

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTA' DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Elettrotecnica

MANUTENZIONE PREVENTIVA DEGLI IMPIANTI ELETTRICI CON ANALISI TERMOGRAFICHE

PREVENTIVE MAINTENANCE OF ELECTRICAL INSTALLATIONS WITH THE THERMOGRAPHIC
ANALYSIS

Relatore: Prof. Renato Gobbo

Laureando: Jody Andreola

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

INDICE

Introduzione	pag. 1
Capitolo 1: cos'è la termografia:	
1.1 Calore e temperatura;	pag.3
1.2 Fondamenti di trasmissione del calore;	pag.5
1.3 Teoria dell'infrarosso e dell'irraggiamento;	pag.6
1.4 Effetto joule dei componenti elettrici;	pag.9
Capitolo 2:Strumentazione per la misura della radiazione infrarossa emessa:	
2.1 Principali strumenti per l'indagine della radiazione infrarossa;	pag.15
2.2 Termocamera;	pag.17
Capitolo 3: Risultati ed interpretazione di immagini termografiche:	
3.1 Immagini termografiche;	pag.23
3.2 Fonti di errori nella misura della radiazione infrarossa con la termocamera;	pag.29
Capitolo 4: Applicazioni della termografia nel monitoraggio e nella manutenzione nel settore industriale:	
4.1 Settori per l'applicazione della termografia;	pag.33
4.2 Procedura per la realizzazione di un'indagine;	pag.34
4.3 Norme per l'indagine termografica industriale;	pag.36
4.4 Indagini termografiche negli impianti di media tensione;	pag.39
4.5 Indagini termografiche negli impianti di bassa tensione;	pag.48
4.6 Altre applicazioni della termografia nel settore elettrico;	pag.58
Conclusioni	pag.71
Bibliografia	pag.73
Appendice: Dati tecnici Termocamere	pag.75

Introduzione

Durante il corso di studi appena terminato ed in seguito ad esperienze lavorative esterne ad esso sono venute a conoscenza delle problematiche e del possibile rischio che viene corso dagli operatori nel fare manutenzione agli impianti elettrici. Tali aspetti mi hanno indotto ad approfondire un argomento che solo negli ultimi 10 anni ha cominciato ad essere considerato come strumento per la manutenzione degli impianti elettrici: la TERMOGRAFIA. Nel campo elettrico la presenza di calore nei vari componenti di un impianto è spesso legato a perdite, tale riscaldamento può portare ad un minor rendimento e soprattutto a una riduzione della vita di quel componente.

Questo aumento di temperatura è molto spesso difficile da individuare con strumenti convenzionali quali i termometri poiché fattori esterni possono variare la temperatura della stanza o del locale nel quale l'apparecchio si trova ed è sottoposto al guasto e quindi a maggior temperatura.

Un altro problema che si presenta soprattutto per impianti di media e alta tensione è quello della sicurezza per il personale; infatti andare a fare misure di temperatura su cavi o sbarre di impianti molto grandi può mettere a repentaglio l'incolumità stessa dell'operatore.

Per rendere possibili queste ispezioni remote quindi si può ricorrere ad uno strumento chiamato Termocamera.

Questo strumento si basa sulla rilevazione della radiazione infrarossa emessa dagli oggetti in base alle caratteristiche e della loro temperatura.

La termocamera dunque misura una radiazione emessa e non la temperatura, l'operazione quindi che fa lo strumento sarà quella di convertire tale radiazione in temperatura, questa conversione sarà la più precisa possibile se lo strumento è stato calibrato su un preciso campione di riferimento.

La tesi avrà quindi lo scopo di presentare questa tecnologia e illustrare alcuni esempi di analisi fatte su componenti di vari impianti elettrici sia nel loro funzionamento normale sia in situazioni in cui si presentano guasti sotto forma di anomalie termiche come punti caldi

Capitolo 1: Cos'è la termografia

1.1 Calore e Temperatura

Se osserviamo un corpo incandescente siamo in grado di affermare con sicurezza che esso risulta “caldo”. Se un corpo risulta coperto di ghiaccio o di brina in modo del tutto analogo siamo in grado di dire che esso è “freddo”. Toccando con la mano siamo anche capaci di stabilire quale fra due corpi (composti dello stesso materiale) è più caldo o più freddo.

Mediante le nostre sensazioni possiamo quindi, in certe occasioni, parlare in maniera adatta della quantità di energia termica posseduta da un corpo, anche senza eseguire misure.

Alcune volte però è necessario ricorrere ad una grandezza che ci permetta di dire quanto un corpo è caldo o freddo, tale strumento è la temperatura. Mediante la misura della temperatura siamo sempre in grado di dire quando un corpo è più caldo o più freddo di un altro, senza dipendere dalle nostre sensazioni.

ATTENZIONE! La temperatura è qualcosa di diverso sia del calore che dell'energia termica, sebbene sia in relazione a queste grandezze.

La sua misura avviene mediante strumenti chiamati *termometri*.

Il loro funzionamento è basato sulla dilatazione che subisce un corpo quando viene riscaldato (termometri a mercurio, ad esempio) o sulla variazione dell'intensità di corrente che circola in un circuito elettrico.

Sostanzialmente tre sono le unità di misura che vengono comunemente utilizzate per esprimere la temperatura:

- il Kelvin (K), unità di misura del Sistema Internazionale
- il grado Celsius o centigrado (°C)
- il grado Fahrenheit (°F) in uso nei Paesi di cultura anglosassone

La trasmissione del calore tra due corpi, uno più caldo ed uno più freddo, avviene proprio in funzione della differenza di temperatura esistente tra essi, annullandosi del tutto quando essi risultano possedere la medesima temperatura, in questo caso si ha equilibrio termico.

Grazie alla differenza di temperatura (ΔT) è possibile avere, quindi, un flusso di energia termica tra due corpi: ad esso si dà il nome di calore.

La temperatura quindi è un indice di agitazione molecolare, è misurata quasi ovunque nel mondo tramite la scala Celsius, dovuta al fisico svedese Anders Celsius. In questa scala è assegnata la temperatura di 0 °C al punto di congelamento dell'acqua (ghiaccio), e di 100 °C al punto di ebollizione dell'acqua.

La scala Kelvin è uguale alla Celsius, ma “sfasata” di 273,15 °C, nel senso che 0 °C = 273,15 K come possiamo vedere nella Fig. 1.1.

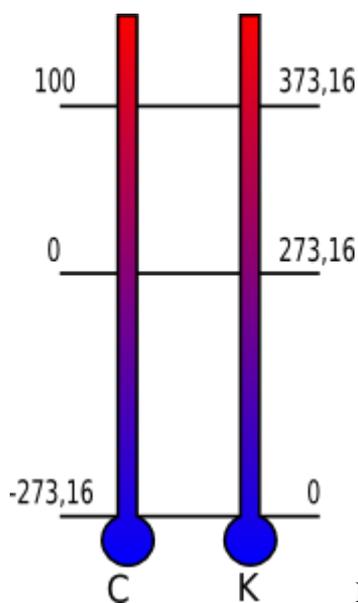


Fig. 1.1:Scala di confronto grado Celsius e Kelvin [C]

Tutti i termometri funzionano attraverso uno dei due principi diversi: a contatto o a radiazione.

Nelle misure a contatto il termometro deve essere posto proprio a contatto dell'oggetto in esame; i *termometri a contatto* possono essere di diverso tipo:

- Termocoppie: sono composte da due elementi metallici con conduttività termica differente, uniti in un punto detto punto caldo posto nell'ambiente in cui si deve conoscere la temperatura, mentre i capi dei due conduttori rappresentano il punto freddo posto distante da quello caldo; quando si ha una differenza di temperatura tra i due, è possibile misurare ai capi del punto freddo una differenza di potenziale elettrico ed esso è in funzione della differenza della temperatura secondo una legge non lineare;
- Termistori (RTD, resistive temperature device): sensore utilizzato per convertire una temperatura in un valore di corrente misurabile con strumenti tipo amperometro o galvanometro;
- Dispositivi bimetallici: unendo tra loro due strisce di diversi materiali, al variare della temperatura la diversa espansione dei due materiali farà deformare l'insieme; è un sistema molto usato nei termometri per frigoriferi o negli interruttori elettrici magnetotermici
- Termometri a espansione termica: sono i comuni termometri a colonna

Termometri a radiazione

Per spiegare con un esempio cosa viene rilevato da questi strumenti immaginiamo di avere una comune lampadina per illuminazione a incandescenza che sia rimasta accesa per un po' di tempo. Se la spegniamo, non vediamo più luce; tuttavia, avvicinando la mano alla lampada senza toccarla, possiamo "sentire" che è ancora calda. Ciò significa che il calore viene emesso sotto forma di radiazioni, simili a quelle luminose, ma esse non sono visibili; in generale, ogni corpo che abbia una temperatura sopra lo zero assoluto ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0 K) emette questo tipo di radiazioni e a seconda della loro intensità viene percepita una sensazione di calore.

Queste radiazioni se giungono ad uno strumento di misura che rileva la radiazione emessa, in questo caso, può essere la termocamera, ci permette di rilevare la temperatura di un punto o dell'intero corpo.

A sua volta il sensore rielabora le radiazioni percepite in un segnale elettrico e il risultato viene mostrato sotto forma d'immagine detta: *TERMOGRAMMA*.

Tutti gli strumenti per la rilevazione del calore a radiazione cioè senza contatto verranno elencati nel capitolo due.

Il **Calore** invece è generato dall'energia cinetica delle molecole in movimento quando l'oggetto si trova ad una temperatura superiore ai 0 K e aumenta al suo aumentare. Considerando le formule della temperatura di trasferimento del calore, possiamo calcolare la quantità di calore perso o guadagnato in una data area ed in un determinato periodo di tempo.

Il calore si trasferisce da un punto all'altro poiché ogni oggetto in un determinato ambiente tende ad assumere la stessa temperatura, cioè, tende all'equilibrio termico. Questo fenomeno avviene principalmente in tre metodi: per conduzione, per convezione e per irraggiamento.

1.2 Fondamenti di trasmissione del calore:

Quando si va ad analizzare un corpo, serve capire prima di tutto come questo sia stato riscaldato e quale sia stata la causa che ha portato all'aumento della propria temperatura.

Come detto sopra il calore viene trasmesso mediante tre principi:

- Conduzione
- Convezione
- Irraggiamento

Possono verificarsi tutti e tre allo stesso momento o indipendentemente l'uno dall'altro.

Se all'interno di uno stesso ambiente sono presenti oggetti con diversa temperatura, quelli più caldi tenderanno a cedere calore e quindi a "riscaldare" quelli più freddi, in modo tale da ottenere nell'ambiente l'equilibrio termico.

Com'è stato detto in precedenza questo trasferimento può avvenire in tre modi:

Conduzione: è in stretta relazione alla conduttività termica della superficie dell'oggetto, maggiore è questa e minore sarà la resistenza termica (inverso della conduttività).

La quantità di calore che si sposta mediante la differenza di temperatura attraverso la parete è descritta dalla legge di Fourier per la conduzione del calore:

$$Q = \frac{k(t_i - t_e)}{l}$$

Dove Q è il calore; k è la conducibilità termica; t_i, t_e rappresentano le temperature interna ed esterna e l la lunghezza della parete.

Convezione: avviene solo in presenza di fluidi, questi possono essere di due tipi: liquidi o gassosi.

Essa rappresenta la differenza di temperatura fra quella dell'oggetto e quella dell'ambiente nel quale è immerso.

La convezione è descritta mediante l'equazione di Newton sul raffreddamento:

$$Q = \alpha * (t_o - t_f)$$

Dove: Q : rappresenta il flusso di calore;

α : il coefficiente di trasferimento del calore di convezione;

t_o : la temperatura dell'oggetto;

t_f : la temperatura del fluido in cui è immerso

Solitamente il fluido in cui è immerso l'oggetto è l'aria.

L'effetto di convezione aumenta se si aumenta la velocità del fluido nel quale è immerso l'oggetto, in questo caso si parla di Convezione forzata, quando invece non è presente nessuna forzatura, si parla di convezione naturale. Nelle macchine elettriche di grande potenza, come i trasformatori, è possibile trovare la convezione forzata di solito fatta con dei ventilatori se il fluido è l'aria o con delle pompe nel caso il fluido sia liquido, in alcune macchine può essere addirittura forzata e guidata in modo da passare attraverso gli avvolgimenti.

Irraggiamento: rappresenta la radiazione che proviene dall'oggetto preso in considerazione verso l'ambiente o verso un altro corpo.

La teoria dell'irraggiamento molto importante nelle indagini termografiche e verrà approfondita nel capitolo 1.3.

1.3 Teoria dell'infrarosso e dell'irraggiamento

Esistono vari tipi di onde, esse si classificano secondo la loro frequenza quantificata in Hertz [Hz o s⁻¹] e la loro lunghezza d'onda λ quantificata in metri [m], infatti questi due valori sono in funzione tra loro con la formula:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Dove c è la velocità della luce nel vuoto quantificata in m/s

Quindi onde con frequenza f elevata avranno lunghezze d'onda piccola e quindi bassa energia, mentre se la frequenza diminuisce, l'energia e la lunghezza d'onda aumentano, l'insieme di tutte frequenze possibili delle radiazioni elettromagnetiche saranno rappresentate su un diagramma detto "SPETTRO ELETTROMAGNETICO"(Fig. 1.2). Anche la luce visibile si trova all'interno dello spettro con una lunghezza d'onda che va dai $0.4 \div 0.7 \mu m$ e come possiamo vedere nella figura 1.2 è solo una piccola parte dello spettro intero. Alla sinistra del visibile avremmo gli ultravioletti e dopo gli UV ci sono i raggi x e γ mentre a destra avremmo l'infrarosso poi le microonde e man mano che la lunghezza d'onda aumenta, s'incontrano gli infrarossi ,le microonde e le onde radio.

Come abbiamo già detto, gli oggetti aventi una temperatura superiore allo 0 K, emettono radiazioni infrarosse. Questa fu scoperta da Sir William Herschel il quale cercando di misurare la temperatura di ogni singolo colore dello spettro della luce solare si accorse che la temperatura più alta era data da un termometro posto vicino al rosso ma al di fuori della zona illuminata chiamata *INFRAROSSO*.

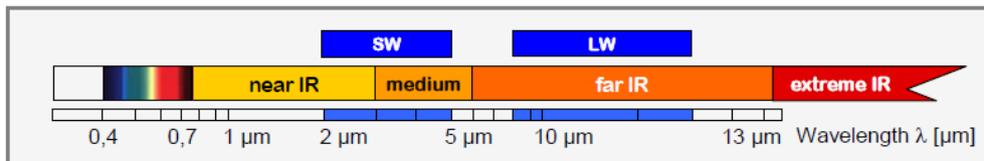
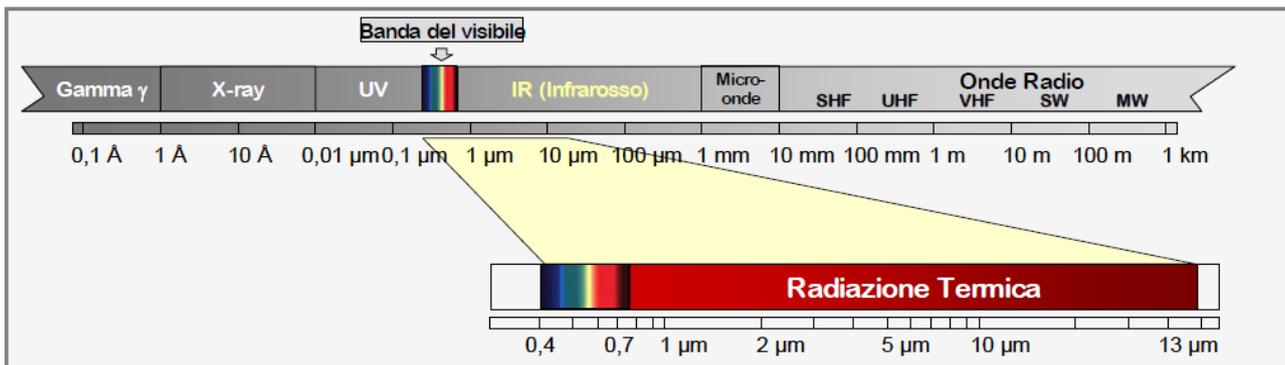


Fig. 1.2: Spettro elettromagnetico

Possiamo inoltre fare un'altra separazione dello spettro infrarosso, infatti:

- per $\lambda : 0.7 \div 3 \mu m$ avremmo l'infrarosso vicino;
- per $\lambda : 3 \div 6 \mu m$ avremmo l'infrarosso medio;
- per $\lambda : 6 \div 15 \mu m$ avremmo l'infrarosso lontano;
- per $\lambda > 15 \mu m$ saremo nel campo degli infrarossi estremi, tale intervallo finisce per $\lambda = 1mm$

L'intensità della radiazione emessa da un corpo dipende dalla caratteristica del corpo stesso e dalla sua temperatura per la legge di Stefan Boltzman:

$$H = \varepsilon \sigma AT^4$$

Dove: ε = emissività del corpo;

σ = costante di Boltzman che vale $5,670400 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$;

A = superficie dell'oggetto [m^2]

T = temperatura in K

H = Intensità della radiazione emessa [W]

Un'altra legge importante è la legge di Wien e come supporto a questa vengono usate le curve di Plank in Fig. 1.3.

Essa afferma che:

$$\lambda_{Max} = b / T$$

dove T è la temperatura del corpo nero, b è costante di proporzionalità di Wien, λ_{Max} è la lunghezza d'onda espressa in metri, in poche parole essa esprime il concetto che più un oggetto è caldo e minore è la sua lunghezza d'onda a cui emetterà radiazione.

La curva di Plank, in Fig. 1.3, invece mi rappresenta che l'intensità di energia elettromagnetica emessa alle varie lunghezze d'onda ad una fissata temperatura è detta anche curva del corpo nero ha un picco che si sposta verso le alte frequenze all'aumentare della temperatura stessa.

