

TERMOGRAFIA PASSIVA

In generale la termografia è una tecnica di rilevamento delle temperature superficiali attraverso la scansione delle radiazioni elettromagnetiche emesse da un corpo nel campo degli infrarossi. In particolare la **termografia passiva**, non si avvale di nessuna fonte artificiale di irraggiamento per rilevare la temperatura di un corpo.

- ✓ non richiede contatto con l'oggetto
- ✓ fornisce una mappa delle temperature offrendo una visione di insieme
- ✓ misure qualitative di immediata interpretazione
- ✓ non richiede l'uso di radiazioni pericolose (ad esempio i raggi X)

MEMO: TRASFERIMENTO DI CALORE

IPTD:

$$\sum E_o - \sum E_i + \Delta E_s = 0$$

Energia immagazzinata nel sistema

Energia in ingresso nel sistema

Energia totale uscente dal sistema

LEGGE DI FOURIER:

$$q_x = -kA_x \frac{dT}{dx}$$

Normale alla direzione di propagazione x

Conducibilità termica [W/(m²*K)]

IRRAGGIAMENTO:

Trasferimento di calore elettromagnetico: a causa dei movimenti rotazionali delle particelle è emessa energia elettromagnetica (legge di Planck)

$$q_r = \bar{h}_r A_s (T_s - T_r)$$

Temperatura della superficie

Temperatura del ricevitore

Calore radiato

Superficie della sorgente

Costante di Planck 5.679*10⁸ [W/(m²K⁴)]

$$\bar{h}_r = \sigma F_{s-r} \frac{T_s^4 - T_r^4}{T_s - T_r}$$

Fattore di forma della radiazione

CONVEZIONE:

In questo caso lo scambio di calore avviene da una superficie mediante l'azione di un fluido; per considerare tutte le variabili annesse al processo si è elaborato un modello matematico semplificato.

Tasso di calore scambiato per convezione

$$q_c = \bar{h} A_s (T_s - T_f)$$

Temperatura del fluido

Coefficiente di scambio convettivo medio

Temperatura della superficie

CAPACITA' TERMICA

Energia necessaria ad un corpo in determinate condizioni per innalzare di un grado la sua temperatura (varia per ogni oggetto).

CALORE SPECIFICO

E' la capacità termica per unità di massa

CAPACITA' TERMICA VOLUMETRICA

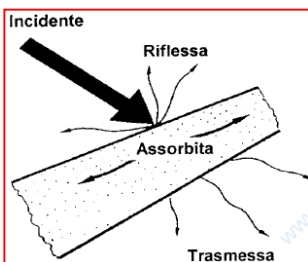
E' la capacità termica per unità di volume, ovvero il calore specifico moltiplicato per la densità.

PRINCIPIO FISICO

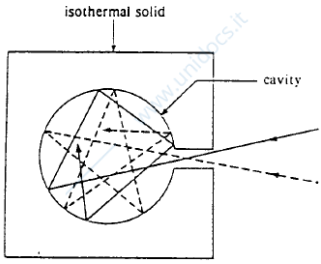
- Il principio fisico alla base di questa tecnica è l'**irraggiamento termico**, per cui ogni corpo, in funzione della propria temperatura, ha un certo livello di emissioni elettromagnetiche
- due corpi a differenti temperature possono irraggiarsi a vicenda, presupponendo che il mezzo in cui si trovano sia sufficientemente trasparente alle suddette radiazioni
- in base al tipo di corpo che viene irraggiato si hanno differenti comportamenti nei confronti delle radiazioni e nello specifico possiamo assistere a 2 casi:
 - **CORPO AERIFORME**: emette/assorbe a **lunghezze d'onda discrete** (spettro a righe)
 - **CORPO CONDENSATO (liquido o solido)**: **spettro di emissione/assorbimento è continuo**, proveniente da molecole a distanza < 1 [µm]

