

# INTRODUZIONE

La termografia è una metodica diagnostica basata sulla acquisizione spazio-temporale d'immagini derivanti dalla emissione diversificata di radiazioni infrarosse da parte di un qualsiasi corpo allo stato solido, liquido o gassoso con temperatura superiore allo zero assoluto (-273,15 gradi Celsius). Essa trova oggi molteplici applicazioni quali: edilizia, sicurezza notturna, tutela dell'ambiente, restauro etc.

Leggere un termogramma significa interpretarlo e questo potrà farlo solo chi disponga di competenze adeguate. È per tale motivo che in numerosi Paesi è anche oggetto d'insegnamento, con il rilascio di attestati che abilitano all'esercizio della professione nei suoi più molteplici aspetti, compresi quelli inerenti alle attività bio-mediche: è considerata, pertanto, una disciplina autonoma disgiunta da altre, sia per le sue molteplici potenzialità operative, che per i presupposti teorici e pratici su cui si fonda.

Nella diagnostica medica consente principalmente di riconoscere e monitorare eventuali patologie circoscritte o diffuse misurandone le corrispettive variazioni termiche: in particolare, l'aumento della temperatura è riconducibile ad un maggior afflusso di sangue arterioso, mentre quello venoso contribuisce a ridurla.

Il sintomo calore ha radici storiche remote.

Già in un papiro del VII secolo A.C scoperto a Luxor, si asseriva che l'aumento termico caratterizzava una ferita malsana (oggi si direbbe infetta o suppurata), mentre da Ippocrate in poi (460-399 A.C.) ogni variazione calorica abnorme è stata presa a parametro di gravità nei confronti di patologie localizzate o diffuse.

Oltre a conoscenze teorico-pratiche di fisica del calore (termodinamica), nelle applicazioni mediche sono da considerare anche altri parametri come, in particolare, tutti quei fattori estranei o insiti all'organismo che possono interferire sulle complesse attività metaboliche di organi o tessuti (omeostasi).

Essendo, infatti, una metodica estremamente sensibile, è necessario che gli esami si svolgano in condizioni ambientali esterne adeguate e che i pazienti – prima dell'indagine – evitino comportamenti che potrebbero interferire sui delicati assetti metabolici dell'organismo.

Esistono, pertanto, parametri generici da rispettare e protocolli specifici per ciascuna tipologia d'esame ai quali un operatore preparato deve attenersi.

In USA viene definito “*thermologist*” uno specialista che legge e interpreta un termogramma ed è esperto nella identificazione di due simmetrici modelli di calore (“*heat patterns*”), ma sa anche distinguere le varianti anomale da quelle appartenenti al “*range*” della normalità.

Quale sia il “*limite fra normale e patologico*” è un problema che, in medicina, riguarda tutte le modalità diagnostiche e, fra queste, in particolare, la “*diagnostica per immagini*”.

L'affinamento delle tecnologie, soprattutto in ambito neoplastico – lungi da averlo risolto – ha creato, invece, nuove incertezze.

Spesso, in passato, il primo accertamento di un tumore portava quasi sempre all'ovvia conclusione di una patologia evolutiva irreversibile.

Oggi sappiamo, invece, che non sempre individuare delle *lesioni molto piccole* offre vantaggi.

**In generale:** perché il rilevamento di patologie minimali comporta un aumento delle incertezze diagnostiche e, dovendosi poi accedere a successive indagini, anche dei disagi per i pazienti e della spesa sanitaria.

**In particolare:** perché soprattutto al livello oncologico molte di queste mini-lesioni non sempre evolvono.

Si parla in tali casi di “*overdiagnosi*”, e – se poi sono curate – di “*overtrattamento*”.

La termografia è un'indagine altamente sensibile che, soprattutto in ambito tumorale, precede l'oggettiva visibilità radiografica e la successiva conferma istologica.

Pertanto, se ne potrebbe criticare l'utilità: infatti il suo impiego aumenterebbe notevolmente il numero delle “*overdiagnosi*”.