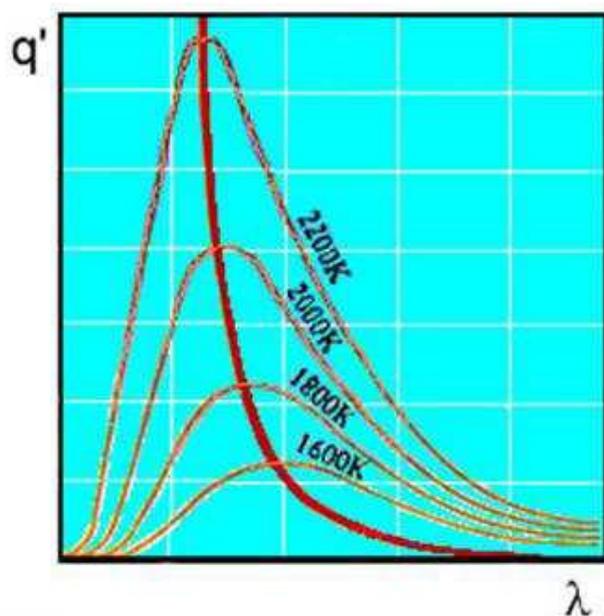


Fig. 1.3: Curve di Plank o Curve del corpo nero

Tornando alla legge di Stephen-Boltzman, come si può vedere uno degli elementi che compongono la formula è l' ϵ cioè l'emissività.

Questo valore è una proprietà tipica di ogni corpo e rappresenta una sorta di "fattore di efficienza", esso varia da 0 a 1, dove con 1 si rappresenta corpi di efficienza del 100% chiamati "Corpo Nero".

Se l'efficienza fosse 0 il corpo non emetterebbe alcuna radiazione qualsiasi sia la sua temperatura, nella realtà non esistono corpi del genere e neanche corpi con emissività pari a 1 anche se sono stati raggiunti in laboratorio modelli molto vicini a questo, tali oggetti vengono detti "Corpo Bianco".

L'emissività è determinata da:

- materiale;
- condizione della superficie;
- geometria;
- angolazione;
- lunghezza d'onda;
- temperatura;

La radiazione che viene percepita dalla termocamera, però non è solo quella emessa dall'oggetto sotto analisi. Infatti la radiazione proveniente dal corpo e percepita dallo strumento è la somma delle radiazioni emesse, riflesse e trasmesse dall'oggetto.

Sostanzialmente quindi si segue la legge di Kirchhoff:

$$\epsilon + \rho + t = 1$$

Dove ϵ rappresenta l'emissività, ρ la riflessione, t la trasmissione dell'oggetto ad una determinata temperatura.

L'analisi della termocamera oltretutto dovrà compensare anche il disturbo causato dalla la radiazione dell'ambiente riflessa, cioè dal rumore e dall'influenza che ha l'ambiente che circonda l'oggetto con esso.

In un oggetto: maggiore è l'emissività e più reale sarà la lettura della sua temperatura, a contrario una bassa emissività darà una più reale lettura della temperatura ambiente riflessa sull'oggetto in esame sfalsando la misura della sua temperatura.

Quando dovremo fare delle misure quindi sarà importante conoscere l'emissività dell'oggetto e quella dello sfondo.

1.4 Effetto Joule dei componenti elettrici

Per quanto riguarda i componenti attraversati da una corrente elettrica, questi tendono a riscaldarsi e dissipare energia sotto forma di calore.

Il bilancio termico che governa questa dissipazione è legato alla resistenza elettrica che, per quanto piccola essa sia, è sempre presente in ogni componente e dalla corrente al quadrato che lo attraversa:

$$P_i = Ri^2$$

Quindi maggiore è la corrente che attraversa il componente e maggiore sarà la sua potenza dissipata sotto forma di calore, abbassando, il rendimento e la vita nelle macchine elettriche, la vita dell'isolante nei cavi, la vita del componente generale. Andremo quindi adesso a valutare tali perdite per i vari componenti.

Nei *cavi* il bilancio termico sarà:

$$Wdt = \gamma cVd\vartheta + KS_d\vartheta dt$$

Dove W è l'energia ; γ densità ; ϑ temperatura ; S_d superficie dell'isolante; c calore specifico;

K fattore di trasmissione termico globale; V volume

Dopo alcuni semplici passaggi arriviamo a definire la formula finale:

$$\frac{W}{C_{th}} = \frac{d\vartheta}{dt} + \frac{\vartheta}{\tau}$$

Dove C_{th} rappresenta la capacità termica definita come:

$$C_{th} = \gamma S_d c$$

Mentre τ rappresenta la costante di tempo termica è definita come:

$$\tau = C_{th} R_{th}$$

Questa può andare da pochi minuti a alcune decine di minuti, è quindi un tempo molto lungo.

La R_{th} sarà definita come:

$$1/R_{th} = K2\pi r$$

Dove r è il raggio dell'isolante;

La corrente nel cavo va a influire anche sulla sua vita, poiché se facciamo scorrere una corrente maggiore a quella indicata dalla portata lo portiamo a lavorare a temperature più alte e questo porta ad un degrado più o meno rapido dell'isolante.

Dal punto di vista termico un cavo può essere interessato da due regimi:

- Regime Permanente o continuo: di solito rappresenta il normale funzionamento del cavo e in questo si calcola la portata del cavo con la seguente equazione :

$$\frac{W}{C_{th}} = \frac{\vartheta}{\tau}$$

Essendo in regime permanente scompare il termine con la derivata e dopo alcuni passaggi si ottiene la definizione di portata:

$$I = \sqrt{\frac{\vartheta S}{\rho_0 R_{th}}}$$

La portata indica la massima corrente che un cavo elettrico in generale può portare per tutta la sua vita in condizioni di sicurezza. Tale valore è importante per il corretto dimensionamento dei cavi in un impianto, solitamente si cerca di soddisfare la seguente disuguaglianza:

$$I_{esercizio} \leq I_n$$

Questo si fa per cautelarsi

- Regime Adiabatico: regime di funzionamento del cavo per cui la durata è estremamente breve di solito si considerano $t < 5s$, tale da non avere scambio termico con l'ambiente, solitamente si considera questo regime in caso di cortocircuito dove si ipotizza un intervento delle protezioni molto rapido (istantaneo).

L'equazione di bilancio sarà:

$$\frac{W}{C_{th}} = \frac{d\theta}{dt}$$

Da essa è possibile ottenere la densità di corrente che abbiamo durante un guasto dato indispensabile da conoscere quando si verifica l'idoneità delle protezioni:

$$\frac{i^2}{\delta^2} dt = \frac{\gamma c}{\rho} d\theta$$

Dove il termine a sinistra dell'uguale rappresenta la densità di corrente in dt considerata uniforme lungo il conduttore se siamo in regime continuo mentre in regime alternato dovremmo considerare anche l'effetto pelle che ne modifica la distribuzione. A destra sono raccolte invece tutte le caratteristiche del materiale

Quindi:

$$\sigma^2 dt = \frac{\gamma c}{\rho} d\theta$$

L'ultima formula mi permette di mettere in relazione l'energia immessa (termine a sinistra dell'uguale) con tutte le caratteristiche del materiale (termine a destra dell'uguale).

Le sorgenti di calore nei cavi saranno dunque la corrente I che lo attraversa e il campo elettrico dell'isolante per effetto delle perdite dielettriche.

Se il materiale isolante non fosse in grado di smaltire il calore, ai fattori sopra elencati, la temperatura all'interno del conduttore crescerebbe indefinitamente portando alla sua distruzione; nella realtà invece si ha l'effettivo smaltimento e quindi la riduzione della temperatura del cavo.

Gli isolanti vengono divisi in classi d'isolamento che variano a seconda della temperatura massima di funzionamento:

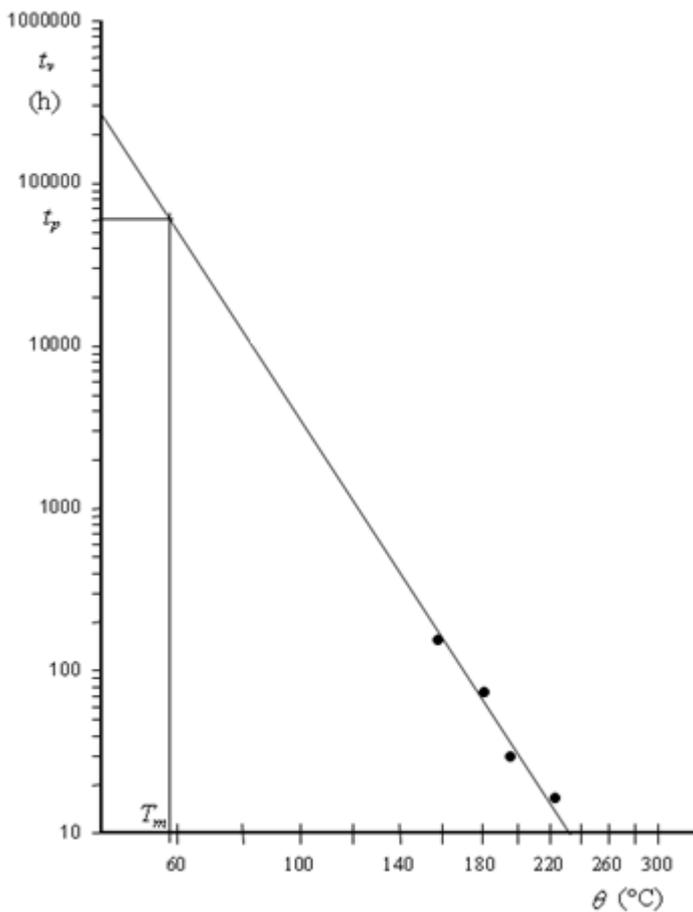
Tabella della classe termica o classe d'isolamento secondo norma IEC 58 del 1984

<i>Temperatura massima ammissibile in regime permanente T_m</i>									
Classe IEC	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
T_m (°C)	90	105	120	130	155	180	200	220	250

Pubblicazione IEC 58, 1984

[1]

L'importanza di lavorare lontano da queste temperature massime sta nel fatto che la vita dell'isolante stesso aumenta, infatti se per esempio si lavorasse a temperatura di 10°C più alta rispetto alla T_{Max} di funzionamento la vita dell'isolante dimezzerebbe



La norma stabilisce che un isolante deve lavorare alla sua T di classe per circa vent'anni, nella Fig. 1.5 possiamo vedere la curva di vita di un isolante in funzione della sua temperatura di esercizio.

Fig. 1.5: Curva di vita di un isolante in funzione della temperatura [5]

Trasformatori:

Nei Trasformatori la corrente che attraversa gli avvolgimenti darà come avviene per i cavi perdite per effetto Joule e quindi avremo un aumento della temperatura del componente.

La formula del rendimento del trasformatore è la seguente:[2]

$$\eta = \frac{P_u}{P_d} = \frac{P_u}{P_{Cu} + P_u + P_{ist} + P_{add} + P_{cp}}$$

Dove: P_u = Potenza utile al secondario;

P_{add} = perdite difficilmente misurabili dipendono da numerosi fattori quali la frequenza, la temperatura, la resistività, il tipo di costruzione degli avvolgimenti

P_{Cu} = Perdite negli avvolgimenti per effetto Joule;

P_{ist} = Perdite per isteresi del circuito magnetico;

P_{cp} = perdite per correnti parassite

P_d = Potenza disponibile al primario, essa rappresenta la somma delle tre componenti sopra citate

Come vediamo le perdite per effetto Joule compaiono al denominatore e quindi tendono a diminuire insieme alle perdite per nel ferro (che rappresenta la somma delle perdite per isteresi e correnti parassite), la potenza disponibile al primario. Esse sono quantificate come:

$$P_{Cu} = R_{1c}I_1^2 + R_{2c}I_2^2$$

Dove: R_{1c} , R_{2c} = resistenze degli avvolgimenti primario e secondario

I_1^2 , I_2^2 = Correnti che attraversano gli avvolgimenti primari e secondari elevati al quadrato

Rappresentano la potenza attiva dissipata dal trasformatore a carico, come si può osservare le perdite per effetto Joule sono la somma delle perdite nel circuito primario con le perdite nel circuito secondario.

Il trasformatore è una macchina statica quindi per abbassare la sua temperatura si può sfruttare l'aria naturale che lo raffredda per mezzo convettivo, tuttavia questo è solo un metodo di raffreddamento tra i tanti, per i trasformatori di grandi dimensioni ci sono altri metodi di raffreddamento come acqua, gas o oli naturali e la loro circolazione all'interno del cassone o degli avvolgimenti può essere naturale forzata o forzata e guidata, nell'immagine qui sotto, Fig. 1.6, sono riportati i tipi di raffreddamento principalmente usati nei trasformatori:

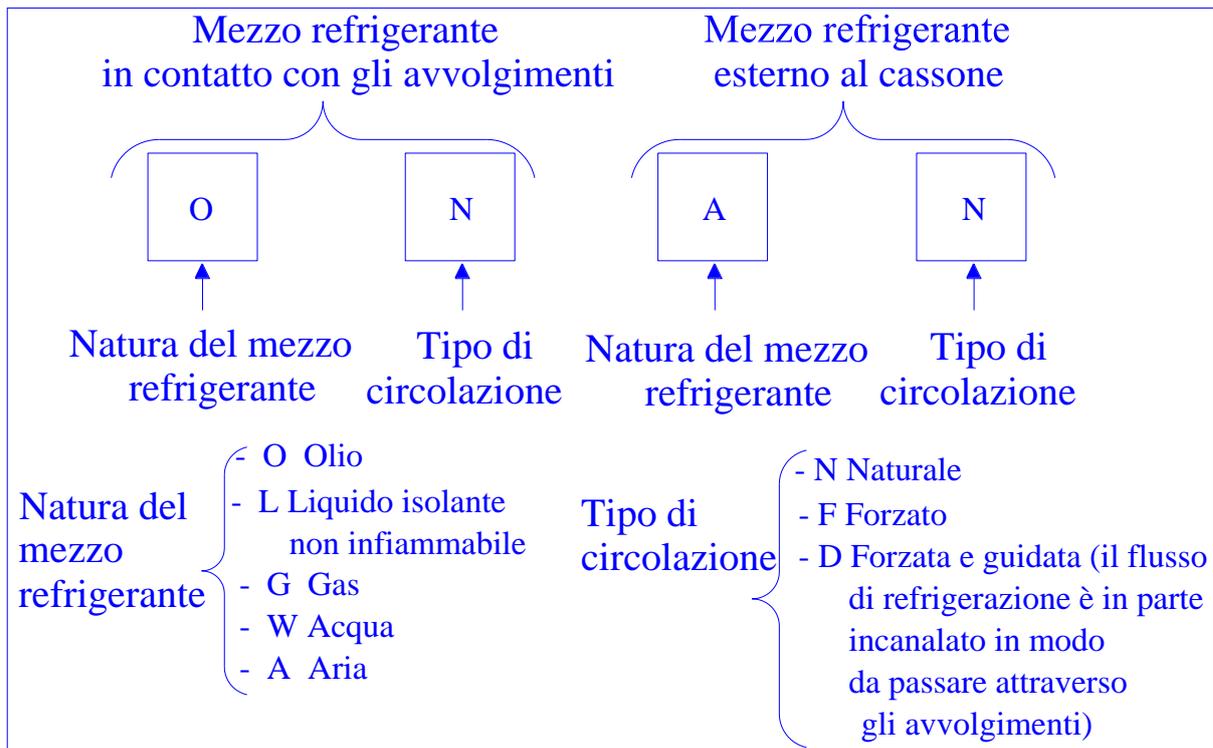


Fig. 1.6: sigle di raffreddamento per i trasformatori

La vita di una macchina dipende da molti fattori, la temperatura incide molto su di essa è quindi necessario introdurre questi sistemi di raffreddamento per permettere alla macchina di funzionare per il più lungo arco di tempo possibile garantendo in ogni caso un funzionamento a regime ed ininterrotto.

Nelle Macchine Elettriche il discorso è analogo a quello fatto nei trasformatori, quindi il rendimento dipenderà dalle perdite negli avvolgimenti di statore e rotore, in questo caso dovremo considerare anche le perdite meccaniche dovute alla ventilazione e per attrito.

Capitolo 2: Strumentazione per il rilievo della radiazione infrarossa emessa

2.1 Principali strumenti per l'indagine della radiazione infrarossa

I principali strumenti attualmente disponibili per le misure delle temperature a distanza sono:

- Radiometri;
- Pirometri;
- Video - radiometri (tra cui le termocamere);

tali strumenti utilizzano di base tutti la stessa teoria per la determinazione della temperatura cioè le leggi di STEFEN- BOLTZMAN e WIEN le quali affermano che per la quale qualunque corpo sopra la temperatura di 0 K emette radiazione elettromagnetica la cui intensità è funzione della sua temperatura e già esposta nel capitolo precedente.

▪ **RADIOMETRO:**

Dispositivo utilizzato per misurare il flusso della radiazione elettromagnetica emessa da una superficie o un oggetto per effetto della sua temperatura o radiazione.

Può essere utilizzato sia per la misura della radiazione infrarossa sia come rilevatore che opera nelle altre lunghezze d'onda dello spettro, in questo caso lo strumento è dello SPETTRO RADIOMETRO.

Lo strumento quindi misura il flusso di energia ricevuto nell'unità di tempo da una porzione di superficie o anche la forma esatta dall'intero spettro emesso. Si può risalire alla temperatura della superficie d'interesse.

Le caratteristiche principali sono:

- Ampiezza della banda di ricezione;
- Sensibilità spettrale;
- Campo di vista e Risoluzione spettrale;
- Risposta direzionale

Un radiometro può utilizzare diversi tipi di sensori, il più utilizzato è il BOLOMETRO che consente l'assorbimento di radiazione in calore misurato mediante un termometro. I primi radiometri sono stati quelli di CROOKES anche se il più efficiente è quello di Nichols



Fig. 2.1: Radiometro di Crookes [A]

Questo strumento è principalmente usato per misure di telerilevamento, può essere montato su satelliti per il telerilevamento della temperatura terrestre (Satelliti meteo)

Il radiometro funge da semplice rilevatore.

Il problema principale di questo strumento è dato dal rumore che può essere introdotto dai dispositivi riceventi (antenna dello strumento) e dall'ambiente circostante all'area di misura .

▪ **PIROMETRO:**

Il pirometro è un dispositivo utilizzato nella maggioranza dei casi per misure di alte temperature come per esempio corpi incandescenti. Il suo inventore è Josiah Wedgwood per la misura della temperatura dei forni per realizzazione la ceramica durante la rivoluzione industriale inglese del 1700.