CORPO RICEVITORE

Il fascio di energia radiante che incide sul corpo può avere 3 diversi comportamenti su di esso: può essere trasmesso, ovvero attraversare il corpo (t), riflesso (r) o assorbito (a). Questi comportamenti non si verificano in maniera esclusiva, ma possono avvenire in modo contemporaneo, per cui per la conservazione dell'energia possiamo scrivere che **r+a+t=1**



CORPO NERO

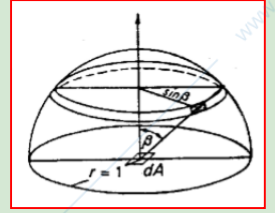


- Si definisce corpo nero, un corpo che assorbe tutta l'energia che lo colpisce, per cui $r=0$ e $t=0$, quindi $a=1$. Poichè è difficile riprodurre un corpo di questo tipo, si può approssimare a tale comportamento una cavità accessibile da una stretta fenditura.
- Considerando una superficie radiante elementare dA di un corpo nero, questa emetterà una radianza costante I , per cui la potenza radiante che insiste sull'angolo solido elementare è pari a:

$$dW = \int_{\Omega} I dA \cos\beta d\Omega$$

mentre per un'intera semisfera di raggio unitario la densità di flusso E sarà data da:

$$E = \frac{dW}{dA} = \int_0^{\pi/2} I \cos\beta 2\pi \sin\beta d\beta = \pi I$$



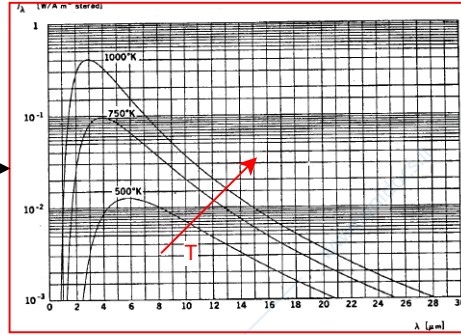
- In base alla temperatura a cui si trova il corpo nero, esisterà una certa lunghezza d'onda, per la quale si avrà la radianza massima e tale picco segue la cosiddetta **legge dello spostamento di Wien**, per cui è vero che:

$$\lambda_M T = 2.898 \cdot 10^7 [\text{\AA} \cdot \text{K}]$$

N.B.: $1\text{\AA} = 10^{-7} \text{ mm}$

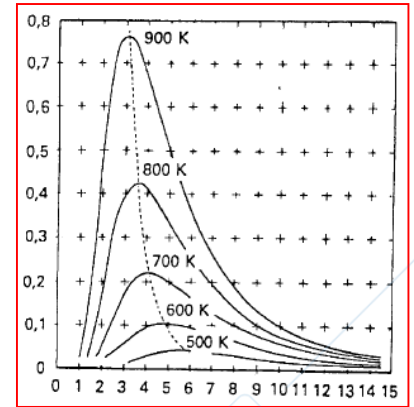
$$I_{\lambda} = \frac{U_{\lambda} c}{4\pi} = \frac{4hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc_0/kT\lambda} - 1}$$

RADIANZA SPETTRALE



$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \pi \cdot I_{\lambda} d\lambda = \sigma \cdot T^4$$

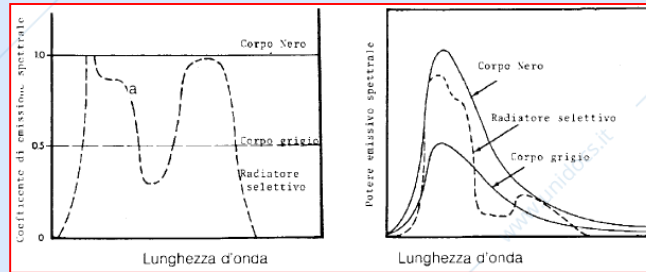
RADIANZA PER UNITA' DI AREA



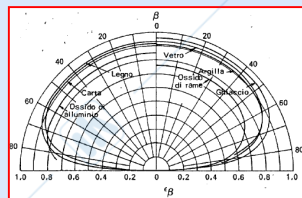
SUPERFICIE REALE

- Nella realtà un corpo non emette la stessa energia di un corpo nero, ragion per cui si definisce l'**emittanza**, che è il rapporto tra la potenza totale emessa dal corpo reale e quella che avrebbe emesso se fosse un corpo nero (a parità di temperatura), per cui vale la seguente relazione, dove ϵ è l'emittanza:

$$E = \int_{\infty} \epsilon E_{\lambda} d\lambda = \epsilon \sigma T^4$$



- L'emissività di un conduttore tende ad aumentare con la temperatura, mentre quella di un non conduttore tende a diminuire
- L'emissività è anche funzione della direzione di emissione dell'energia (intorno ai 90° cala bruscamente)

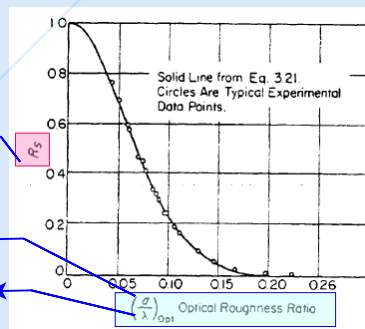


- Se la rugosità è molto accentuata potrebbero determinarsi fenomeni di interriflessione con conseguenti assorbimenti multipli:

Coefficiente di riflessione speculare $R_s = 1 - \epsilon$

Rugosità ottica

Lunghezza d'onda della radiazione incidente

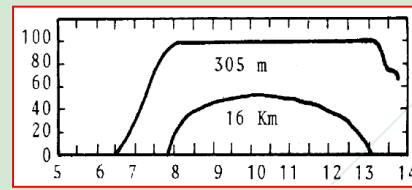
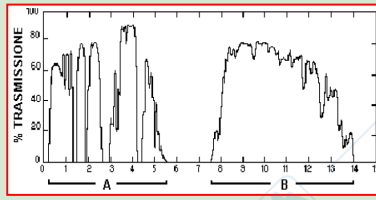


Zone a minore rugosità, hanno una riflettività maggiore, quindi un'emissività minore, per cui zone arrugginite o comunque ossidate emettono di più rispetto al normale!!!

Per il principio di Kirchoff possiamo dire che $\epsilon = a$ e $t = 0$, essendo che i corpi sono opachi agli infrarossi, per cui è vero che $\epsilon + r = 1$. In altre parole superfici riflettenti hanno bassa emissività e superfici rugose, ossidate, verniciate, ecc, hanno invece elevati valori di emissività.

MEZZO INTERPOSTO

- Il mezzo che principalmente si interpone tra i corpi durante le prove è l'**aria**, che presenta dei range di lunghezze d'onda in cui è trasparente agli infrarossi, mentre altre in cui è opaca; i suddetti range di trasparenza prendono il nome di "**finestre atmosferiche**" e sono: **2÷5 μm** e **8÷14 μm**. In questi intervalli l'onda infrarossa si può trasmettere in maniera particolarmente efficiente;
- si introduce quindi il parametro τ , che prende il nome di **trasmissione**: fino qualche decina di metri si può approssimare a 1, dopo di che bisogna considerarla.



UTILIZZO DELLA TERMOCAMERA PER MISURARE LA TEMPERATURA

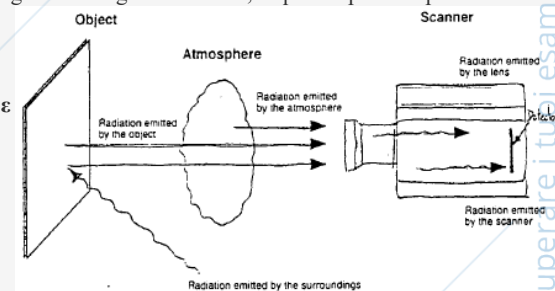
La termocamera possiede un **infrared detector**, il quale converte un segnale che giunge sotto forma di energia in un segnale elettrico, il quale è poi interpretato. Vi sono 3 componenti che principalmente influiscono nella rilevazione esatta della temperatura:

- L'atmosfera in cui è effettuata la rilevazione, che è responsabile del termine $(1-\tau)I(T_{atm})$
- L'oggetto di cui effettivamente si deve misurare la temperatura, responsabile del termine $I(T_{obj})\tau\epsilon$
- L'energia riflessa dal resto del mondo sul nostro oggetto, responsabile del termine $\tau(1-\epsilon)I(T_{amb})$

In generale quindi si scrive che $I_m = I(T_{obj})\tau\epsilon + \tau(1-\epsilon)I(T_{amb}) + (1-\tau)I(T_{atm})$

Quindi è possibile misurare la temperatura reale solo se si conoscono i seguenti parametri:

- L'emissività dell'oggetto ϵ
- la temperatura degli oggetti disposti di fronte alla superficie analizzata e che su riflettono su essa T_{rif}
- La distanza tra superficie e termocamera
- la temperatura atmosferica T_{atm}
- l'umidità relativa



PROCEDURA PER LA STIMA DI ϵ

Per avere una misura precisa della temperatura tramite la termocamera, che ricordiamo misura principalmente la radianza emessa da un corpo, è necessario configurare correttamente i parametri oggetto, in particolare in questa procedura si agisce sull'emissività, sulla trasmittanza dell'aria, sulla distanza corpo-camera e sulla temperatura apparente riflessa, al fine di ottenere una rilevazione veritiera della temperatura dell'oggetto.

STEP 1: posizioniamo il provino su cui è stato incollato del nastro isolante ($\epsilon=0.95$) e mettiamo a fuoco la termocamera, utilizzando un oggetto riflettente con bordi netti;

STEP 2: allo scopo di valutare la **temperatura apparente riflessa**, posizioniamo davanti al provino un foglio di carta stagnola stropicciato. Impostiamo nei parametri oggetto emissività pari a 1 e distanza pari a 0 ($\tau_{atm}=1$ di conseguenza). Così facendo consideriamo il solo contributo della radianza data dall'ambiente circostante sul nostro oggetto.

STEP 3: rileviamo la temperatura apparente riflessa interrogando il software su una zona della stagnola; una volta determinata la suddetta temperatura, la inseriamo nei parametri oggetto;

STEP 4: riscaldiamo uniformemente il provino per aumentarne l'energia per far sì che la radiazione emessa dall'oggetto sia maggiore di almeno 5 volte il contributo riflesso; dopo il riscaldamento scattiamo una foto alla situazione attuale.

STEP 5: avendo imposto $\epsilon=0.95$ per il nastro isolante, interroghiamo il software, il quale ci restituirà l'esatta temperatura solo per il nastro isolante. Considerando che la temperatura dovrà essere uniforme su tutta la superficie, interroghiamo il software su altre aree ipotizzando in maniera iterativa il valore di ϵ , fino a ottenere lo stesso valore di temperatura media del nastro. Fatto ciò tutte le temperature rilevate saranno quelle effettive.

RIPARTIZIONE DI POTENZA

- Dal momento in cui il contributo dell'atmosfera è quasi sempre trascurabile, spesso si considerano i 2 rimanenti, ovvero ciò che arriva dall'oggetto e ciò che arriva dall'ambiente per riflessione sull'oggetto, che fanno riferimento rispettivamente ai termini $\epsilon\sigma T_{obj}^4$ e $(1-\epsilon)\sigma T_{refl}^4$
- Finché il primo termine rimane più di circa 5 volte il secondo, la misurazione della temperatura può essere fatta senza difficoltà, ma se si assottiglia la differenza tra le 2 quantità (per causa delle temperature o dell'emissività), non si riesce più a distinguere ciò che emette l'oggetto da ciò che emette l'ambiente circostante, e quindi la misura diventa più una stima.
- in caso di misurazioni che prevedano la presenza della nebbia o fumo, si deve obbligatoriamente fare riferimento all'atmosfera, che in questo caso assorbirà e rifletterà una quantità di energia non indifferente e condizionerà la misura finale in modo non trascurabile