Trova maggiori applicazioni, invece, sia a scopo preventivo che per seguire e monitorare il decorso di patologie oncologiche già diagnosticate, soprattutto se in corso di trattamento.

In altre patologie, le overdiagnosi costituiscono un problema meno importante ed il poter riconoscere anomalie minimali – anche se talora solo potenzialmente nocive – offre spesso vantaggi.

Così, ad esempio, il rilevamento nel cosiddetto “ *piede diabetico*” – in assenza di alterazioni esterne visibili – di variazioni termiche di superficie prefigura già una situazione “*di rischio*” consentendo di prevenire, in molti casi con semplici e innocui accorgimenti, la comparsa di focolai di necrosi ischemica nei confronti dei quali le successive cure sarebbero assai più complesse.

Tali generiche e parziali considerazioni devono indurci a riflettere.

L'impiego della termografia in medicina, come altre metodiche d'indagine, presenta limiti e vantaggi e, pertanto, similmente ad esse, deve applicarsi seguendo regole e comportamenti predefiniti.

Da noi mancano professionisti qualificati ma, soprattutto, contrariamente ad altri Paesi, non è ufficialmente riconosciuta e integrata nella sanità pubblica.

Se si considera che solo negli Stati Uniti, oltre ad essere accettata come metodica diagnostica dalla FDA<sup>1</sup>, esistono oltre 170 centri di termografia medica operanti sul territorio, s'intuisce l'enorme divario che ci separa da essi.

1	FISICA E TEORIA DEI RAGGI INFRAROSSI
2	STRUMENTAZIONI
3	IMAGE PROCESSING
4	TRASFERIMENTO DEL CALORE
5	TEST STATISTICI IN MEDICINA
6	LA TERMOGRAFIA IN MEDICINA
7	APPLICAZIONI
8	ESEMPI
9	IRT NELLE PATOLOGIE A IMPATTO MAGGIORE
10	IRT FETALE, NEONATALE E PEDIATRICA
11	SU ALTRE APPLICAZIONI
12	PROSPETTIVE FUTURE
13	CONCLUSIONI
14	DALLA CASISTICA PERSONALE
	CONSIDERAZIONI
	APPENDICE

P.S.



Quale “*Riferimento nazionale per tutti gli operatori di termografia ad infrarossi*”, in Italia, si è di recente costituita l’AITI (Associazione Italiana Termografia Infra-rossi) con sede a Castelfranco Veneto (TV), il cui scopo, fra l’altro, è di: “*Svolgere, promuovere, confrontare, diffondere e coordinare nel miglior modo ogni tipo di attività inerente alla termografia, incluse tutte le attività ad essa finalizzate*”.

Principali settori applicativi svolti dall’AITI: *Industria, Edilizia, Restauro, Medicina.*

1. Food and Drug Administration: Manufactures registration number 3006111110.

Per supporto informatico si ringrazia: Fatou Thiam.