Esistono diversi tipi di pirometri:

- **PIROMETRO A RADIAZIONE TOTALE:** Tale strumento misura la temperatura di equilibrio tra lo strumento che risulta essere un corpo in grado di assorbire radiazione elettromagnetica ed il corpo che le emette secondo la legge di STEFEN-BOLTZMAN.

Il pirometro è composto da una cavità ricoperta da NEROFUOMO accoppiata ad una termocoppia e degli specchi che fanno convergere la radiazione proveniente dal corpo sull'assorbitore di radiazioni (sensore).

Quindi la temperatura della termocoppia è quella di equilibrio tra quella proveniente dalla sorgente e dalle pareti e quella irraggiata dall'assorbitore.

- **PIROMETRO OTTICO:** Si basa sul confronto dell'intensità emissiva della radiazione visibile proveniente dal corpo con l'intensità luminosa campione.

Lo strumento quindi si basa sulla figura scura prodotta dalla sorgente su uno schermo illuminato da una lampada campione di intensità nota e modificabile a piacere, per far ciò la luce proveniente dal campione proiettato sullo schermo tramite una lente .

Se la luce della lampada campione e quella emessa dal corpo sono indistinguibili, la misura della temperatura è prelevata da un filamento accoppiato dallo schermo che quindi è alla stessa temperatura del corpo emettente.

Solitamente tali strumenti vengono tarati con il punto fisso dell'oro a 1337,5 K.



Fig. 2.2: Foto di pirometro commerciale utilizzato per rilevare la temperatura per la manutenzione industriale

- **VIDEO-RADIOMETRO** :detto anche termocamera

2.2 TERMOCAMERA

Questo strumento non misura la temperatura direttamente ma come gli altri due strumenti appena descritti misura l'intensità della radiazione infrarossa emessa dal corpo.

gli elementi principali che vanno a comporre tale strumento sono:

- Sensore;
- Lente;

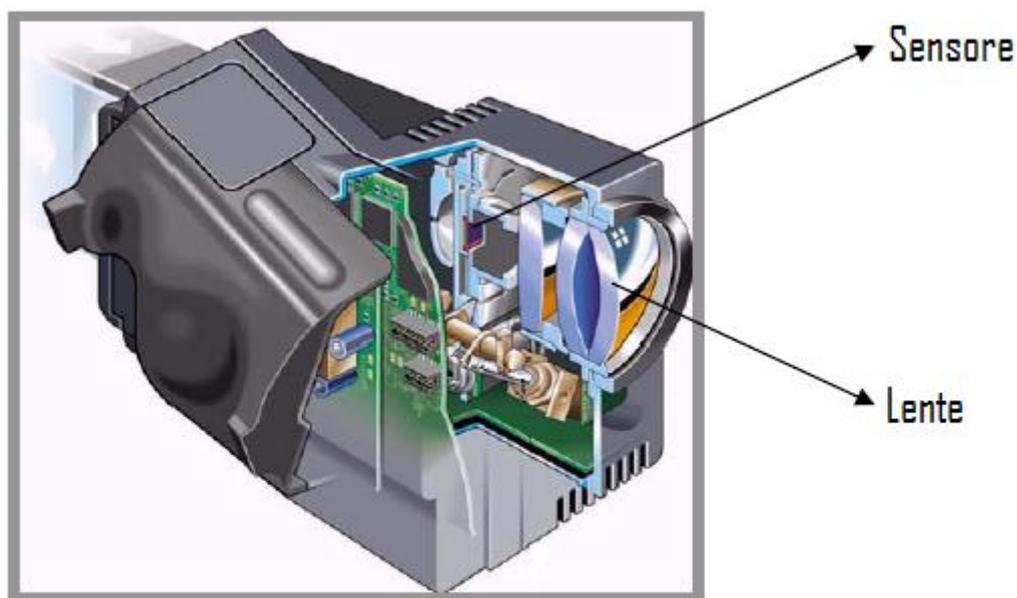


Fig. 2.3: Componenti principali della termocamera

SENSORE:

Prima di procedere all'analisi del sensore dello strumento dobbiamo premettere alcune cose riguardanti l'infrarosso.

L'atmosfera è il mezzo nel quale le radiazioni infrarosse si propagano, essa non è però del tutto trasparente a questo tipo di trasmissione, cioè non abbiamo la chiara trasmissione di tutte le lunghezze d'onda dello spettro infrarosso attraverso essa. Infatti l'atmosfera si comporta da filtro e quindi alcune lunghezze vengono trasmesse altre invece vengono assorbite, la Fig. 2.4 che segue ci mostra tale comportamento:

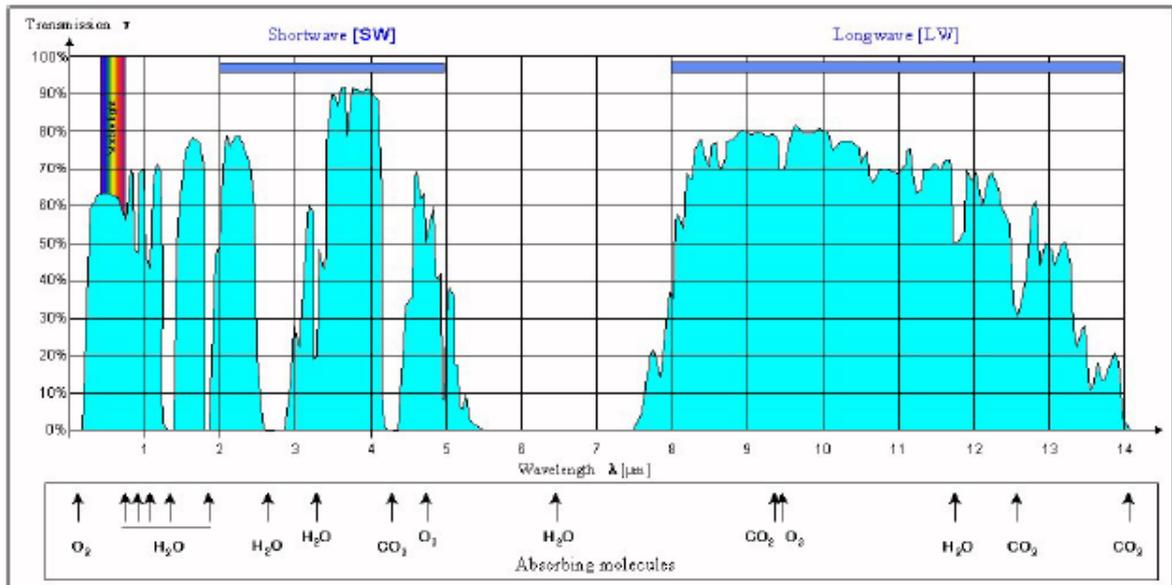


Fig. 2.4: Spettro elettromagnetico dell'atmosfera solo lunghezze d'onda degli infrarossi [4]

Possiamo quindi dividere due finestre infrarosse corrispondenti ai due intervalli:

- SW Short Wave onde con λ da 3 – 5 μm
- LW Long Wave onde con λ da 8 – 12 μm

Nell'intervallo dello spettro che va da 5 a 8 μm l'atmosfera assorbe le onde infrarosse, quindi esisteranno termocamere che funzionano nell'intervallo SW e altre che funzionano nell'intervallo LW. Oltre alla finestra atmosferica di lavoro dobbiamo distinguere il principio di funzionamento del rilevatore all'infrarosso:

- Principio Termico :la temperatura stessa del rilevatore cambia quando è colpita dalle radiazioni infrarosse.

La famiglia di sensori che utilizza questo principio è detta: MICROBOLOMETRICA.

Il riscaldamento modifica la conduttività elettrica del materiale , se su esso si fa passare una corrente la variazione prodotta dalla radiazione incidente può essere misurata e calibrata per ottenere una misura esatta della temperatura.

Questi sensori a causa del tempo di riscaldamento necessario ad attivare la variazione di conduttività elettrica, sono lenti, hanno risoluzione termica minore e minor costi.

Tale sensore, data la loro sensibilità in un ampio range di lunghezza d'onda, è prevalentemente usato nell'intervallo delle LW.

Tali sensori non necessitano di raffreddamento, per questi sensori quindi si utilizzano un insieme di fattori di compensazione per ogni pixel tali fattori prendono il nome di -NUC cioè Non Uniformity Correction.

Il NUC permette di:

- Non necessitare di stabilizzatori di temperatura del sensore;
- Possibilità di attivazione quasi immediata della termocamera;
- Minor complessità del sistema e minor consumo elettrico;
- Intervallo più ampio della temperatura di esercizio.

- Principio a Radiazione: I sensori che utilizzano questo principio sono detti **SENSORI FOTOVOLTAICI** o **QUANTICI**;

In questo caso si va a rilevare la radiazione infrarossa trasportata dai quanti di energia. A seconda dei fotoni incidenti, gli elettroni di valenza dei materiali fotovoltaici aumentano il loro livello energetico portandosi ad una banda di conduzione.

Tali sensori sfruttano questo principio generando un segnale proporzionale all'energia ricevuta o sotto forma di variazione di **CONDUTTIVITA' ELETTRICA** rilevata con sensori fotoconduttori o generando un potenziale elettrico rilevato con **SENSORI FOTOVOLTAICI**. Tali sensori sono più veloci, hanno risoluzione più elevata ma devono essere raffreddati fino ad una temperatura di $\approx 70\text{ K}$ ($\approx -203^\circ\text{C}$) solitamente per raggiungere tali temperature di raffreddamento si utilizzano:

- Azoto Liquido;
- Effetto termoelettrico con celle di Peltier;
- Ciclo termico Stirling

Il sensore all'interno della termocamera può essere:

- A **SINGOLO SENSORE**: esso è caratterizzato da un sistema di specchi mobili di tipo elettromeccanico che modifica il percorso ottico del segnale infrarosso da un punto dell'oggetto sino al singolo sensore.

L'acquisizione di mappe a campo intero è costruita mediante l'acquisizione in serie del segnale su più punti secondo una modalità di tipo **RASTER SCANNING**, con massimi frame rates raggiungibili di 30 Hz, anche se tipicamente sono di 1 Hz.

- **FPA**: l'acronimo sta per **FOCAL PLANE ARRAY**: è una matrice di sensori di dimensioni che vanno da valori tipicamente di 160 x 120 a 1024 x 1024 **PIXELS**, considerando che ogni pixel è dell'ordine dei μm .

LENTE:

La lente della termocamera è realizzata con un materiale particolare, non è quindi realizzata né in vetro né in materiali con i quali si fanno le lenti per le macchine fotografiche normali.

Infatti le lenti di vetro comunemente usate per le macchine fotografiche non possono essere utilizzate per le termocamere poiché il vetro è opaco alla radiazione infrarossa mentre è trasparente nella luce visibile. Se infatti si va a realizzare una foto ad un vetro con la termocamera il risultato che si ottiene è quello di un'immagine allo specchio, cioè si avrebbe lo stesso effetto che si ha facendo una foto con una macchinetta fotografica allo specchio come si può vedere nelle Fig.2.5 e Fig. 2.6.



Fig. 2.5: Immagine termica fatta ad un vetro perpendicolare ad esso

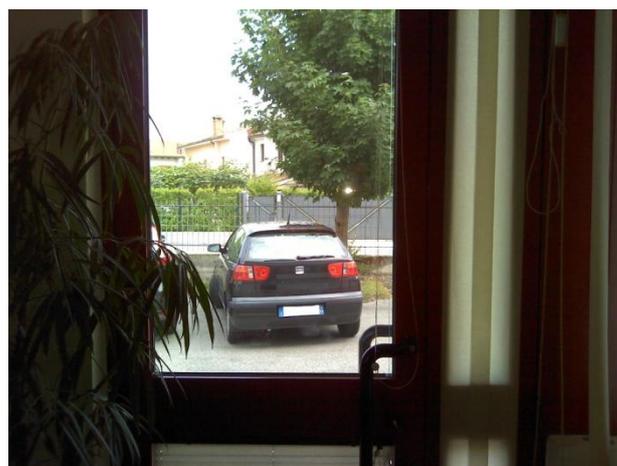


Fig.2.6: Immagine nel visibile dello stesso vetro di Fig.2.5

Le soluzioni costruttive che permettono di realizzare una lente trasparente ai raggi infrarossi sono:

- Realizzazione con sottili fogli di plastica;
- Realizzazione con monocristalli di GERMANIO;

Quest'ultima soluzione è quella più utilizzata per la fabbricazione di lenti per termocamere, infatti il germanio non è opaco alle radiazioni infrarosse, ed è utilizzato anche per la realizzazione di fibre ottiche.

Tale materiale è da considerarsi come un filtro passa banda per la porzione di spettro infrarosso che va da 8 a 13 μm .

Oltre al materiale di cui è composta la lente, si devono valutare altri parametri, questa volta dal punto di vista ottico, per la scelta più appropriata della lente della termocamera. Essi permettono di valutare quanto distante può essere fatta l'analisi senza avere rumore di fondo, quindi la misura del massimo oggetto visibile o misurabile:

Manutenzione preventiva degli impianti elettrici con analisi termografiche

Capitolo 2: Strumentazione per il rilievo della radiazione infrarossa emessa

- FOV(o TFOV): letteralmente FIELD OF VIEW detto anche TOTAL FIELD OF VIEW cioè campo di osservazione totale; esso rappresenta l'angolo di ripresa dell'ottica espresso in gradi angolari, ed è il più utilizzato poiché rappresenta l'area che la termocamera è in grado di vedere in funzione della distanza. Esso è determinato dalla lente che è montata in quel momento sulla termocamera (o la lente standard nel caso non si possa intercambiare) solitamente ci sono tre tipi di lente con tre diversi FOV:
 - Lenti STANDARD: FOV tra 10° e 25°;
 - Lenti GRADANGOLARI: FOV tra 25° e 60°;
 - Lenti TELEOBIETTIVI: FOV tra 1° e 10°;Esistono anche
 - Lenti MACRO: FOV tra 10° e 25° tali lenti sono messe a fuoco tra 1 e 10 cm;
 - Lenti MICROSCOPIO: tali lenti hanno risoluzione da 4-25 μm e distanza di messa a fuoco da 0,5 a qualche centimetro;

- IFOV: letteralmente INSTANTANEOUS FIELD OF VIEW o campo di misura istantaneo; indica la capacità di un'ottica di risolvere, cioè vedere e misurare, la temperatura di un'area puntiforme all'interno di un'immagine termica. Il campo visivo istantaneo, definisce anche la RISOLUZIONE GEOMETRICA o SPAZIALE di un'ottica, cioè la CAPACITA' di un sistema di distinguere due aree puntiformi adiacenti.

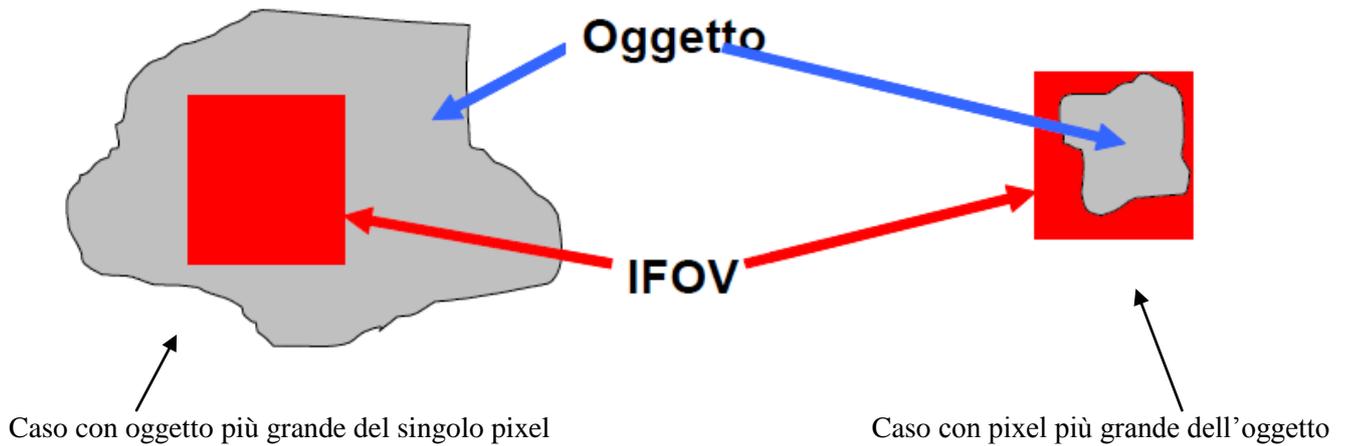
Non è una misura di differenza di temperatura o di radiazione ma di spazio e quindi viene sempre calcolata come valore dimensionale o di angolo.

La risoluzione geometrica o spaziale, non va però confusa con la risoluzione o sensibilità termica che descrive invece la capacità di un sistema di rilevare due differenti valori ed è sempre una misura di TEMPERATURA.

In poche parole quindi l'IFOV rappresenta la porzione di campo visivo che corrisponde ad ogni singolo pixel. Nel caso l'oggetto che si sta osservando sia più grande del singolo pixel, la misura conterrà le informazioni solo dell'oggetto in analisi ed in questo caso la misura è corretta.

Se invece il pixel è più grande dell'oggetto da misurare allora intorno ad esso verrà rilevato anche il "RUMORE DI FONDO" dato dalla radiazione emessa dall'ambiente intorno all'oggetto, in questo caso tale rumore può sfalsarmi l'analisi termografica.

Una regola non scritta ma di facile applicazione è quella di considerare l'oggetto da analizzare 2-3 volte più grande del singolo pixel in modo da avere una misura precisa ed esente da rumore.



- **LUNGHEZZA FOCALE:** rappresenta la distanza, normalmente espressa in mm, tra il centro focale dell'obiettivo e il piano del rilevatore singolo.
In fotografia, poiché le dimensioni della pellicola sono di un formato standard, esiste una relazione fissa tra la lunghezza focale ed il campo inquadrato
Le ottiche di cui ogni sistema termografico è dotato, possono essere contraddistinte dal campo visivo o dalle lunghezze focali espresse in mm:
 $FOV = 20^\circ \times 15^\circ$ con obiettivo standard: 22mm

Capitolo 3: Risultati ed interpretazioni di immagini termografiche

3.1 IMMAGINI TERMOGRAFICHE:

Come è stato affrontato nel capitolo 2 la termocamera è uno strumento che rileva l'intensità della radiazione all'infrarosso del corpo non è quindi uno strumento che vede o rileva la temperatura.