TIPOLOGIE DI SENSORI

Fotonici

Radiazione viene direttamente convertita in segnale elettrico

- Fotoelettrici
- Fotoconduttivi
- Fotovoltaici
- Fotoelettromagnetici

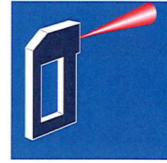
Termici

La radiazione scalda ogni cella del sensore e viene rilevata la variazione di temperatura

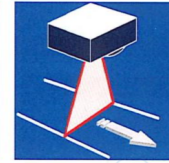
- Thermopile
- Bolometro
- Golay cell
- Piroeletttrici

L'infrared detector è il componente fondamentale di un dispositivo termografico, e se ne possono trovare di diversi tipi:

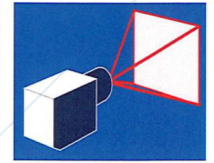
- **Detector puntuale:** sensibile all'irradianza media di un solo punto, quindi viene creato un segnale proporzionale all'intensità media della radiazione; per creare un'immagine è necessario scansionare punto per punto in modo sequenziale
- **Detector Focal Plain Array (FPA):** costituito da una miriade di sensori puntuali, riesce a rendere un fotogramma termico completo



Pirometro puntuale.



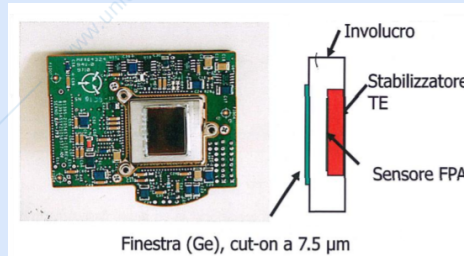
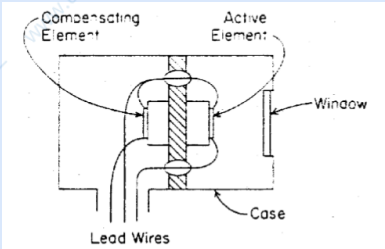
Sensore IR lineare.



Camera a infrarossi.

BOLOMETRO

Il suo funzionamento si basa su un materiale la cui temperatura è fortemente correlata con la sua resistività: questo materiale è utilizzato per una resistenza attiva di un circuito ponte che possiede anche una resistenza di compensazione; quando la resistenza attiva viene colpita dalle radiazioni, la sua temperatura si innalza, quindi anche la resistenza: tale differenza di resistenze viene rilevata e trasformata in un dato di temperatura

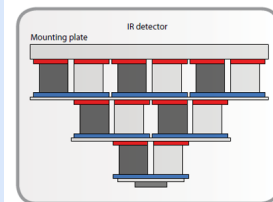


Finestra (Ge), cut-on a 7.5 μm

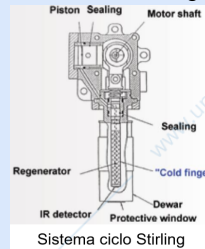
SENSORI FOTONICI: PRINCIPIO FISICO

Come detto un rivelatore fotonico trasforma energia elettromagnetica in ingresso in un segnale elettrico: questo avviene tramite l'utilizzo di materiale semiconduttore (**silicio, arseniuro di indio o antimoniuro di indio**), il quale presenta degli elettroni in banda di valenza e in banda di conduzione. Per fare un modo da tenere allo stato iniziale tutti gli elettroni in banda di valenza, si sottrae energia tramite raffreddamento. In questo modo, appena viene somministrata energia al suddetto materiale, alcuni elettroni potranno saltare in banda di conduzione e questo avverrà in maniera proporzionale ai fotoni che andranno a colpire il semiconduttore. In base all'efficienza richiesta sono stati elaborati negli anni diversi metodi di raffreddamento come:

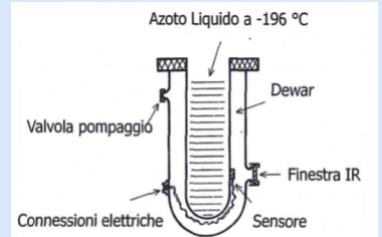
- L'effetto Peltier
- Il ciclo Stirling
- Il vaso di Dewar



Celle Peltier (3 stadi)



Sistema ciclo Stirling

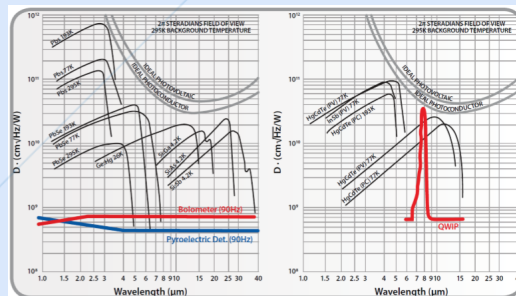


Conessioni elettriche

In ogni caso si definisce **lunghezza d'onda di cut-off**, la lunghezza d'onda associata alla minima energia per determinare il salto di un elettrone in banda di conduzione

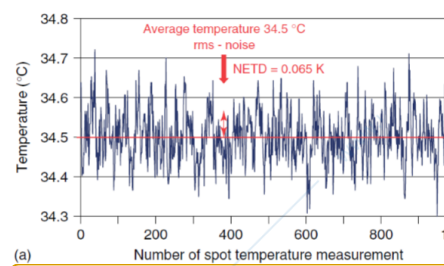
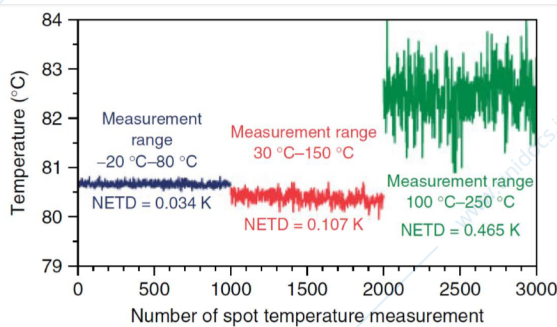
NOISE EQUIVALENT POWER (NEP)

Ogni tipologia di sensore presenta un rumore di fondo, per cui il segnale in ingresso per essere distinguibile dovrebbe essere maggiore di quel valore. Nella pratica però si usa la **Detectivity (D*)**, ovvero il reciproco del NEP, correlato con la radice quadrata dell'area del detector.

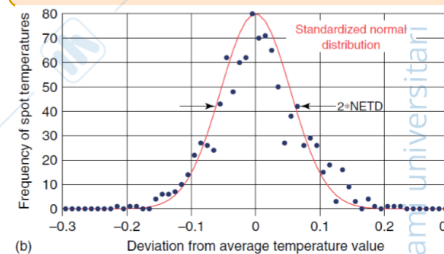


ALTRI PARAMETRI

- NETD = Noise Equivalent Temperature Difference.
- L'NETD, caratterizza la *risoluzione termica* e la *capacità* di misurare piccole differenze di temperatura, viene chiamata anche *sensibilità*.
- Normalmente viene definita per una temperatura dell'oggetto di 30 °C.
- Se l'NETD dovesse ad esempio essere rilevata per una temperatura dell'oggetto di 50°C, il valore sarebbe inferiore e cioè migliorativo.
- La procedura operativa per il calcolo dell' NETD è specificata negli standard ASTM 1543. E' valida solamente per sistemi a scansione analogici.