## 1

# FISICA E TEORIA DEI RAGGI INFRAROSSI

## ALCUNE DEFINIZIONI

- **Termografia** – È una tecnologia che permette di misurare le *radiazioni infrarosse* emesse dalla superficie esterna di un corpo e di tradurle in immagini. I raggi infrarossi sono una forma di energia non visibile all'occhio umano che fa parte dello spettro elettromagnetico.
- **Calore di un corpo** – La radiazione termica che ne deriva è detta *temperatura* e viene generalmente misurata in gradi Kelvin (K), Celsius (°C) o Fahrenheit (°F). Essa coincide con la “*misura*” dell'energia cinetica media interna di un corpo creata dal moto caotico di traslazione, rotazione e vibrazione delle particelle (molecole, atomi) che compongono un qualsiasi oggetto.
- **Gradi Kelvin** – A 0 Kelvin nessun corpo emette calore (0 Kelvin = - 273,15 Gradi Celsius).
- **Secondo principio della termo-dinamica** – In un *sistema aperto* l'energia (calore) si trasferisce in modo irreversibile da un corpo più caldo a uno più freddo; tale processo è legato alla freccia del tempo e dipende dal prevalente afflusso di particelle dalle zone più calde a quelle meno calde. Spiega perché la termografia può evidenziare tessuti e organi anche posti sotto la pelle – purché con diversa temperatura – oltre a segnalare eventuali patologie con valori termici diversi da quelli dei tessuti sani circostanti.  
In un *sistema isolato* gli scambi si equivalgono fra le singole parti e si crea un *equilibrio termico*.
- **Corpo nero** (concetto introdotto da G. Kirchhoff nel 1860) – È un modello di *corpo ideale* che *assorbe tutta* la radiazione elettromagnetica che incide su di esso e appare nero in quanto non vi è *alcuna radiazione emessa riflessa*. Si distingue da tutti gli altri perché, a parità di temperatura, emette *la più elevata quantità di energia di ogni lunghezza d'onda*.
- **Regola di Prevost** (1809) – “*Se due corpi assorbono quantità di energia diverse anche l'emissione di energia deve essere diversa*”.  
Spiega perché un corpo nero, rispetto a tutti gli altri, emette l'energia massima.
- **Riflettenza o riflettività** ( $p$ ) – La percentuale sul totale di energia emessa che viene riflessa direttamente.

1  
FISICA E TEORIA DEI RAGGI INFRAROSSI2  
STRUMENTAZIONI3  
IMAGE PROCESSING4  
TRASFERIMENTO DEL CALORE5  
TEST STATISTICI IN MEDICINA6  
LA TERMOGRAFIA IN MEDICINA7  
APPLICAZIONI8  
ESEMPI9  
IRT NELLE PATOLOGIE A IMPATTO MAGGIORE10  
IRT FETALE, NEONATALE E PEDIATRICA11  
SU ALTRE APPLICAZIONI12  
PROSPETTIVE FUTURE13  
CONCLUSIONI14  
DALLA CASISTICA PERSONALE

CONSIDERAZIONI

APPENDICE

In un corpo nero la riflettenza è 0 mentre in un corpo altamente riflettente è prossima a 1.

- **Emissività o potere emissivo** ( $\epsilon$ ) – Misura la capacità di un materiale di emettere radiazione elettromagnetica in rapporto a quella emessa da un corpo nero alla sua stessa temperatura.

$$\text{Emissività } (\epsilon) = \frac{\text{radiazione emessa da un oggetto alla temperatura } T}{\text{radiazioni emesse da un corpo nero alla temperatura } T}$$

Il potere emissivo di un corpo dipende da vari elementi, ma principalmente dalle caratteristiche del materiale o dei materiali che lo compongono e della sua superficie emittente.

*Un perfetto emittente s'identifica con un corpo nero.*

In un corpo nero la emissività è uguale 1 (100%).

In tutti gli altri (corpi reali) è compresa fra 0 e 1 ( $< 1$ ).

Essendo poi (Kirchhoff)  $\epsilon + p = 1$ , ne consegue che quando la emissività è elevata la riflettenza è bassa ( $p = 1 - \epsilon$ ) e viceversa ( $\epsilon = 1 - p$ ).

*Negli oggetti reali* la cui emissività calcolata sia  $\geq 0,8$  la riflettenza è considerata 0 (1 - 0,8).

Ad es., l'alluminio puro (la cui superficie lucida è altamente riflettente) ha una emissività di circa lo 0,04% (prossima, cioè, a 0), mentre la pelle umana ha una emissività di circa lo 0,98% (0,98%  $\pm$  0,01 secondo Steketee<sup>1</sup>). Pertanto, essendo  $\epsilon$  quasi uguale a 1, la riflettenza per la pelle umana può considerarsi 0 (1 - 0,98).