Tale radiazione viene poi elaborata dall'elettronica della macchina fino a sviluppare un'immagine di tipo radiometrica digitale nella quale è possibile visualizzare la temperatura dell'oggetto.

Tale immagine potrà essere visualizzata come "foto" digitale o come "Video" a seconda dell'utilizzo della macchina e i software che elaborano il risultato dell'elettronica della macchina.

La termocamera è quindi uno strumento, come le macchine fotografiche digitali, che memorizzano l'immagine o il fotogramma convertendo l'infrarosso invisibile all'occhio umano in un'immagine visibile rappresentata in falsi colori.

Per la realizzazione di un'indagine termografica corretta è indispensabile considerare oltre ai parametri costruttivi (già illustrati nel capitolo 2) alcuni parametri fisico-ambientali che possono sfalsare l'analisi con la termocamera. Di seguito verranno illustrati i vari fattori.

- **TRASMISSIONE ATMOSFERICA:**

come è stato detto nel capitolo 2 l'atmosfera è parzialmente opaca per quanto riguarda la trasmissione dell'infrarosso, questo è dato dal fatto che si ha interazione tra la radiazione e gli elettroni atomici e molecolari. Tale opacità rappresenta un assorbimento delle onde emesse dall'oggetto in esame, tuttavia questo assorbimento dipende anche dalla distanza attraversata, cioè da quanto lontano è l'oggetto dalla termocamera, tale parametro è da tenere in considerazione. Infatti più ci si allontana dall'oggetto più la misura diventa imprecisa questo è dovuto dal fatto che possiamo avere più punti a diversa temperatura individuati però con la stessa dalla termocamera, ciò è dovuto in realtà dall'assorbimento dell'atmosfera delle radiazioni provenienti dagli oggetti più lontani.

Per ovviare a questo si devono usare dei compensatori all'interno della macchina o altrimenti settare la distanza nel software durante la post-analisi fatta con il computer.

- **TEMPERATURA AMBIENTE:**

La temperatura ambiente impostata all'interno del software della termocamera, influenza in valori di temperatura che vengono poi segnalati dallo strumento, in quanto temperature diverse da quella reale vengono interpretate dall'apparecchio come una differente quantità di radiazione riflessa dalle superfici in misura.

Infatti la temperatura di un corpo influenza solo la parte emessa della radiazione totale e non quella riflessa e/o trasmessa, c'è da dire anche che tale fenomeno è più evidente negli oggetti con emissività bassa e diventa rilevante quando si vanno ad analizzare edifici mentre per oggetti all'interno di strutture la variazione è legata alla temperatura della stanza.

Come per la trasmissione atmosferica, anche questo parametro può essere modificato e regolato tramite software per la gestione delle immagini.

- OTTIMIZZAZIONE DELL'IMMAGINE:

Per rendere visibile l'immagine dell'oggetto analizzato all'infrarosso, la termocamera effettua una conversione con falsi colori cioè viene adottata una palettatura di colori con la quale l'immagine viene resa visibile.

Esistono principalmente quattro palettature per la visualizzazione dell'immagine ed esse possono essere scelte all'interno del software della macchina o in quello del computer durante l'analisi delle immagini:

1. Palettatura "FERRO": solitamente è quella standard con la quale vengono visualizzate le immagini. La scala dei colori parte dal nero per indicare i punti o le parti più fredde, man mano che la temperatura aumenta troviamo il blu, il rosso, l'arancio, il giallo ed infine il bianco per i punti più caldi. Per punti caldi e punti freddi s'intendono i punti più vicini al massimo o al minimo del delta di temperatura impostata durante l'analisi. Solitamente questa palettatura è utilizzata per l'analisi e la manutenzione industriale (Fig.2.7).



Fig 2.7: Termografia con palettatura "Ferro"

2. Palettatura "ARCOBALENO":

Utilizzata solitamente per l'edilizia per mettere in risalto l'umidità o i distacchi di intonaco, essi utilizzano per rappresentare l'immagine termografica i colori dell'arcobaleno (da qui deriva il nome della palettatura), dove le zone più fredde sono indicate con il viola mentre quelle più calde con il rosso (Fig. 2.8).

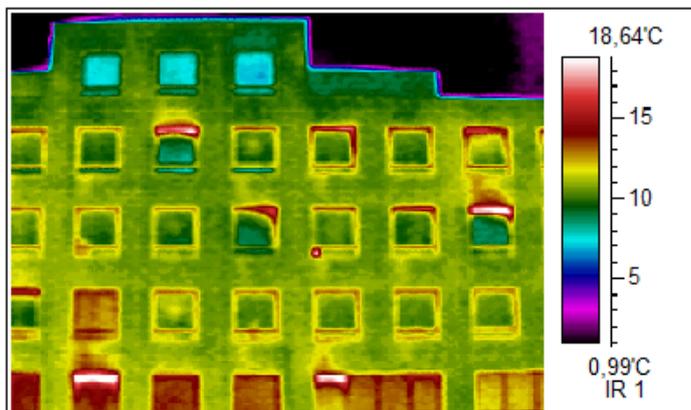


Fig. 2.8: Termografia con palettatura "Arcobaleno"

3. Palettatura “SCALA DI GRIGI”:

Questa palettatura mostra l’immagine in bianco e nero e nel mezzo le sfumature di grigio, indicando con il nero la temperatura minima mentre con il bianco la temperatura massima (Fig.2.9).

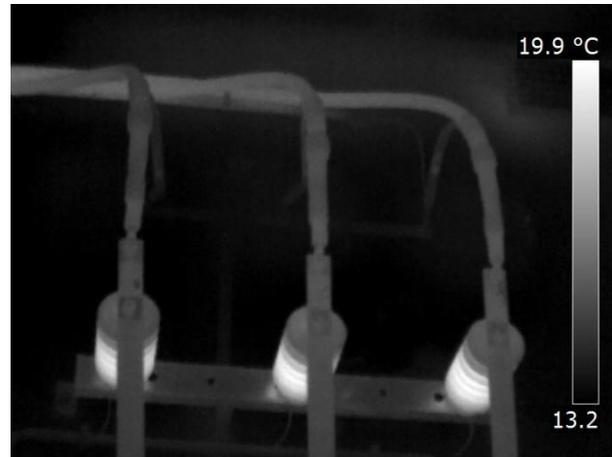


Fig. 2.9: Termografia con palettatura “scala di grigi”

4. Palettatura “ISOTERMICA”: Questa palettatura è individuata con vari nomi a seconda del software che si sta usando nella macchina o nel computer; è formata da una serie di colori prestabiliti rappresentando l’immagine con aree isoterme cioè vengono stabiliti dei sottointervalli di temperatura (solitamente sono 10) ai quali viene assegnato un colore specifico non avendo quindi sfumature tra un colore ed un altro (Fig.2.10).



Fig. 2.10: Termografia con palettatura “isotermica”

Esistono altri tipi di palettatura oltre alle quattro elencate sopra anche se la loro applicazione per l’analisi è più rara, tali palettature sono:

- Palettatura “GRIGIO-ROSSO”;
- Palettatura “GIALLO”;
- Palettatura “FIAMMATO”

- CAMPO DI TEMPERATURE:

Questo parametro a differenza dell'emissività che come vedremo bisogna stare attenti ad impostarla per una corretta lettura della temperatura, è importante per una corretta visualizzazione termica dell'oggetto in analisi.

Le moderne termo camere hanno un comando chiamato "AUTO ADJUST" all'interno del loro FIRMWARE che permette loro di settarsi automaticamente e presentare a display o a monitor, a seconda del tipo di termocamera, l'immagine già termicamente regolata.

L'operatore tuttavia può regolare questo parametro a suo piacimento manualmente andando a modificare il ΔT dell'immagine visualizzata al momento, potendo scegliere se tenerlo ampio o restringerlo.

Con un ΔT ampio infatti possiamo visualizzare un numero maggiore di componenti a temperature diverse. Di solito operare con un intervallo ampio è utile per un'indagine superficiale, quando cioè l'indagine è mirata all'individuazione di anomalie termiche o punti caldi (Fig. 2.10).

L'utilizzo invece di intervalli più piccoli avviene quando individuata l'anomalia o il punto caldo si vuole mettere in risalto solo quel particolare termico perdendo così la geometria dell'intera foto (Fig. 2.11).



Fig. 2.10: Immagine termica con ΔT elevato

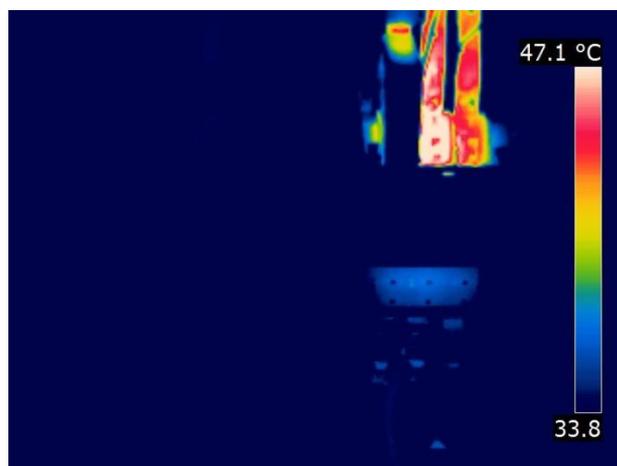


Fig. 2.11: Immagine termica con ΔT ristretto

Come si vede dalle foto sopra mentre nell'indagine a sinistra con un ΔT più ampio (Fig. 2.10), è presente anche il rumore esterno e la radiazione dell'ambiente circostante al componente caldo.

Nell'immagine di destra (Fig. 2.11) invece il ΔT è stretto eliminando il rumore esterno o in parte ridotto ad ogni modo si va a perdere man mano che l'intervallo si riduce, la geometria dell'oggetto evidenziando così solo l'anomalia termica o il punto caldo.

Solitamente per un'analisi qualitativa quindi si va ad analizzare il componente con intervalli ampi, per fare invece analisi quantitative e più precise invece si utilizzano ΔT piccoli.

Manutenzione preventiva degli impianti elettrici con analisi termografiche

Capitolo 3: Risultati ed interpretazioni di immagini termografiche

- EMISSIVITA' DELL'OGGETTO:

la scelta dell'emissività è importante per fare un'accurata misura della temperatura dell'oggetto. Come è stato più volte detto nei vari capitoli precedenti, ogni oggetto ha una propria emissività ϵ , quando la sua temperatura è maggiore dello 0 K. Ma l'emissività è funzione oltre che alla temperatura anche ad un'altra serie di parametri:

- GEOMETRIA;
- MATERIALE;
- ANGOLAZIONE MISURA;
- CONDIZIONE DELLA SUPERFICIE.

Esistono due metodi nella pratica per determinare precisamente l'emissività dell'oggetto :

- Tramite MISURA CON TERMOMETRO A CONTATTO: per prima cosa si deve andare a misurare la temperatura riflessa, tale valore misurato dovrà essere impostato sulla termocamera. Successivamente si passa alla misura della temperatura con il termometro a contatto. Fatto ciò impostiamo l'emissività della termocamera a 1 considerando quindi l'oggetto in esame come un "CORPO NERO".

Si noterà che la temperatura che la termocamera rileva e la temperatura misurata con il termometro sono diverse, questo è dovuto dal fatto che l'emissività dell'oggetto non è 1 ma è più bassa. Per settare correttamente la termocamera dovremmo quindi ridurre il valore dell'emissività fino ad ottenere un valore di temperatura uguale o abbastanza simile a quella rilevata dal termometro a contatto.

- Senza MISURA DIRETTA: dove non sia possibile effettuare una misurazione della temperatura diretta si può procedere nel seguente modo:

si effettua una misura con la termocamera dell'oggetto reimpostando la temperatura riflessa , una volta fatto si applica sulla superficie dell'oggetto una delle seguenti alternative:

- o Pezzo di nastro isolante nero o nastro ad emissività nota;
- o Ricoprire l'oggetto o parte di esso con un rivestimento o una vernice ad emissività nota;
- o Ricoprire l'oggetto di misura con uno spesso strato di OLIO RESISTENTE AL CALORE (per spesso strato s'intende $> 0,13$ mm) ed impostiamo l'emissività sulla termocamera di $\epsilon = 0,82$;
- o Ricoprire l'oggetto o parte di esso con uno spesso strato di FULIGGINE, impostando l'emissività della termocamera il valore di $\epsilon = 0,95$;

una volta scelta l'alternativa con la quale rivestire parte o tutto l'oggetto andremo a fare un'ulteriore indagine, le temperature rilevate sull'oggetto saranno prese come riferimento. A questo punto, come è stato fatto nel caso di rilievo con il termometro a contatto, andremo a settare il valore di emissività modificandolo fino ad ottenere un valore di temperatura simile o addirittura uguale a quella di riferimento giungendo al reale valore di emissività.

Manutenzione preventiva degli impianti elettrici con analisi termografiche

Capitolo 3: Risultati ed interpretazioni di immagini termografiche

Esistono anche tabelle che forniscono valori di emissività per alcuni materiali in alcune particolari condizioni sotto riportiamo una tabella riassuntiva:

MATERIALE	TIPO	T [°C]	ε
ACCIAIO	laminato a freddo	93	0,8
	lamierino grezzo	1000	0,6
	lamierino lucido	38	0,07
	non ossidato	100	0,08
	ossidato	25	0,8
ACQUA	Normale	20	0,98
	Distillata	20	0,96
ALLUMINIO	Opaco	17	0,89
	lucido	20	0,04
	non ossidato	25	0,02
	ossidato	200	0,11
	molto ossidato	93	0,2
ARGENTO	opaco	93	0,06
	lucido	38	0,01
ASFALTO - - 0.85		38	0,85
CALCE DOLOMIA		20	0,41
CALCESTRUZZO	Secco	36	0,95
	grezzo	20	0,95
CARBONE	normale	38	0,88
FULIGGINE	Nero fumo	24	0,96
GOMMA		25	0,95
GESSO	Intonaco	20	0,96
GHIACCIO		0	0,97
GHIAIA		38	0,28
GHISA		38	0,85
GOMMA		25	0,95
LEGNO		25	0,98
MATTONE	Normale	25	0,8
	Refrattario	17	0,68
	Mattonella	30	0,94
MOLIBDENO		100	0,03
NASTRO ISOLANTE ELETTRICO	nero	35	0,97
ORO	Smaltato	100	0,37
	Lucidato	38	0,02
OTTONE	lucido	38	0,1
	opaco	20	0,07
	Brunito	20	0,4

	ossidato	200	0,61
	non ossidato	25	0,04
MATERIALE	TIPO	T [°C]	ε
PANNELLI di GESSO		25	0,9
PANNELLI di LEGNO		17	0,91
PIOMBO	Lucidato	38	0,26
	rugoso	38	0,87
	ossidato	38	0,93
PERSPEX_PLEXIGLASS		17	0,86
PITTURA - VERNICE	con allume di Ag	20	0,26
	base di olio	20	0,87
	nero	20	0,94
	grigio	20	0,97
PLASTICA	nera	20	0,95
	bianca	20	0,84
POLIPROPILENE		17	0,97
RAME	ossidato	38	0,87
	ossidato nero	38	0,78
	inciso	38	0,09
	opaco	38	0,22
	corrugato lucido	38	0,07
	lucido	38	0,04
	lappato	38	0,02
	laminato	38	0,64
	ruvido	38	0,74
	fuso	538	0,15
	lamina	38	0,57
SABBIA		20	0,76
SEGATURA (polvere)		20	0,75
TERRENO - SUOLO	normale	38	0,38
	arida	20	0,92
	molto umido	20	0,95
VERNICE - LACCA		20	0,98
VETRO		20	0,85
ZINCO	ossidato	260	0,11
	lucido	38	0,02

3.2 FONTI DI ERRORI NELLA MISURA DELLA RADIAZIONE INFRAROSSA

La misura della radiazione infrarossa emessa dall'oggetto in analisi può essere falsata da alcuni parametri. Abbiamo visto prima quanti fattori incidono sull'esatta misurazione della temperatura dell'oggetto, qui sotto si riportano i principali fattori che possono portare all'errata misura di temperatura.

- IMPOSTAZIONE SCORRETTA DELL'EMISSIVITA':

Come è stato detto prima, la determinazione dell'emissività dell'oggetto in analisi è importante non per l'esatta visualizzazione dell'immagine termica ma per la corretta misura della temperatura come possiamo vedere dalle immagini qui sotto:



Fig.2.11: Immagine termica con $\epsilon=1$

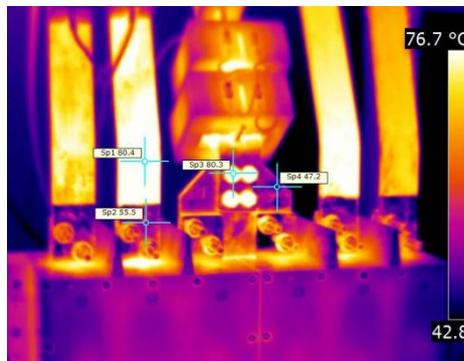


Fig. 2.12: Immagine termica con ϵ esatta

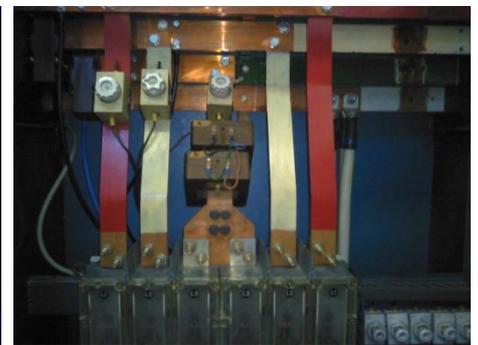


Fig. 2.13: Immagine nel visibile relativa alle figure 2.11 e 2.12

Osserviamo che nelle due immagini termografiche, sapendo che la Fig.2.11 e la Fig.2.12 hanno emissività diversa, dal punto di vista “visivo” non presentano differenze. Tuttavia se andiamo a vedere le temperature indicate dai punti e gli intervalli a sinistra notiamo alcune cose:

Fig.	Emissività ϵ	Temperatura Sp1	Temperatura Sp2	Temperatura Sp3	Temperatura Sp4
2.11	0,98	54.1 °C	39.7 °C	54.1 °C	35.1 °C
2.12	0,5	80.4 °C	55.5 °C	80.3 °C	47.2 °C

Come si può osservare con emissività 0,98 la temperatura rilevata sul rame verniciato (Sp1) è superiore a quella indicata nel rame non verniciato (Sp2), stesso discorso vale per la temperatura rilevata sui bulloni neri (Sp3) e quella rilevata sulla sbarra (Sp4); questo potrebbe portare a pensare che sulle sbarre e sui bulloni ci sono delle anomalie termiche ma pensando ciò si commette un errore infatti i punti Sp1 e Sp3 rilevano la temperatura dell'oggetto con la corretta emissività mentre i punti Sp2 e Sp4 necessitano un'emissività più bassa per rilevare temperature analoghe come si vede nella Fig.2.12. Bisogna però dire che nella Fig.2.12 i punti Sp1 e Sp3 indicano temperature molto più alte di quelle indicate prima ma questa volta sono loro ad avere un valore di emissività troppo basso. Si nota quindi quanto sia importante settare in modo corretto l'emissività per non fare

errori di valutazione affrettati e quanto sia importante nell'analisi dei metalli avere punti verniciati o dove sono presenti bollini di nastro isolante o materiali con emissività nota per il più facile rilievo della temperatura.