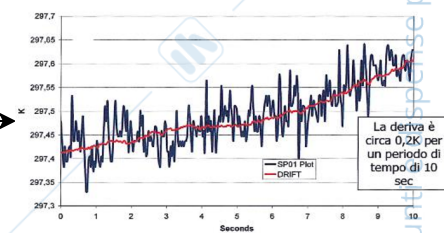


L'NETD diminuisce (ovvero migliora) all'aumentare della temperatura, considerando che il rumore è costante



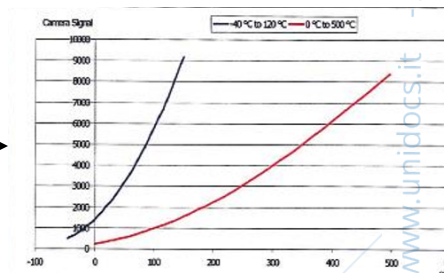
DERIVA TERMICA

Fenomeno che riguarda il singolo pixel e consiste nella variazione del valor medio del segnale in uscita anche se l'oggetto puntato è stabile; il problema è compensato tramite software



CALIBRAZIONE

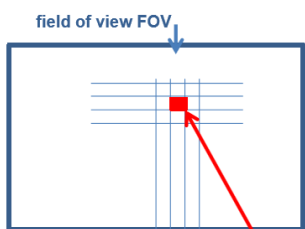
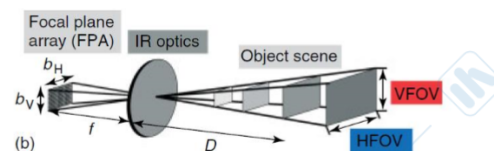
Consiste nell'associare alla radiazione misurata la sua temperatura di riferimento: si posiziona la camera IR di fronte a sorgenti di temperatura campione (corpi neri). N.B.: LA CURVA DI CALIBRAZIONE E' VALIDA SOLO PER UN CAMPO DI TEMPERATURA E PER UNA SOLA CONFIGURAZIONE DI OTTICA.



CAMPO VISIVO

FOV: Misura in gradi del lato più lungo dell'immagine (se rettangolare).

IFOV: Misura angolare espressa in *mrad* che rappresenta la dimensione del sensore proiettata attraverso la lente.



Sappiamo che l'immagine (che rappresenta il campo visivo) è formata da pixel e ogni pixel ha una certa misura all'interno dell'immagine, appunto l' IFOV

In teoria per una misura corretta, l'oggetto dovrebbe avere una dimensione pari alla proiezione del pixel, ma questo non accade, anzi si verificano anche fenomeni come diffusione di un pixel su altri pixel. La reale dimensione di misura è $>$ del IFOV e viene indicata come MFOV (measurement field of view) e può essere misurato in modi:

- SRF (slut response function), che fornisce un risultato monodimensionale (per vecchie termocamere analogiche o attuali dotate di staring arrays)
- HRF (hole response function), che fornisce un risultato bidimensionale, usato per telecamere dotate di matrici di sensori

Come minimo **in teoria** $MFOV \geq 2 \text{ IFOV}$ ma normalmente il vero valore è $MFOV = 3\div 5 \text{ IFOV}$ in base alla qualità del sensore e del sistema ottico.

Un parametro anche importante è l'SSR (spot size ratio), che si ottiene con il metodo HRF e corrisponde al MFOV espresso come funzione della distanza quindi $SSR=110:1$ vuol dire che lo strumento permette di misurare oggetti la cui dimensione è $1/110$ della distanza termocamera-oggetto. in ogni caso, in condizioni simili sarebbe meglio avere **il più alto valore di SSR e minima distanza focale possibile**

Per misurare correttamente la temperatura di un piccolo oggetto si può:

- Usare una camera con buon numero di pixels
- sostituire l'obiettivo con uno più appropriato
- avvicinarsi all'oggetto