- **Emissività massima** ( $\epsilon_{\max}$ ) – È il valore massimo della emissività in funzione della lunghezza d'onda ( $\lambda$ ).
- **Legge di Wien** ( $\lambda_{\max} = a/T$ ) – La legge di Wien (1893) consente di determinare la lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) alla quale si ha il massimo irraggiamento ( $\lambda_{\max}$ ) per ogni temperatura del corpo emittente, dove:  $a = 2,897... \times 10^{-3} mK$  rappresenta la costante di Wien e  $T$  la temperatura in  $K$ .
- **Costante di Boltzmann** ( $K_B$ ) – Trattasi di una costante di proporzionalità ricavata empiricamente che compare nella formula di Stefan-Boltzmann.  
*Il valore accettato è:  $1,38054 \times 10^{-23} J/K$ .*
- **Accuratezza** – È la capacità di uno strumento di riconoscere i valori termici di un oggetto.
- **Costante di Planck** ( $h$ ) – Trattasi di una costante fisica legata alla quantizzazione del mondo microscopico che compare nella legge di Planck.  
*Il suo valore attualmente conosciuto è:  $6,626 \times 10^{-27} J \cdot s$ .*
- **La legge di Planck** (1900) mette in relazione tre variabili: *temperatura* ( $T$ ), *energia irradiata* ( $q$ ) e *lunghezze d'onda* ( $\lambda$ ). Essa completa la legge di Wien di cui costituisce una estensione.

Nel mondo reale tutti gli oggetti emettono radiazioni con proprietà diverse ed hanno una emissività sempre minore di 1 ( $\epsilon < 1$ ).

La legge di Planck fa riferimento al *modello di corpo nero proposto da Kirchhoff* ( $\epsilon = 1$  e  $p = 0$ ). Tramite la legge di Planck, integrando l'intensità delle radia-

zioni emesse con le lunghezze d'onda, si ottiene lo *spettro elettromagnetico* della radiazione emessa e cioè: *la sua distribuzione spettrale*.

Tale spettro evidenzia come, aumentando le temperature, l'intensità emissiva massima ( $\epsilon_{\max}$ ) si sposta verso lunghezze d'onda sempre più corte. A temperature  $< 500$  K *si hanno solo radiazioni infrarosse con lunghezze d'onda di poco maggiori di 0,7  $\mu\text{m}$* .

*Quelle visibili (dal violetto al rosso) sono comprese fra 0,38 e 0,78  $\mu\text{m}$* .

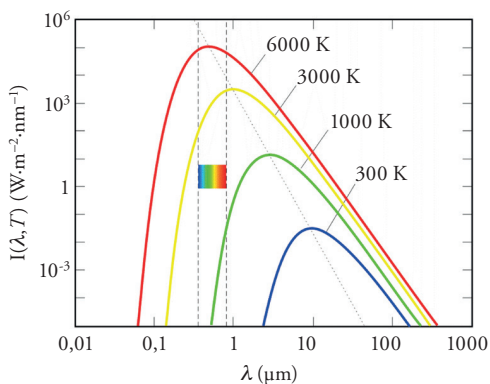
La temperatura della pelle umana – misurata in 28 aree diverse – varia fra 27,89 °C (301,04 K)  $\pm$  3,24 (calcagni) e 35 °C (308,15 K)  $\pm$  2,69 (regione frontale del volto)<sup>2</sup>. Essendo la sua emissività (0,98%  $\pm$  0,01) prossima a 1, le lunghezze d'onda delle radiazioni emesse sono in pratica riconducibili a quelle di un corpo nero alle sue stesse temperature e, quindi: *prevedibili attraverso le curve spettrali di Planck*.

### Legge di Planck

$$E(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

k = costante di Boltzmann  
 c = velocità della luce  
 h = costante di Planck  
 $\nu$  = lunghezza d'onda  
 T = temperatura  
[www.andreaminini.com](http://www.andreaminini.com)

### Curve spettrali di Planck



#### Distribuzione delle curve spettrali in un corpo nero.

Per temperature di circa 6000 K la emissività massima ( $\epsilon_{\max}$ ) occupa il *range* della luce visibile (fra 0,38 e 0,78  $\mu\text{m}$ ).

Per valori termici inferiori si sposta a destra nella fascia degli infrarossi (dove  $\lambda > 0,78 \mu\text{m}$ ).

In figura la linea obliqua indica i valori massimi di emissività al variare delle temperature.