- **IMPOSTAZIONE SCORRETTA TEMPERATURA RIFLESSA:** per questo parametro valgono le stesse considerazioni fatte per l'emissività;
- **DISTANZA DI MISURA SCORRETTA:**
Quando si effettuano misurazioni a distanza troppo piccola si può vedere in modo poco chiaro l'analisi termografica dell'oggetto. Qualora invece l'immagine sia fatta a distanza troppo grande si rischia di avere nell'immagine i seguenti problemi:
 - Area di misura troppo grande rispetto all'IFOV dello strumento, questo porta alla possibilità di avere troppo rumore esterno all'interno dell'indagine;
Per evitare questo si consiglia di effettuare le indagini con lenti grand'angolari quando è possibile cambiare l'ottica della macchina, in ogni caso si cerca di fare l'indagine più vicina possibile stando in sicurezza;
 - Errori nel percorso di trasmissione dovute per esempio ad inquinamento atmosferico o a parziale o totale copertura dell'oggetto;
 - Effetto di fonti di radiazione esterne come bulbi luminosi caloriferi se l'indagine è all'interno di un edificio, o del sole per esempio se siamo all'esterno.
 - Erronea interpretazione dell'immagine dovuta a riflessi, tale fenomeno si presenta soprattutto con superfici molto lucide o ad emissività ridotta. Infatti su tali superfici qualsiasi fonte di calore nelle vicinanze può essere fonte di disturbo, anche la temperatura dello stesso operatore può risultare un disturbo sotto forma di riflesso speculare.
Per evitare ciò dobbiamo spegnere o se non è possibile spostare qualsiasi fonte di calore che può influenzare la misura;
 - Repentini cambi di temperatura ambiente, in questo caso è possibile che ci sia della condensa sulla lente

SOFTWARE PER L'INTERPRETAZIONE E CORREZIONE DELLE IMMAGINI TERMOGRAFICHE:

Come è stato più volte detto l'immagine termografica che lo strumento realizza è in "falsi colori". La visualizzazione del risultato dell'elaborazione del sensore potrà essere visualizzata:

- **IMMEDIATA:** nel caso lo strumento abbia incorporato uno schermo, solitamente LCD la cui grandezza può variare a seconda del tipo di macchina, nel quale si possa visualizzare in tempo reale l'immagine dell'oggetto in analisi. Nel caso in cui le termocamere non abbiano un display incorporato, di solito sono quelle per la ricerca e lo sviluppo o il monitoraggio industriale, la visualizzazione può essere fatta collegando da remoto o tramite un cavo BNC ad uno schermo visualizzandole da remoto con la possibilità anche di registrarle;
- **ANALISI REMOTA:** l'elaborazione dell'immagine può essere fatta in un secondo momento tramite software nei quali si possono "manipolare" le immagini precedentemente salvate.

Con tali software si possono quindi eliminare o correggere eventuali errori modificando alcuni parametri:

- modificare l' ϵ ;
- modificare la TEMPERATURA AMBIENTE;
- modificare l'UMIDITA' RELATIVA;
- modificare la DISTANZA DI MISURA DALL'OGGETTO;
- modificare l'INTERVALLO DI TEMPERATURA dell'oggetto per ottenere una corretta messa a fuoco termica o per evidenziare punti caldi

Non è invece possibile modificare la messa a fuoco della macchina e quindi in caso di foto SFOCATE è necessario ripetere l'analisi. Oltre alla modifica di questi parametri è possibile:

- INTRODURRE puntatori di misura per l'analisi di un punto preciso dell'immagine;
- INTRODURRE aree di misurazione nelle quali si possono ricavare i punti caldi e punti freddi oppure estrapolare i dati relativi alla temperatura dell'area stessa per poterli elaborare con altri programmi;
- INTRODURRE linee con le quali si possono realizzare grafici una volta estrapolati i dati o essi come per le aree vengono elaborati con altri programmi;
- CAMBIARE la palettatura di falsi colori con la quale è visualizzata l'immagine;
- REGOLARE in modo automatico l'intervallo della temperatura;
- CREARE aree isotermitiche con le quali si colorano con lo stesso colore le parte dell'immagine che hanno la stessa temperatura tali aree possono essere:
 - o Sopra il riferimento: vengono "colorate" tutte le aree con temperatura al di sopra del riferimento impostato;
 - o Sotto il riferimento: vengono "colorate" tutte le aree con temperatura al di sotto del riferimento impostato;
 - o Intervallo: vengono "colorate" le aree con temperatura compresa nell'intervallo indicato;
- IMPOSTARE un allarme di punto di rugiada o di isolamento se si sta realizzando un'analisi edilizia.

Capitolo 4: applicazione della termografia nel monitoraggio e manutenzione degli impianti elettrici

4.1 SETTORI PER L'APPLICAZIONE DELLA TERMOGRAFIA:

La termografia può trovare numerosi campi di applicazione grazie alla sua versatilità nell'analizzare elementi che possono essere molto diversi tra loro, i principali campi di applicazione di questa tecnologia sono:

1. **SETTORE ELETTRICO/MECCANICO:** con essa è possibile rilevare anomalie spesso invisibili ad occhio nudo consentendo di adottare azioni correttive che permettono di evitare costosi guasti del sistema in esame o addirittura dell'intero impianto. In seguito a questo capitolo verranno approfonditi l'importanza, le modalità di analisi e l'interpretazione di questa per vari componenti elettrici e meccanici;
2. **SETTORE EDILE:** la termocamera mette in risalto problemi di varia natura presenti nelle costruzioni come ad esempio: isolamento termico, risalite di umidità ed altre anomalie. Con tali analisi si possono adottare azioni correttive e verificare la dispersione termica dell'edificio;
3. **RICERCA & SVILUPPO:** La termografia trova ampio spazio in questi due ambiti. Si passa dall'applicazione in microelettronica alla lavorazione della carta o di materiali plastici, dall'industria automobilistica alla valutazione dei vari materiali, persino per i test di fatica meccanica. Solitamente per questo tipo di applicazioni si utilizzano termo camere fisse e non portatili come invece capita per le applicazioni elettriche/meccaniche o edili;
4. **AUTOMAZIONE:** Con la termocamera è possibile monitorare la produzione continua controllando così sempre la qualità della lavorazione. Può essere inoltre utilizzata per applicazioni di sicurezza con tempestive segnalazioni di condizioni potenzialmente critiche. Le termocamere utilizzate sono simili a quelle utilizzate per la RICERCA & SVILUPPO ma solitamente sono equipaggiate con sensori "meno evoluti"
5. **RICERCA PERDITE DI GAS:** Con questa applicazione si può utilizzare la termografia per la ricerca di fughe di gas serra come SF₆, metano o altri composti volatili organici. Si può anche individuare l'analisi di composti di fumi ad altissima temperatura alimentati da gas o riscaldatori o caldaie a carbone;
6. **MEDICINA & VETERINARIA:** un'ulteriore applicazione è quella in campo medico che permette l'individuazione di anomalie sia nell'uomo sia negli animali senza l'intervento invasivo.

4.2 PROCEDURA PER LA REALIZZAZIONE DI UN'INDAGINE TERMOGRAFICA NEL SETTORE ELETTRICO:

Come è stato accennato nel paragrafo precedente le termocamere utilizzate negli impianti industriali sono uno strumento potente che trova molte applicazioni per il monitoraggio, diagnosi delle condizioni di installazione dei componenti elettrici, verificare delle linee elettriche anche quando esse non sono visibili o parzialmente nascoste, in quanto un riscaldamento anomalo della conduttura evidenzia la presenza di un eventuale sovraccarico della linea o un dimensionamento errato della stessa o altre cause. Quest'ultima situazione è più frequente però nei quadri elettrici (è facile osservare i cavi che entrano nel quadro) nelle passerelle a filo che lasciano intravedere i cavi o in alcuni casi anche nei muri sotto l'intonaco.

Gli eventuali problemi in un impianto che vengono rilevati possono essere documentati e corretti prima che essi si aggravino, premettendo anche il confronto tra le situazioni prima e dopo l'intervento.

Un'immagine termica che include dati accurati di temperatura fornisce ad un esperto manutentore importanti informazioni sulle condizioni dei dispositivi ispezionati. Il vantaggio ulteriore è rappresentato dalla possibilità di fare indagini in condizioni critiche cioè con quando il ciclo produttivo è a regime senza la necessità di fermare l'intero impianto.

La termografia industriale richiede però tutta una serie di accorgimenti ed informazioni al fine di realizzare un'indagine accurata.

Nel caso di ispezioni negli impianti elettrici: è molto importante conoscere i carichi gravanti o massimi in quella linea, le temperature massime ammissibili dei componenti in esame. Importante inoltre è conoscere le condizioni esterne al componente, nel caso si stia facendo un'indagine all'esterno per esempio si dovrà conoscere la velocità del vento e altri fattori climatici che possono incidere sulla temperatura del componente. Per i rilievi interni invece sarà molto importante sapere se esistono sistemi di raffreddamento come per esempio sistemi di condizionamento del locale o effetti convettivi causati dal sistema di raffreddamento del componente stesso (per esempio il sistema per il raffreddamento degli avvolgimenti e del cassone esterno sono attivi nel caso di un'ispezione ad un trasformatore).

Come si è visto nei capitoli precedenti è importante rendere "MISURABILE" l'oggetto che si vuole analizzare predisponendo punti ad alta emissività poiché si può leggere la temperatura più precisa nel caso di analisi di metalli conduttori come sbarre di rame solitamente lucide e quindi di difficile interpretazione a causa dei possibili riflessi dovuti all'ambiente esterno. Nel caso in cui l'ispezione avvenga in armadi chiusi che non possono aperti senza mettere a rischio l'incolumità dell'operatore stesso è consigliato predisporre finestre apposite con lenti in monocristallo di germanio, la scelta di questo materiale è dovuta al fatto che come abbiamo detto nel capitolo 2 il vetro e il plexiglass non sono adatti per l'indagine infrarossa.

E' importante inoltre scegliere il momento giusto durante il quale fare l'indagine, bisognerà evitare quindi situazioni di carico della linea basse, nel caso l'indagine fosse fatta all'esterno evitare di farle quando ci sono forti raffiche di vento che investono il componente in analisi o quando piove.

Importante sarà anche la definizione dei punti di misura per creare una base di dati di riferimento, valutando le condizioni al contorno.

Non bisogna essere frettolosi quando si fa un'indagine termografica, prima di effettuare il rilevamento è necessario rilevare alcuni parametri ambientali che devono essere considerati, soprattutto se si è all'esterno. La temperatura ambiente è il parametro che deve essere sempre rilevato quando si fa un'indagine sia essa interna sia esterna, nel caso di rilievi esterni sarà inoltre molto importante ai fini delle considerazioni finali conoscere l'umidità relativa, la velocità del vento e l'irraggiamento del sole sull'oggetto in analisi, quest'ultimo è molto importante quando si vanno a valutare lo stato dei pannelli fotovoltaici.

Nelle ispezioni all'interno dei fabbricati una volta rilevata la temperatura ambiente bisognerà settare l'emissività a 1 e la distanza a 0 metri, nel caso invece l'indagine fosse all'esterno settare se si conosce la distanza dall'oggetto.

Nell'ispezione di interruttori scatolati nei quali i collegamenti sia in partenza sia in arrivo siano fatti con cavi è conveniente avere con sé una pinza amperometrica o vedere se è presente un amperometro. Questo perché così si può conoscere il carico sulla linea o sulle singole fasi dell'interruttore, questo è importante per evitare di commettere errori in caso di individuazione di anomalie termiche, inoltre è utile conoscerlo per la verifica dell'esatto dimensionamento del cavo.

Per l'ispezione di sbarre conduttrici invece l'unico strumento che ci può permettere una corretta analisi è applicazione su di essa di un pezzo di materiale con alta emissività per avere una più precisa lettura di temperatura. In commercio esistono marcatori ad emissività nota i quali permettono una corretta misura della temperatura, è inoltre possibile applicare un pezzo di nastro isolante nero ottenendo un effetto in parte uguale.

Infine prima di procedere con l'ispezione è importante fare una foto "visibile" cioè con una macchina fotografica in modo da poter interpretare meglio il termogramma. I recenti modelli di termocamera hanno una fotocamera incorporata per poter realizzare questo senza aver bisogno di più macchine, è inoltre possibile per le macchine di fascia medio - alta (dedicata a professionisti) la realizzazione di immagini nelle quali è presente insieme sia l'immagine nel visibile sia quella nell'infrarosso, questo strumento permette di evidenziare un'area in particolare all'infrarosso lasciando il resto nel visibile, o solo un intervallo di temperatura.

Una volta seguite le operazioni sopra descritte, si passa all'osservazione con la termocamera, come è stato detto più volte è possibile fare una veloce indagine quantitativa osservando tutto l'oggetto in esame, per poi passare ad un'analisi più qualitativa nella quale si va a valutare i punti più caldi individuati prima e soffermandosi più a lungo su questi.

Solitamente quando vengono individuate anomalie termiche si va a vedere la temperatura di quel punto valutandolo a seconda di quanto alta è la temperatura:

- Se la temperatura $T < 5^{\circ}\text{C}$ della massima temperatura ammissibile dal componente non si procede con nessuna azione preventiva;
- Se la temperatura T è tra 5 e 10°C maggiore della temperatura massima ammissibile si tiene sotto controllo il componente programmando un'ulteriore verifica;
- Se la temperatura T è tra i 10 e 35°C di sovratemperatura rispetto alla massima ammissibile verrà pianificata insieme al proprietario una fermata pianificata per poter operare in sicurezza per controllare o nell'eventualità riparare il componente
- Se la temperatura $T > 35^{\circ}\text{C}$ di sovratemperatura rispetto alla massima ammissibile si procederà alla fermata immediata per la manutenzione straordinaria sull'oggetto in analisi;
- Quando si analizzano motori elettrici valutando la parte meccanica bisogna stare attenti quando essa supera i 60°C infatti oltre questa soglia la maggior parte dei lubrificanti subisce un veloce degrado in modo molto marcato

Una volta che si sono rilevati i punti o semplicemente una volta conclusa l'analisi è possibile andare a confrontare le indagini appena realizzate con delle indagini precedentemente fatte (se esse ci sono). In questo modo si potrà monitorare eventuali decadimenti o degradi del componente o semplicemente verificare se sono state trovate anomalie termiche durante l'ispezione appena conclusa, se tali non fossero presenti nelle ispezioni precedenti (nel caso in cui fossero presenti indagini precedenti). Nel caso in cui l'analisi sia stata fatta dopo eventi che possono aver "stressato" il componente come per esempio un corto o una scarica atmosferica è possibile verificare se esistono foto precedenti all'evento in modo da valutare se il componente continua a funzionare in modo adeguato o se l'evento ha portato ad un parziale o totale degrado dell'oggetto.

