, A. J., Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, 5th ed. New York: McGraw-Hill.

[7] Farina, A., "Dispense di Fisica Tecnica: Convezione e Scambio Termico," Università degli Studi di Parma (Link: <https://angelofarina.it/Dispense02/048.pdf>).

[8] Kraus, A. D., Aziz, A., and Welty, J., Extended Surface Heat Transfer, New York: John Wiley & Sons.

Ricerche sulla dissipazione passiva e componenti hardware

[9] Fischer Elektronik GmbH, "Extruded profiles for cooling aggregates and electronics cooling," Technical Datasheet (Link: <https://www.farnell.com/datasheets/3317467.pdf>).

[10] Raza, S. S., et al., "Passive thermal management techniques for high-performance electronic components: a review," RSC Advances (Link: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/ra/d4ra05845c>).

[11] "Advanced passives and thermal management architectures for industrial sensing electronics," Case Studies in Thermal Engineering (Link: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542529325003384>).

Immagini

[12] Teledyne Vision Solutions, "Genie Nano 1 GigE (G3-GM11-M2420) Camera Specifications", Scheda Prodotto. (Link: <https://www.teledynevisionsolutions.com/>

products/genie-nano-1-gige/?model=G3-GM11-M2420&vertical=tv-s-dalsa-oem&segment=tv-s).

[13] Ento Supplies, "Diffused LED Dome Illuminator for Microscopy – Operational Principles and Optical Path," Component Specifications (Link: <https://www.entosupplies.com.au/equipment/magnification/microscopes-accessories/diffused-led-dome-illuminator-for-microscope/>).

Appendice A: Codice sorgente in Python per l'analisi termografica

In questa appendice viene riportato il codice sorgente integrale sviluppato in ambiente Python per l'elaborazione dei dati sperimentali descritti nel Capitolo 3. Il programma permette l'acquisizione sequenziale dei file esportati dal software *IRSOF*T, l'estrazione interattiva della Region of Interest (ROI) e il calcolo della media spaziale per la generazione della curva di riscaldamento temporale.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.widgets as widgets
import os
import tkinter as tk
from tkinter import filedialog

# --- 1. SELEZIONE CARTELLA ---
root = tk.Tk()
root.withdraw()
# Forza la finestra in primo piano
root.attributes("-topmost", True)

folder_path = filedialog.askdirectory(title='Seleziona la cartella con i file Excel')

if not folder_path:
    print("Errore: Nessuna cartella selezionata. Esco.")
    exit()

file_list = sorted([f for f in os.listdir(folder_path) if
f.endswith('.xlsx')])

if len(file_list) < 1:
    print(f"Errore: Non ho trovato file Excel in: {folder_path}")
    exit()

print(f"File trovati: {len(file_list)}")
for f in file_list: print(f" - {f}")

# --- 2. FUNZIONE CARICAMENTO ---
def load_data(file_index):
    file_path = os.path.join(folder_path, file_list[file_index])
    # Se i dati iniziano subito (senza scritte), va bene header=None
    df = pd.read_excel(file_path, header=None)
    return df.to_numpy()

# Carica il primo per scegliere l'area
first_frame = load_data(0)

# --- 3. INTERFACCIA DI SELEZIONE ---
fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 8))
ax.set_title("1. Trascina un rettangolo sulla zona da analizzare\n2. Chiudi questa finestra per avviare il calcolo")
img = ax.imshow(first_frame, cmap='inferno')
plt.colorbar(img, label='Temperatura (°C)')

roi_coords = {"x": 0, "y": 0, "w": 0, "h": 0}
```

```

def onselect(eclick, erelease):
    roi_coords["x"] = int(min(eclick.xdata, erelease.xdata))
    roi_coords["y"] = int(min(eclick.ydata, erelease.ydata))
    roi_coords["w"] = int(abs(eclick.xdata - erelease.xdata))
    roi_coords["h"] = int(abs(eclick.ydata - erelease.ydata))

rect_selector = widgets.RectangleSelector(ax, onselect, useblit=True,
                                          button=[1], interactive=True)

plt.show()

# --- 4. CALCOLO MEDIA SUI FILE ---
temperatures_mean = []

print("\nElaborazione in corso...")
for i, filename in enumerate(file_list):
    data = load_data(i)
    # Taglia la matrice usando le coordinate scelte
    x, y, w, h = roi_coords["x"], roi_coords["y"], roi_coords["w"],
    roi_coords["h"]
    roi = data[y:y+h, x:x+w]

    mean_temp = np.nanmean(roi)
    temperatures_mean.append(mean_temp)
    print(f"Analizzato {filename}: {mean_temp:.2f}°C")

# --- 5. GRAFICO FINALE ---
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(file_list, temperatures_mean, marker='o', color='red', linewidth=2)
plt.xticks(rotation=45, ha='right')
plt.title("Variazione Temperatura Media nell'Area Selezionata")
plt.ylabel("Temperatura (°C)")
plt.xlabel("File")
plt.grid(True, linestyle='--')
plt.tight_layout()
plt.show()

```