La legge di Planck è importante nella fisica delle particelle elementari ed è alla base della meccanica quantistica.

Essa, inoltre, permette di implementare altre relazioni utili per ottenere previsioni teoriche e/o formalizzare leggi dedotte sperimentalmente.

Fra queste, **la legge di Stefan-Boltzmann** (1879) che consente di desumere dai valori delle radiazioni emesse quelli della temperatura.

Essa stabilisce, infatti, che:

- 1 FISICA E TEORIA DEI RAGGI INFRAROSSI
- 2 STRUMENTAZIONI
- 3 IMAGE PROCESSING
- 4 TRASFERIMENTO DEL CALORE
- 5 TEST STATISTICI IN MEDICINA
- 6 LA TERMOGRAFIA IN MEDICINA
- 7 APPLICAZIONI
- 8 ESEMPI
- 9 IRT NELLE PATOLOGIE A IMPATTO MAGGIORE
- 10 IRT FETALE, NEONATALE E PEDIATRICA
- 11 SU ALTRE APPLICAZIONI
- 12 PROSPETTIVE FUTURE
- 13 CONCLUSIONI
- 14 DALLA CASISTICA PERSONALE
- CONSIDERAZIONI
- APPENDICE

“L'energia irradiata emessa da un qualsiasi corpo nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta”.

$$q/\Delta t = \epsilon K_B S T^4$$

dove:  $q$  = energia irradiata;  $\epsilon$  = emissività del corpo;  $K_B$  = costante di Boltzmann;  $S$  = area del corpo in  $m^2$ ;  $T$  = temperatura assoluta del corpo in gradi Kelvin.

Pertanto, conoscendo  $\Delta t$ ,  $\epsilon$ ,  $S$  e  $K_B$ , e misurando  $q$  si possono ricavare i valori di  $T$ .

Ma ponendo:

$\epsilon = 1$  (emissività di un corpo nero);

$S = 1$  (unità di superficie),

la legge di Stefan-Boltzmann può essere così semplificata:

$$q = K_B T^4$$

ed essere enunciata come segue: “L'energia totale irradiata per unità di superficie da un corpo nero per unità di tempo è direttamente proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta”.

### Bio-Heat Transfer Equation (BHTE)

Il flusso sanguigno costituisce il meccanismo principale di trasferimento del calore; esso si distribuisce sia sulla pelle che nei tessuti profondi.

Tale processo può essere rappresentato da un'equazione, detta “equazione del bio-riscaldamento di Pennes”<sup>3</sup> la quale descrive le variazioni termiche dei tessuti in relazione al flusso sanguigno.

Sulla base di questa equazione sono stati sviluppati diversi importanti modelli matematici di bio-medicina (ad esempio per il trattamento radioterapico dei tumori), fra i quali anche diversi *software* attinenti a indagini termografiche.

Bio-Heat Transfer Equation (BHTE)

$$k\Delta^2 t - c_b w_b (T - T_a) + q_m = 0$$

dove  $k$  è la conduttività termica del materiale tissutale,  $q_m$  è il tasso metabolico volumetrico del tessuto,  $c_b w_b$  è il prodotto fra la capacità termica specifica e la portata del sangue per unità di volume di tessuto,  $T$  è la temperatura sconosciuta del tessuto e  $T_a$  è la temperatura del sangue arterioso.

## TRASDUTTORI, CONDUTTORI, SEMICONDUCTORI E ISOLANTI - TERMOCAMERE

In base al loro grado di *conducibilità elettrica*  $\sigma$  – che compare nella seconda legge di Home ( $R = \sigma l/S$ ) – i materiali possono classificarsi in *conduttori* (come, a esempio, l'argento e l'oro), *semiconduttori* (come il silicio e il germanio) e *isolanti* (come il legno e le ceramiche).

In tutti i materiali i valori di conducibilità elettrica ( $\sigma$ ) aumentano con la temperatura, ma questo avviene in misura diversa a seconda di certe loro peculiari caratteristiche atomiche.