4.3 NORME PER LE INDAGINI TERMOGRAFICHE INDUSTRIALI:

La termografia è un metodo di indagine "non distruttivo" cioè non va ad interagire direttamente con l'oggetto in esame, esistono molte norme che regolamenta l'analisi, la formazione dei soggetti addetti alla realizzazione delle prove e in generale a tutti i regolamenti necessari per una corretta verifica non solo con la termografia ma con tutte le "prove non distruttive" e della realizzazione di documentazione dei risultati secondo le norme. Di seguito è riportato l'elenco delle norme principali con una breve spiegazione (non sono state inserite le norme che si utilizzano per la termografia nel campo dell'edilizia):

- ✓ UNI EN 473:2008-11 - Prove non distruttive - Qualificazione e certificazione del personale addetto alle prove non distruttive - Principi generali: norma europea EN 473 (edizione giugno 2008). La norma stabilisce i principi per la qualificazione e la certificazione del personale incaricato di effettuare prove non distruttive (PND) in campo industriale. Il termine "industriale" implica l'esclusione delle applicazioni nel campo della medicina;
- ✓ UNI EN 13306:2010 - Manutenzione - Terminologia di manutenzione : Norma europea EN 13306 (edizione agosto 2010). La norma specifica i termini generici e le loro definizioni per le aree tecniche, amministrative e gestionali della manutenzione. La sua applicazione non è prevista per i termini utilizzati esclusivamente per la manutenzione di programmi di informatica. E' tuttavia considerata la manutenzione di beni e sistemi che contengono software;
- ✓ UNI EN 13460:2009 - Manutenzione - Documentazione per la manutenzione: norma europea EN 13460 (edizione aprile 2009). La norma specifica delle linee guida generali per:- la documentazione tecnica da allegare ad un bene, prima della sua messa in servizio, per essere di supporto alla sua

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici

manutenzione;- la documentazione relativa alle informazioni da stabilire durante la fase operativa di un bene, per essere di supporto ai requisiti di manutenzione;

- ✓ ISO 7345:1987 - Isolamento termico - Grandezze fisiche e definizioni: Isolamento termico - Grandezze fisiche e definizioni: norma che definisce le grandezze fisiche utilizzate nel campo dell'isolamento termico, tra l'altro la quantità di calore, portata di calore, la densità di flusso del calore, conducibilità termica, resistenza termica, trasmittanza termica, capacità termica, diffusività termica, ecc, e dà il corrispondente simboli e unità;
- ✓ ISO 9288:1989 - Isolamento termico - Trasferimento di calore per irraggiamento - Grandezze fisiche e definizioni: Norma che contiene termini generali, termini relativi alle superfici sia di ricezione, il trasferimento o che emettono una radiazione termica, i termini relativi alle superfici che emettono una radiazione termica, i termini relativi alle superfici opache o semi-trasparente, ricevendo una radiazione termica, i termini relativi ad un semi-trasparente di media ricevono una radiazione termica, e la loro definizione;
- ✓ ISO 9712:2005 - Prove non distruttive - Qualificazione e certificazione del personale: norma che specifica la qualifica e certificazione del personale addetto a controlli non distruttivi (NDT).E 'applicabile a conoscenza in uno o più dei seguenti metodi: le prove di emissione acustica; prova a correnti parassite; test termografico ad infrarossi, prove di tenuta (prove di pressione idraulica esclusi); test di particelle magnetiche, penetranti, controllo radiografico; test ceppo; test ad ultrasuoni ; test visivo (diretta test senza aiuto visivo e le prove visive effettuate durante l'applicazione di un altro metodo NDT sono esclusi);
- ✓ ISO 13374-1:2003 - Condizione di monitoraggio e diagnostica delle macchine - Elaborazione dei dati, comunicazione e presentazione - Parte 1: Linee guida generali: la norma stabilisce le linee guida generali per le specifiche software relativo al trattamento dei dati, la comunicazione, e la presentazione del monitoraggio delle condizioni macchina e le informazioni diagnostiche;
- ✓ ISO 13372:2004 - Condizione di monitoraggio e diagnostica delle macchine – Vocabolario: la norma specifica le definizioni dei termini utilizzati nel monitoraggio delle condizioni e la diagnostica di macchine. Esso è destinato a fornire agli utenti e produttori di monitoraggio delle condizioni e dei sistemi di diagnostica con un vocabolario comune;
- ✓ ISO 17359:2011 - Condizioni di monitoraggio e diagnostica delle macchine – Linee guida generali: la norma definisce le linee guida per le procedure generali da considerare per la creazione di un programma di monitoraggio delle condizioni per le macchine e include riferimenti a norme associati necessari in questo processo. Applicabile a tutte le macchine;
- ✓ ISO 13379:2003 - Condizione di monitoraggio e diagnostica delle macchine - Linee guida generali per l'interpretazione dei dati e delle tecniche di diagnostica: la norma fornisce una guida per l'interpretazione dei dati e la diagnostica di macchine. Esso è destinato a permettere agli utenti e produttori di monitoraggio delle condizioni e dei sistemi diagnostici di condividere concetti comuni nel campo della diagnostica della macchina, per consentire agli utenti di preparare le necessarie caratteristiche tecniche che verranno utilizzate per la diagnosi ulteriore della condizione della macchina; e per dare un approccio adeguato per raggiungere una diagnosi di guasti della macchina. Dal momento che fornisce linee guida generali, un elenco dei tipi di macchine indirizzato non è incluso. Tuttavia normalmente comprende macchine industriali quali turbine, compressori, pompe, generatori, motori elettrici, compressori e ventilatori;
- ✓ ISO 13381-1:2004 - Condizione, monitoraggio e diagnostica di macchine - pronostici - Parte 1: Linee guida generali: la norma fornisce una guida per lo sviluppo dei processi di prognosi. Esso è destinato a permettere agli utenti e produttori di monitoraggio delle condizioni e dei sistemi diagnostici di condividere concetti comuni nel campo della prognosi macchinari guasti, per consentire agli utenti di determinare i necessari dati, caratteristiche e comportamenti necessari per la

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici

- prognosi accurate; a delineare un approccio adeguato a prognosi di sviluppo, e di introdurre concetti di prognosi al fine di facilitare lo sviluppo di futuri sistemi e formazione;
- ✓ ISO / IEC 17050-2:2004 - Valutazione della conformità - Dichiarazione del fornitore di conformità - Parte 2: Documentazione di supporto: la norma specifica i requisiti generali per la documentazione di supporto a sostegno di una dichiarazione del fornitore di conformità, come descritto nella norma ISO / IEC 17050-1. Ai sensi della norma ISO / IEC 17050-2:2004, l'oggetto di una dichiarazione di conformità può essere un prodotto, processo, sistema di gestione, persona o ente;
 - ✓ ISO / IEC 17024:2003 - Valutazione della conformità - Requisiti generali per organismi di certificazione operanti di persone: la norma specifica i requisiti per le persone un ente di certificazione del rispetto dei requisiti specifici, compreso lo sviluppo e la manutenzione di un sistema di certificazione per il personale;
 - ✓ ISO 18436-1:2004 - Condizione di monitoraggio e diagnostica delle macchine - Requisiti per la formazione e certificazione del personale - Parte 1: Requisiti per gli organismi di certificazione e il processo di certificazione: la norma definisce i requisiti per organismi che gestiscono sistemi di certificazione per il personale che esegue il monitoraggio delle condizioni macchina, identificare difetti della macchina, e raccomandare azioni correttive. Procedure per la certificazione di monitoraggio delle condizioni di diagnosi e di personale sono specificati. Norma corretta con la ISO 18436-1:2004 / Cor 1:2006;
 - ✓ ISO 18436-7:2008 - Condizione di monitoraggio e diagnostica delle macchine - Requisiti di qualificazione e di valutazione del personale - Parte 7: Termografia: la norma specifica i requisiti di qualificazione e di valutazione del personale che esegue il monitoraggio delle condizioni macchina e la diagnostica con termografia a infrarossi. Un certificato o dichiarazione di conformità alla norma fornirà riconoscimento delle qualifiche e delle competenze degli individui di eseguire misurazioni termiche e analisi per il monitoraggio macchinari condizione utilizzando apparecchiature portatili di immagini termiche. Questa procedura non può applicarsi ad attrezzature speciali o altre situazioni specifiche. La norma specifica un programma di tre categorie di classificazione.
 - ✓ ISO 18434-1:2008 - Condizione di monitoraggio e diagnostica delle macchine - Termografia - Parte 1: Procedure generali: la norma fornisce un'introduzione per l'applicazione della termografia a infrarossi (IRT) di monitoraggio macchinari condizione e diagnostica, in cui "macchina" comprende ausiliari della macchina come le valvole, fluido e le macchine ad alimentazione elettrica, macchinari e attrezzature connesse scambiatore di calore. Inoltre, le applicazioni IR relativi alla valutazione delle prestazioni macchinari sono stati affrontati. Inoltre introduce la terminologia della IRT per quello che attiene al monitoraggio delle condizioni e la diagnostica delle macchine; descrive i tipi di procedure IRT ed i loro meriti, fornisce una guida per stabilire i criteri di valutazione di gravità per le anomalie identificate da IRT, metodi e delinea i requisiti per lo svolgimento IRT di macchine, comprese le raccomandazioni di sicurezza; fornisce informazioni sulla interpretazione dei dati e criteri di valutazione e di reporting, fornisce le procedure per la determinazione e compensare riflessa temperatura apparente, emissività, e attenuando i media. Infine comprende anche procedure di test per la determinazione e compensare riflessa temperatura apparente, emissività, e riduzione dei mezzi di comunicazione quando si misura la temperatura superficiale di un obiettivo con una fotocamera IRT quantitativo. [D],[E],[F]

4.4 INDAGINI TERMOGRAFICHE NEGLI IMPIANTI DI MEDIA TENSIONE:

Per Media Tensione si intende l'intervallo di tensione che va tra i 1000 V(1kV) a 30000 V(30 kV) in regime alternato e tra i 1500 V(1,5kV) e 35000 V(35kV) se siamo in regime continuo.

Il valore delle tensioni nominali fissate per norma che sono presenti negli impianti elettrici in media tensione sono i 10 kV, 15 kV e 20 kV.

Le apparecchiature presenti quando si parla di un impianto di media tensione sono:

- **SEZIONATORE:** apparecchio in grado di assicurare in posizione di APERTO una distanza di isolamento tra le parti in tensioni. Tale apparecchio DEVE essere aperto solo quando è stata interrotta la corrente nel circuito e di essere chiuso prima che venga stabilita;
- **SEZIONATORE DI TERRA:** apparecchio per la messa a terra delle parti di un circuito, è capace di sopportare per un tempo determinato le correnti di corto circuito, ma non è in grado di portare in modo continuativo una determinata corrente;
- **INTERRUTTORE DI MANOVRA:** Apparecchio capace di stabilire la corrente di cortocircuito, portare ed interrompere la corrente in condizioni normali del circuito e sopportare per un tempo definito anche quelle di cortocircuito;
- **FUSIBILE:** dispositivo di interruzione ottenuta, mediante fusione di parti predisposte e proporzionate a tale scopo quando la corrente supera un determinato valore per un tempo sufficiente;
- **INTERRUTTORE:** apparecchio capace di stabilire, portare, ed interrompere le correnti in condizioni normali ed inoltre di stabilire, portare, ed interrompere correnti in corto circuito. Esistono vari tipi di interruttori i più diffusi sono con isolamento in Aria, a vuoto o con SF₆;
- **TRASFORMATORE:** apparecchio statico che consente di variare i parametri di tensione e di corrente in ingresso rispetto a quelli in uscita pur mantenendo la quantità di potenza elettrica apparente a meno delle perdite. Esistono vari tipi di trasformatore: TRASFORMATORI DI POTENZA, TRASFORMATORI DI CORRENTE E TENSIONE usati per le misure delle grandezze quando siamo in media e alta tensione;

Di seguito si riporteranno le indagini termografiche su alcuni componenti descritti sopra. Per quanto riguarda l'interruttore essendo "scatolato" cioè chiuso in un involucro, esso quindi non permette l'ispezione con la termocamera dei dispositivi interni poiché se aperto si rischia di compromettere l'isolamento del componente, inoltre è impossibile procedere all'ispezione dei contatti poiché, soprattutto se l'interruttore è in SF₆ o a vuoto, essi sono sigillati all'interno di una camera che non può essere aperta, forata o intaccata, in questo caso la termografia potrà rilevare solo il riscaldamento dell'involucro esterno dell'interruttore.

➤ SEZIONATORE:

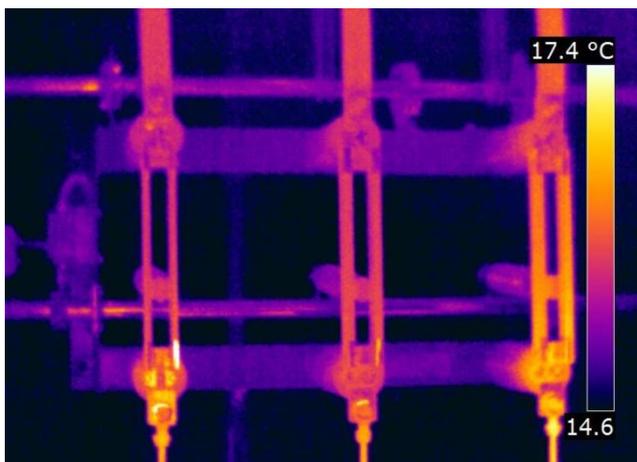


Fig. 4.1: Immagine Termica sezionatore di MT

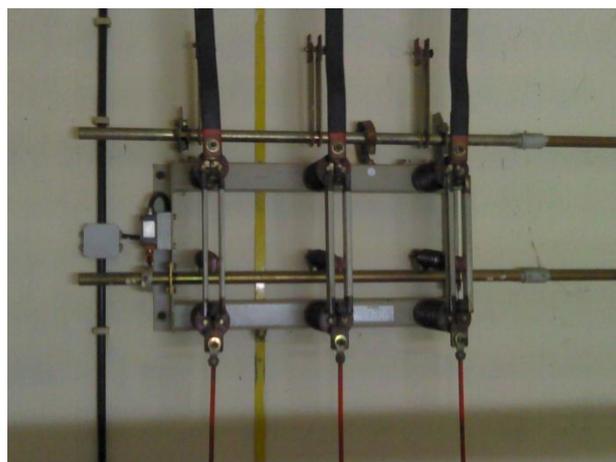


Fig. 4.2: Immagine visibile sezionatore MT

A sinistra (Fig. 4.1) possiamo vedere l'immagine termografica mentre quella a destra (Fig. 4.2) abbiamo l'immagine nel visibile.

I materiali in questo caso tranne i capicorda a valle del sezionatore sono opachi, non è stato quindi necessario fare una compensazione dell'emissività ritenendo giusto mantenendo un valore fissato sulla termocamera di 0,98, la temperatura ambiente della cabina era di 15 °C.

Osservando il termogramma senza alcun punto di analisi sembrerebbe che la fase a sinistra è più calda rispetto alle altre due, questo lo si può dire perché ha una colorazione più chiara, mentre le temperature sui morsetti a valle del sezionatore sono circa uguali.

Inoltre se si osserva bene però si nota una macchia bianca sul meccanismo della fase a sinistra perciò a primo impatto l'indagine presenta due situazioni sospette e si deve perciò procedere all'analisi delle temperature:

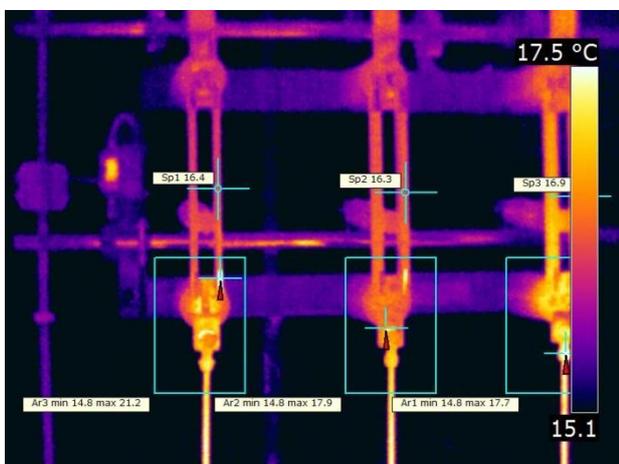


Fig 4.3: Immagine termografica sezionatore con aree di analisi, punti caldi delle aree e punti di misurazioni

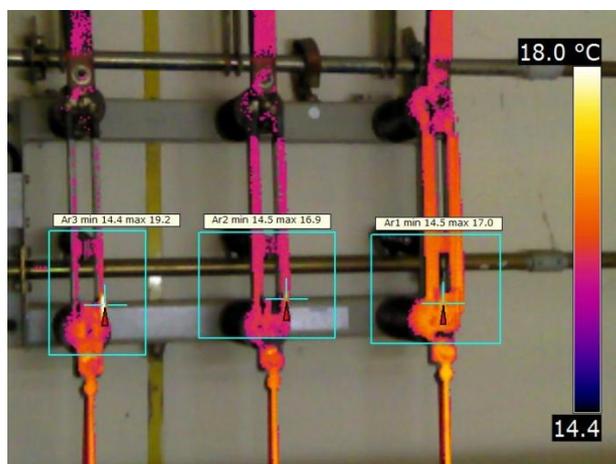


Fig 4.4: Immagine termica "fusa" in quella visibile per una individuazione del calore nei soli punti di interesse

Nella Fig. 4.3 sono indicate con i punti Sp1, Sp2 e Sp3 le temperature puntuali della sbarra mentre le aree comprendono lo snodo del meccanismo che permette l'apertura delle sbarre e quindi il sezionamento della linea, e indicate all'interno c'è il punto più caldo dell'area.

La tabella qui sotto ci riporta tutti i valori di temperatura delle aree e dei punti della Fig. 4.3:

Temperatura area 1 [°C]	Temperatura area 2 [°C]	Temperatura area 3 [°C]	Temperatura Sp1 1 [°C]	Temperatura Sp2 [°C]	Temperatura Sp3 [°C]
Min: 14.8	Min: 14.8	Min: 14.8	16.4	16.3	16.9
Max: 21.2	Max: 17.9	Max: 17.7			

Nella Fig. 4.4 a destra invece si può vedere l'immagine termografica "fusa" con l'immagine nel visibile, l'indagine termografica è presente solo per un delta di temperatura che va dai 16,4 °C ai 21 °C in modo tale da mettere in risalto solo le zone che hanno temperatura all'interno del range.

Dalla tabella possiamo vedere che la temperatura della sbarra due è sì più calda ma è solo di 0,5 °C rispetto a quella a sinistra, tale sovratemperatura può essere causata da vari fattori esterni e anche la stessa lontananza dalla sbarra può essere fonte di errore.

Il punto che merita particolare attenzione invece è quello presente sullo snodo del sezionatore, la temperatura in quel punto è di circa 5 °C superiore rispetto a quello della sbarra, non è una temperatura che possa essere considerata di grave pericolo ma è pur sempre un particolare che deve essere tenuto d'occhio e controllato durante le manutenzioni successive.

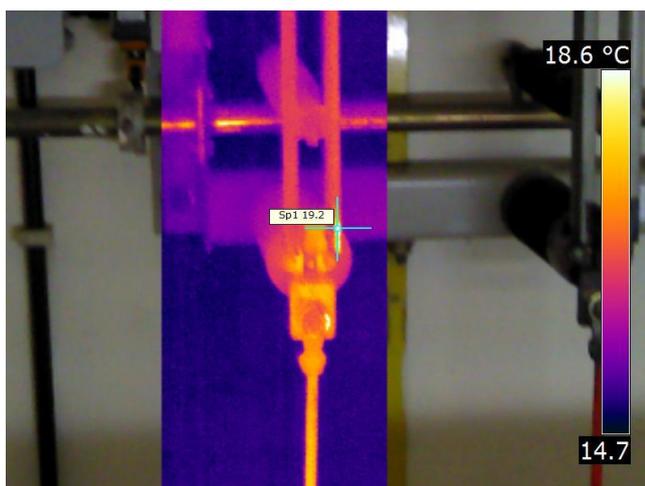


Fig. 4.5: Particolare del sezionatore in cui è stato rilevato un punto più caldo

Tuttavia in merito a questo caso, per motivi di sicurezza per l'operatore non è possibile procedere con altre ispezioni fino a quando non si è tolto il carico. Perciò quando si individuano punti caldi di questo tipo non si può escludere a priori che non sia dovuto a riflessi o altre fonti che possono generare il punto caldo, in ogni caso fino a quando si trovano sovratemperature così basse non c'è motivo di mettere allarme, ci si limita a segnalare l'anomalia.

➤ **TRASFORMATORE:**

Nell'analisi di un trasformatore, a causa delle dimensioni spesso notevoli soprattutto per macchine alimentate di elevata potenza per distribuzione, non è possibile realizzare un termogramma qualitativo del trasformatore intero. Verranno quindi considerati in due o tre termogrammi a seconda della grandezza. Un'altra considerazione da fare è quali avvolgimenti valutare, sappiamo che il trasformatore ha un avvolgimento a tensione più alta e corrente più bassa e un avvolgimento a tensione più bassa e corrente più alta. Dato che le perdite per effetto Joule variano con il quadrato della corrente sarà quindi opportuno concentrare le ispezioni nell'avvolgimento con corrente più alta non trascurando però gli avvolgimenti con corrente più piccola i quali possono essere sede anche loro di problemi. Esso sarà il secondario per i trasformatori "abbassatori" oppure il primario se il trasformatore è "elevatore" di seguito verranno valutati termogrammi eseguiti su trasformatori abbassatori

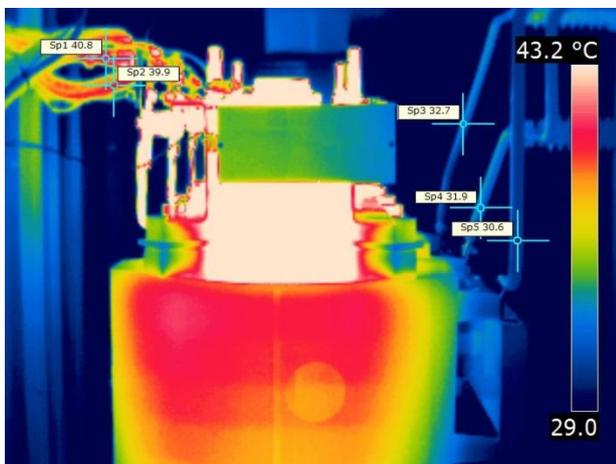


Fig. 4.6: Immagine termica trasformatore trifase



Fig. 4.7: Immagine nel visibile trasformatore trifase

Tralasciando per un attimo la messa a fuoco termica abbiamo voluto mettere in risalto nella Fig.4.6 la differenza di temperatura tra i morsetti primari (in media tensione, con corrente più bassa) posti a destra, nei quali è stato possibile indicare le temperature delle tre fasi, e i morsetti secondari (in bassa tensione e perciò con corrente più alta) nel quale per motivi di prospettiva è stato possibile indicare solo le temperature di due fasi. Le temperature rilevate sono state raccolte nella tabella qui sotto:

Temperatura Sp1 (fase 1 Secondario)	Temperatura Sp2 (fase 2 Secondario)	Temperatura Sp3 (fase 1 Primario)	Temperatura Sp4 (fase 2 Primario)	Temperatura Sp5 (fase 3 Primario)
40,8 °C	39,9 °C	32,7 °C	31,9 °C	30,6 °C

La Fig. 4.7 a destra invece rappresenta l'immagine del trasformatore di Fig. 4.6 nel visibile.

Se andiamo adesso a considerare un termogramma messo a fuoco possiamo vedere che un trasformatore che funziona ha una distribuzione di temperatura di questo tipo:



Fig.4.8 Immagine termica trasformatore parte superiore



Fig. 4.9: Immagine visibile parte superiore trasformatore

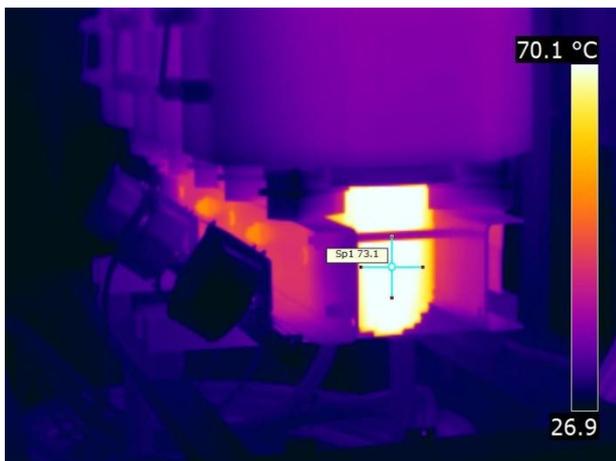


Fig. 4.10 Immagine termica trasformatore parte inferiore



Fig. 4.11: Immagine visibile parte inferiore trasformatore

In questo caso l'indagine è fatto su un trasformatore con poco carico, infatti una temperatura del nucleo può essere giustificata dall'assenza parziale di carico e quindi da un maggior contributo delle perdite nel nucleo ferromagnetico e quindi ad un aumento della temperatura. Grazie al grande ΔT tra la temperatura del nucleo e del resto dell'ambiente è stato possibile ottenere una buona immagine termica, le temperature che si raggiungono all'interno variano a seconda della potenza della macchina in questo caso il trasformatore ha le seguenti caratteristiche:

Trasformatore in resina tipo TG 5844 D
Pn 630 kVA ca 24 / 0,4 kV
Classe ambientale E2
Classe climatica C2
Classe isolamento al fuoco F1

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici

Andando ad analizzare la temperatura del cassone all'esterno (indicata con il punto Sp2 della prima immagine a sinistra) vediamo che anche se “visivamente” non sembra la temperatura rilevata dalla termocamera è di 40°C naturalmente è più bassa di quella rilevata dal sensore all'interno anche se essa si discosta di poco.

Il sistema di raffreddamento posto sulla parte inferiore del trasformatore è collegato con il sensore all'interno degli avvolgimenti, quindi i ventilatori permettono il loro raffreddamento, questo particolare è da tenere in considerazione quando si fanno indagini termografiche con il sistema in moto, dato che quest'ultimo può sfalsare l'indagine.

Con la termocamera però è possibile anche la valutazione dello stato delle connessioni dei cavi che dal secondario partono verso l'impianto a valle della trasformatore e dal primario che arrivano dalla cabina di consegna. Sono i punti più critici perché spesso sono i punti in cui si hanno più perdite principalmente dovute a:

- Crimpatura errata dei capicorda;
- Errato serraggio della bulloneria tra capocorda e morsetto del trasformatore;

tali cause possono portare a un rapido deterioramento dell'isolamento dei cavi nel caso in cui le partenze verso i quadri di distribuzione o le altre macchine siano collegati con essi o se il problema riguarda il serraggio, a scariche tra morsetto e capocorda con conseguenze che vanno dal danneggiamento del capocorda ad un possibile danneggiamento anche serio della macchina.

Nelle foto qui sotto osserviamo come la termografia ci permette di individuare particolari di questo tipo sotto forma di anomalie termiche o punti caldi:



Fig. 4.11: Immagine termica parte superiore di un trasformatore con un problema nella fase centrale



Fig. 4.12: Immagine nel visibile del trasformatore di Fig. 4.11



Fig. 4.13: Particolare termografico Fig.4.11



Fig. 4.14: Particolare nel visibile trasformatore

Fig. 4.9

Punto Sp1	Punto Sp2	Punto Sp3	Punto Sp1	Punto Sp2	Punto Sp3	Punto Sp4
Foto 1	Foto 1	Foto 1	Foto 2	Foto 2	Foto 2	Foto 2
93,2 °C	73,6 °C	51,5 °C	98,3 °C	72,2 °C	70,8 °C	54,4°C

Come si può notare, nella Fig. 4.11 nella pagina precedente viene rilevato un punto più chiaro corrispondente ai capicorda della fase centrale come si può vedere nella Fig. 4.12, viene osservato che nella stessa figura, la temperatura delle corde in prossimità del morsetto è di 93,2 °C (indicata con il punto Sp1) mentre la temperatura di una delle altre due fasi è di 51,5 °C (indicata dal punto Sp2). Le due temperature quindi presentano un ΔT molto elevato e quindi risulta necessaria un'analisi più approfondita.

Nella Figura 4.13 viene riportata l'analisi termografica dello stesso problema evidenziando la zona dell'anomalia termica, eseguendo l'analisi da più vicino restando però a distanza di sicurezza. Prima di procedere con l'analisi dei quattro punti presenti in figura dobbiamo fare una precisazione in merito alle due zone calde che si hanno in prossimità dei morsetti (zone di colore bianco sulla fase centrale e su quella più vicina), esse non sono altro che zone in cui si riflette la temperatura del nucleo centrale a causa dell'alta riflettività del materiale che compongono i morsetti perciò la temperatura rilevata NON è quella propria del morsetto ma risulta un RIFLESSO da non considerare. L'elevata temperatura del nucleo è da attribuire al basso carico connesso al trasformatore durante l'indagine. Infatti facendo lavorare il trasformatore in questo modo si vanno ad aumentare le perdite a vuoto nel circuito magnetico che si traduce in un aumento della temperatura nel nucleo ferromagnetico anche se solitamente fino a 120 °C non ci sono problemi.

Il quadrato di Fig. 4.13 evidenzia l'area nella quale sorge il problema la temperatura massima che si registra all'interno di esso è di 98,3°C, andando a fare un'analisi nei pressi dello stesso punto nella fase vicino possiamo osservare che la temperatura sul capocorda è di 70,8°C.

Possiamo ritenere che il problema non sia dovuto ad un eccessivo carico della fase poiché la temperatura del cavo cala man mano che ci si allontana dal problema infatti la temperatura scende a 72°C mentre la temperatura in presenza di un carico squilibrato si sarebbe dovuta mantenere all'incirca costante.

Per le fasi “sane” invece la temperatura sul capocorda è di circa 72 °C mentre man mano che si va verso l'interruttore del quadro generale scende con lo stesso decadimento della fase “anomala”.

Dopo la segnalazione e la fermata della fabbrica si è potuto constatare l'errata crimpatura dei capicorda poiché la realizzazione delle teste cavo erano state fatte a mano e quindi senza l'ausilio di pinze ad olio o strumenti che permettessero un corretto serraggio del capocorda sul cavo. Per rimediare a ciò si è provveduto ad sostituire i conduttori di quella fase e rifare le teste cavo.

➤ **TRASFORMATORI DI MISURA**

Un altro tipo di trasformatori che si possono trovare in media tensione sono i trasformatori di misura di corrente e di tensione. In serie alla linea troviamo i trasformatori riduttori di corrente detti TA di fase mentre in parallelo troviamo i trasformatori riduttori di tensione TV. Solitamente essi sono posti a monte o a valle del punto di consegna a seconda dello schema di connessione dell'impianto con la rete di distribuzione. A causa dell'elevato valore di corrente e tensione in MT non è possibile l'utilizzo diretto di apparecchiature per la misura delle grandezze del sistema e quindi l'utilizzo di protezioni dell'impianto e della rete del sistema, oltretutto a causa degli elevati valori delle grandezze è anche pericolosa una misura diretta da parte dell'operatore. Per ovviare a questi inconvenienti vengono inseriti questi trasformatori i quali riducendo la tensione e la corrente permettono l'utilizzo dei dispositivi prima inapplicabili al sistema. La termografia ci permette di valutare la temperatura esterna dell'involucro del trasformatore e lo stato delle connessioni ai capi dei trasformatori. Di sotto viene riportato un esempio di indagine termografica eseguita su un gruppo di misure a monte del punto di consegna ENEL:

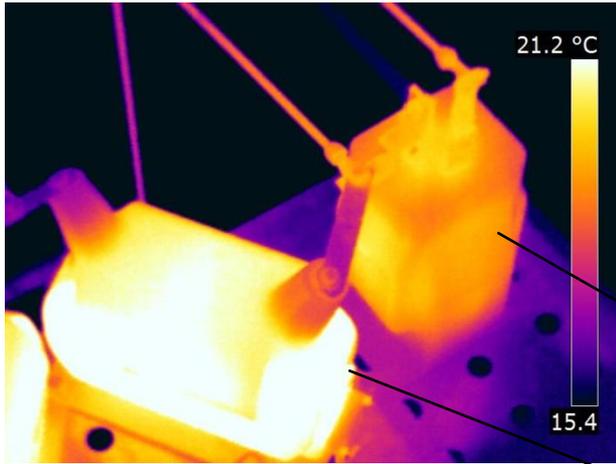


Fig. 4.15 a: Immagine termica parziale di trasformatori di misura

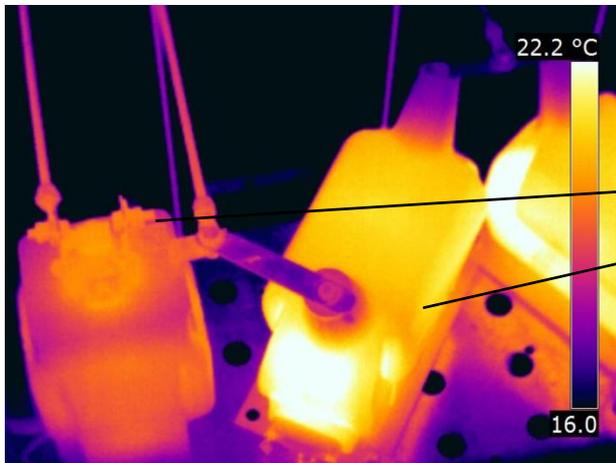


Fig. 4.15 b Immagine termica parziale di trasformatori di misura

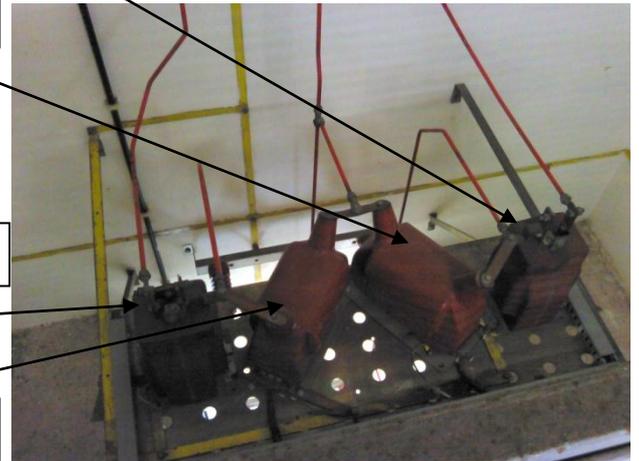


Fig. 4.16: immagine visibile trasformatori di misura

Le temperature rilevate sono ben all'interno dell'intervallo di funzionamento come possiamo vedere le connessioni all'apparenza sembrano fredde ma andando a vedere la foto nel visibile osserviamo che esse sono di rame quindi non sono più fredde ma semplicemente hanno un'emissività più bassa che le fa apparire tali.

4.5 INDAGINI TERMOGRAFICHE NEGLI IMPIANTI DI BASSA TENSIONE:

Per Bassa Tensione viene indicato l'intervallo di tensione che va da 1000 (1kV) a 50 V in regime alternato mentre da 1500 (1,5kV) a 120 V in regime continuo.

Questo livello di tensione è usato per alimentare una grande quantità di apparecchi e macchine di un'azienda o di un'abitazione.

Le apparecchiature che si hanno in bassa tensione che compongono un impianto in Bassa Tensione sono:

- **TRASFORMATORE:** i trasformatori in BT sono utilizzati nel caso di trasformatori abbassatori per le apparecchiature ausiliarie, esse infatti vengono alimentate a bassissima tensione cioè un valore minore di 50 V in regime alternato (120 V in regime continuo). Si può intuire come per i trasformatori in BT il funzionamento sia analogo a quello visto in MT e che le loro dimensioni sono notevolmente ridotte poiché le grandezze in gioco sono più piccole ;
- **INTERRUTTORE DIFFERENZIALE:** sono dispositivi posti a monte della macchina o di una parte dell'impianto, permettono in caso di guasto l'interruzione automatica dell'alimentazione per la sicurezza delle persone, dell'impianto o della macchina. A seconda di quante linee partono dall'interruttore generale possiamo avere più interruttori di questo tipo tarati con correnti di cortocircuito differenti. Questo permette di avere una selettività dell'impianto permettendo l'interruzione, se il guasto è di piccola entità, dell'alimentazione in quel punto permettendo così al resto delle apparecchiature di continuare a funzionare.
- **RIFASAMENTO:** viene realizzato inserendo delle "BATTERIE" di condensatori le quali permettono di compensare l'energia reattiva assorbita dagli utilizzatori dovuta al fattore di potenza troppo basso. Infatti i condensatori assorbono dalla rete una corrente sfasata di circa 90° in anticipo rispetto alla tensione, quindi la corrispondente potenza reattiva risulta di segno opposto rispetto a quella assorbita per esempio dai motori. L'inserzione dei condensatori consente di compensare la potenza reattiva.

Tali batterie possono essere poste nell'impianto principalmente :

- In prossimità delle macchine o dell'apparecchiature da rifasare, in questo caso avremo una "COMPENSAZIONE LOCALE";
- In prossimità degli interruttori o dei quadri di distribuzione, in questo caso avremo una "COMPENSAZIONE PARZIALE";
- In prossimità dell'interruttore generale dell'intero impianto, in questo caso avremo una "COMPENSAZIONE GLOBALE"

A protezione delle batterie di condensatori possono essere posti dei teleruttori di comando che inseriscono un numero di condensatori consono al livello di rifasamento necessario in quel momento e dei fusibili per proteggere questi da scariche esterne come per esempio fulmini.

Manutenzione preventiva degli impianti elettrici con analisi termografiche

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici

- **INTERRUTTORE:** componente presente nei quadri di distribuzione o nei pressi dell'apparecchio che esso comanda, esso a seconda della corrente scorre in esso sarà più o meno grande, spesso è associato a dispositivi di protezione per salvaguardare l'impianto o l'apparecchiatura.

Oltre a queste apparecchiature sono soggetti di ispezione anche i cavi conduttori, in applicazioni industriali vengono posti sotto osservazione anche motori elettrici.

Procederemo ora a mostrare delle analisi termografiche di alcuni dei componenti sopra esposti sia nel loro funzionamento normale sia in presenza di guasto.

➤ **INTERRUTTORE:**

La termografia ci permette di valutare in modo qualitativo quanto in quel momento l'interruttore è caricato, bisogna notare bene che non si può vedere quanto ma la temperatura ai capi della linea e all'interno dell'interruttore ci permettono di sapere la temperatura di quell'apparecchio e fare una valutazione approssimativa, sarà con il successivo impiego di strumenti come la pinza amperometrica o multimetri a dirci la corrente che in quel momento passa realmente.