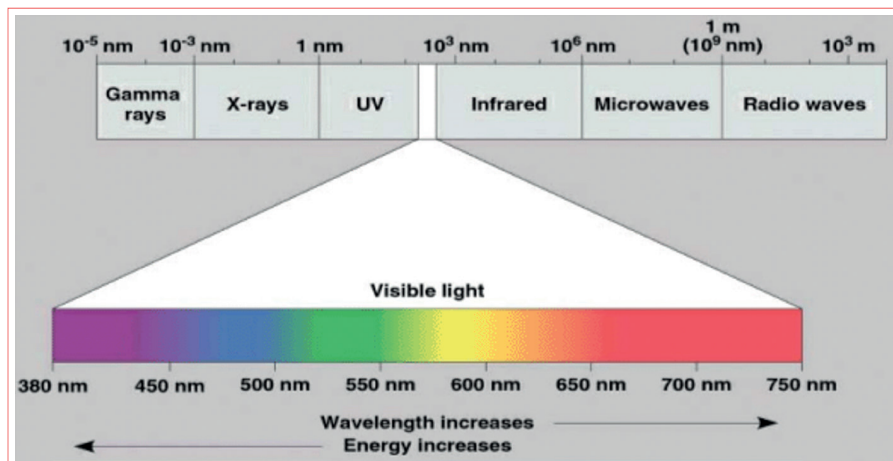
Nei semiconduttori l'energia degli elettroni posti fra la banda di *valenza* e la banda di *conduzione* è *intermedia* rispetto a quella dei materiali isolanti e conduttori, e questo li rende particolarmente idonei, se sollecitati, a *trasformare i fotoni termici in segnali elettrici*.

Nelle *termocamere* ciò avviene quando, in un materiale semiconduttore (trasduttore), l'energia  $q$  dei fotoni infrarossi emessi da un corpo alla temperatura  $T$  (*legge di Stefan-Boltzmann*) è sufficiente a spostare degli elettroni *dalla banda di valenza* a quella più esterna *di conduzione* con conseguente perdita di energia. I segnali elettronici che ne derivano sono poi acquisiti e elaborati da un circuito di lettura integrato nel sistema capace di produrre immagini termiche sul *display* della termocamera. Con le termocamere è possibile anche misurare la temperatura in ogni singolo punto purché siano dotate di due *software* di elaborazione in *post processing* (emissività e temperatura ambiente).

## RADIAZIONI INFRAROSSE E SPETTRO ELETTROMAGNETICO

Le radiazioni infrarosse si suddividono in tre aree in base alle dimensioni delle lunghezze d'onda (misurate in micron ( $\mu$ )). Si distinguono tre aree:

Vicino raggio infrarosso	0,75 ~ 1,5 micron
Medio raggio infrarosso	1,5 ~ 5,6 micron
Il raggio infrarosso lontano	5,6 ~ 1.000 micron



**Considerazioni** – La pelle umana ha una emissività di base prossima a 1 ( $0,98\% \pm 0,01$ ) ed emette radiazioni con lunghezze d'onda assimilabili a quelle di un corpo nero a poco più di  $26,85^{\circ}\text{C}$  (300 K). Queste caratteristiche emissive, assai vicine a quelle di un corpo nero ideale, fanno della pelle umana “*un emittente quasi perfetto e, in via teorica, particolarmente idoneo per la diagnostica termografica*”.

1  
FISICA E TEORIA DEI RAGGI INFRAROSSI

2  
STRUMENTAZIONI

3  
IMAGE PROCESSING

4  
TRASFERIMENTO DEL CALORE

5  
TEST STATISTICI IN MEDICINA

6  
LA TERMOGRAFIA IN MEDICINA

7  
APPLICAZIONI

8  
ESEMPI

9  
IRT NELLE PATOLOGIE A IMPATTO MAGGIORE

10  
IRT FETALE, NEONATALE E PEDIATRICA

11  
SU ALTRE APPLICAZIONI

12  
PROSPETTIVE FUTURE

13  
CONCLUSIONI

14  
DALLA CASISTICA PERSONALE

CONSIDERAZIONI

APPENDICE