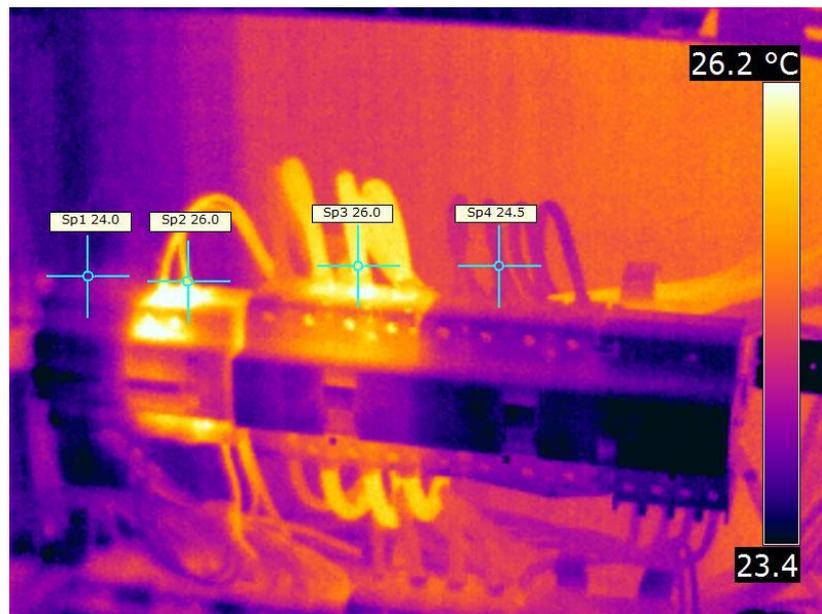


Fig. 4.18 Serie di interruttori caricati con correnti diverse

Temperatura Sp1	Temperatura Sp2	Temperatura Sp3	Temperatura Sp4
24°C	26,3°C	26°C	24,5°C
Carico interruttore Sp1	Carico interruttore Sp2	Carico interruttore Sp3	Carico interruttore Sp4
0,5 A	5 A	7 A	2 A

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici

In Fig.4.17 NON ci sono anomalie termiche, tuttavia è stata messa per spiegare cosa ci mostra una termocamera quando andiamo a fare un'indagine su alcuni interruttori. Infatti tutti e quattro gli interruttori sono percorsi da corrente tuttavia i due centrali presentano un carico superiore a quello di destra e quello di sinistra quindi appaiono più caldi, è quindi molto utili quando si vanno a fare le indagini termografiche considerare, quando si vedono situazioni come queste, la temperatura massima che in quel momento è presente nell'immagine per valutare se è un problema o solo il fatto che l'interruttore è più carico o no.

Ben diverso invece è quando si rileva il problema di sbilancio di carico in una fase di un interruttore trifase:



Fig. 4.19: Immagine termica interruttore con fase più caricata rispetto alle altre due



Fig. 4.20: Immagine nel visibile interruttore si può vedere che il conduttore più a destra è il neutro

Fig. 4.19 Tempera punto Sp1	Fig.4.19 Temperatura Sp2	Fig. 4.19 Temperatura Sp3	Fig. 4.19 Temperatura Sp4
30,8 °C	32,1 °C	35,9 °C	30,4°C

Osservando la Fig. 4.19 possiamo dire che la temperatura tra la fase più caricata, quindi più calda, e la fase più fredda è poco superiore ai 5 °C di ΔT , quindi non stiamo osservando un grave problema di squilibrio. La portata massima dell'interruttore in esame è di 600 A, al momento dell'analisi l'interruttore risultava caricato solo parzialmente motivo per il quale la temperatura è così bassa tuttavia non è stato possibile rilevare i carichi delle tre fasi. Nonostante ciò però dal termogramma appare evidente come non sia un problema di connessione dei morsetti dell'interruttore o il crimpaggio dei capocorda ma sia un problema di squilibrio del carico. infatti come possiamo osservare, la fase arriva all'interruttore già ad una temperatura più elevata rispetto alle altre due e all'uscita il problema rimane invariato è quindi interessante osservare come anche per interruttore poco caricato sia possibili riscontrare uno squilibrio termico tra le tre fasi. La temperatura della fase 2 è leggermente più alta di quella della fase 1 e la causa di questo potrebbe essere per esempio il riscaldamento della fase 3.

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici

A causa di un carico squilibrato è possibile avere una circolazione di corrente anche sul neutro, come possiamo vedere dalla Fig. 4.21. In questo caso avremmo una fase e il neutro più caricati rispetto alle altre due fasi. Le temperature anche in questo caso non sono elevate si parla di soli due gradi di differenza ma l'immagine ci permette di vedere che è presente un fenomeno di squilibrio e quindi un possibile problema a valle dell'interruttore:

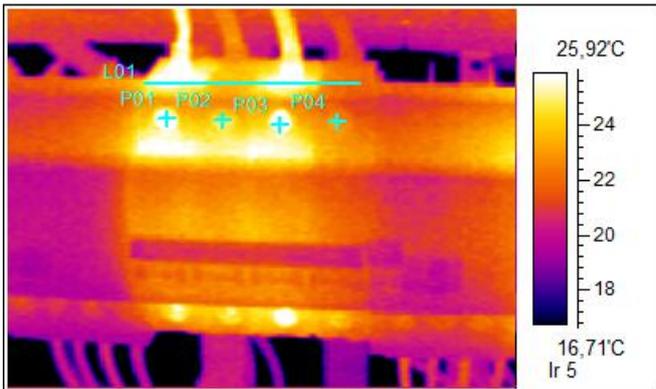


Fig. 4.21: Immagine termica di un interruttore differenziale con carico squilibrato



Fig.4.22: Immagine visibile interruttore differenziale

Fig. 4.21 Temperatura P01	Fig. 4.21 Temperatura P02	Fig. 4.21 Temperatura P03	Fig. 4.21 Temperatura P04
26,59 °C	22,75 °C	25,25 °C	21,93 °C

Mentre andando ad analizzare la linea L01 osserviamo che la distribuzione di temperatura lungo l'orizzontale presenta due picchi più alti in prossimità dei conduttori del neutro e della fase centrale mentre due più bassi in prossimità delle due fasi più fredde come mostrato dal grafico di Fig. 4.23.

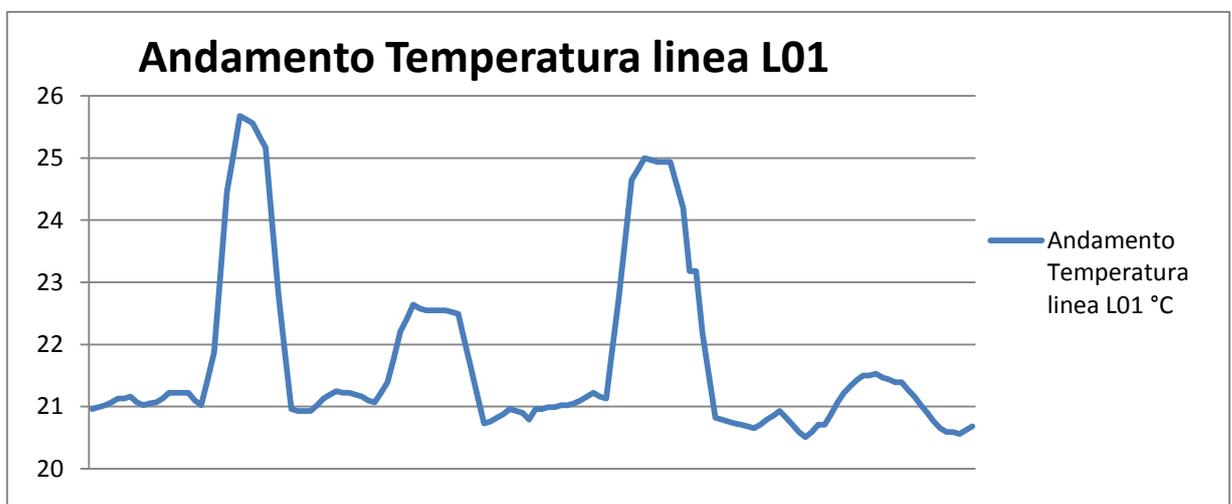


Fig. 4.23: Grafico con l'andamento della temperatura lungo la linea L01 di Fig.4.23

➤ **QUADRO DI RIFASAMENTO:**

Nel rifasamento come abbiamo descritto sopra non ci sono solo le batterie di condensatori come elementi da analizzare, esistono altri componenti che permettono la protezione e la regolazione dell'inserzione di quest'ultime.

L'immagine termica e nel visibile di un quadro di rifasamento che possiamo considerare a titolo di esempio sono le figure Fig. 4.24 e Fig. 4.25 riportate qui sotto:

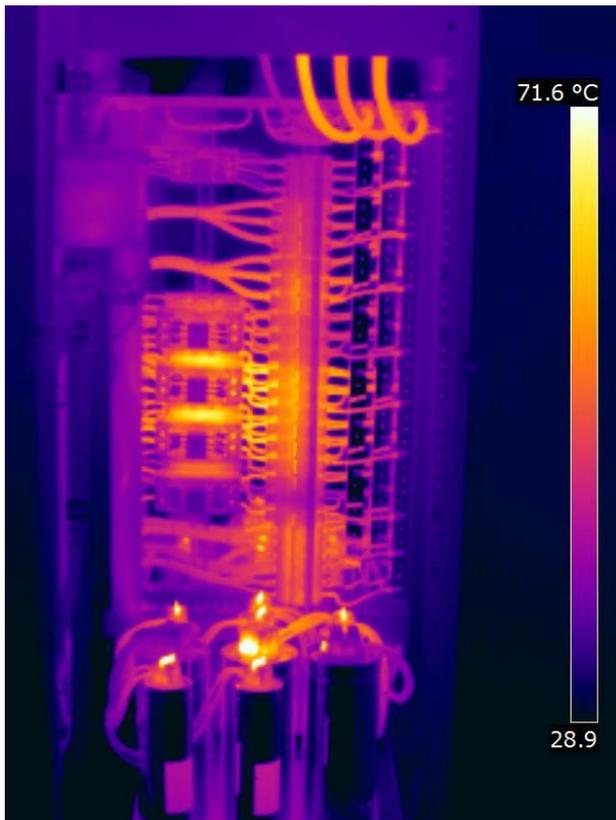


Fig. 4.24: Immagine termica quadro di rifasamento

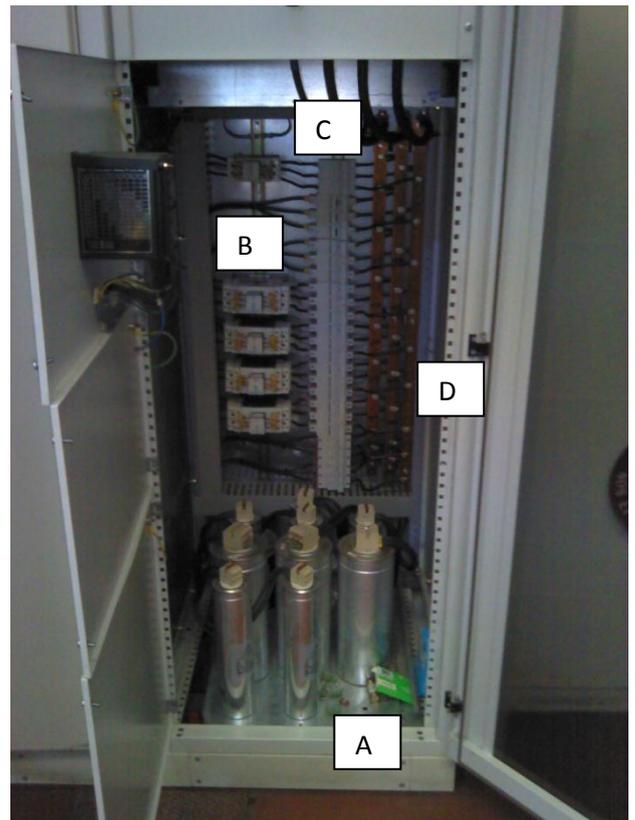


Fig. 4.25: Immagine visibile quadro di rifasamento

Possiamo vedere dalla foto nel visibile a destra i vari elementi che compongono l'armadio:

- A. Condensatori;
- B. Teleruttori per il comando dell'inserzione;
- C. Portafusibili per la protezione delle batterie di condensatori;
- D. Sbarre di rame per il collegamento;

I principali punti caldi li troviamo sui morsetti di collegamento dei condensatori e in prossimità delle bobine dei teleruttori. In questa foto dobbiamo fare delle considerazioni:

- Non tutti i condensatori erano inseriti in linea infatti alcuni hanno presentano i morsetti di collegamento freddi;
- I punti caldi nelle bobine dei teleruttori creano dei riflessi dovuti alla piastra posta dietro di essa in ferro lucido;

Manutenzione preventiva degli impianti elettrici con analisi termografiche

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici

- Le sbarre di rame essendo lucide sono fredde anche se la bassa temperatura è causa della bassa emissività;

vediamo in particolare le batterie e i teleruttori come si presentano andandoli ad analizzare più nel particolare con la termocamera:

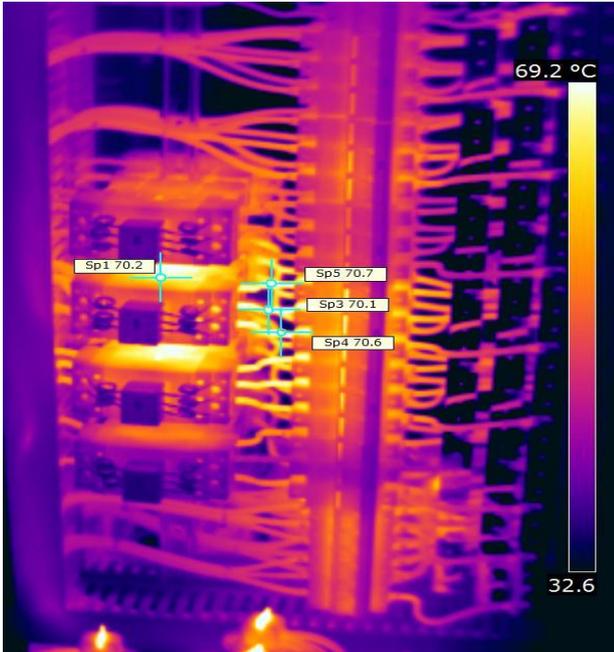


Fig. 4.26: Immagine termica di teleruttori, portafusibili e sbarre di rame

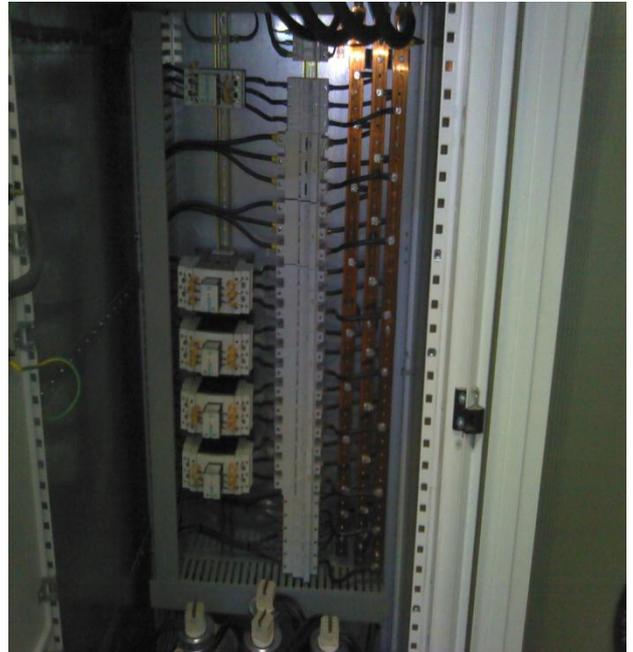


Fig. 4.27: Immagine nel visibile di teleruttori, portafusibili e sbarre di rame



Fig. 4.28: Immagine termica di alcune batterie di condensatori



Fig. 4.29 Immagine nel visibile di alcune batteria di condensatori

Punto Sp1 Fig. 4.26	Punto Sp2 Fig. 4.26	Punto Sp3 Fig.4.26	Punto Sp4 Fig. 4.26	Punto Sp1Fig. 4.28
70,2 °C	70,7 °C	70,1 °C	70,6 °C	105,4 °C

Manutenzione preventiva degli impianti elettrici con analisi termografiche

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici

I punti caldi che si possono vedere nella Fig.4.28 delle batteria di condensatori è la resistenza di scarica, che può tranquillamente raggiungere quelle temperature. Come possiamo vedere di nove batterie di condensatori sono percorse da corrente solo otto poiché sono quelle in cui si riscontra un punto caldo, in questo caso va bene perché quella batteria al momento della foto non era inserita e quindi non è alimentata. La termografia quindi ci permette di verificare il corretto funzionamento delle batterie e vedere subito se c'è un problema su una di essa, infatti nel caso tutte le batterie fossero state inserite e una risultasse fredda la causa potrebbe essere un guasto o in ogni caso un problema su di essa.

➤ PORTAFUSIBILE

Il fusibile come abbiamo detto nella breve descrizione in fatta nel paragrafo delle apparecchiature in media tensione serve a proteggere l'apparecchio che sta a valle di esso da sovracorrenti o scariche atmosferiche interrompendo fisicamente il circuito.

Quindi tale dispositivo NON è posto solo in prossimità di un quadro di rifasamento ma essi si possono trovare in prossimità di apparecchiature che necessitano di una protezione contro le sovracorrenti.

Nei sistemi trifase i tre fusibili che interrompono le fasi sono attraversati dalle stesse correnti e quindi risultano ad una temperatura simile:



Fig. 4.29: Portafusibili funzionante correttamente
temperatura dei conduttori 37 °C



Fig. 4.30: Portafusibili visto nel visibile

Il quadrato azzurro di Fig. 4.29 ci evidenzia la zona in cui un portafusibile funziona correttamente. Come si può osservare il calore nelle tre fasi sia uguale e come quindi sono più o meno alla stessa temperatura, questo può portare a dire che le fasi sono caricate tutte e tre in modo uniforme e che i fusibili funzionando correttamente lasciano passare la corrente anche a valle del portafusibili verso le sbarre di rame. Tali invece la risultano più fredda rispetto al resto dei conduttori ma questo a causa della bassa emissività del rame.

Al contrario quando un fusibile è guasto salta subito all'occhio nell'immagine termica:



Fig. 4.31: Immagine termica portafusibile con fusibile guasto

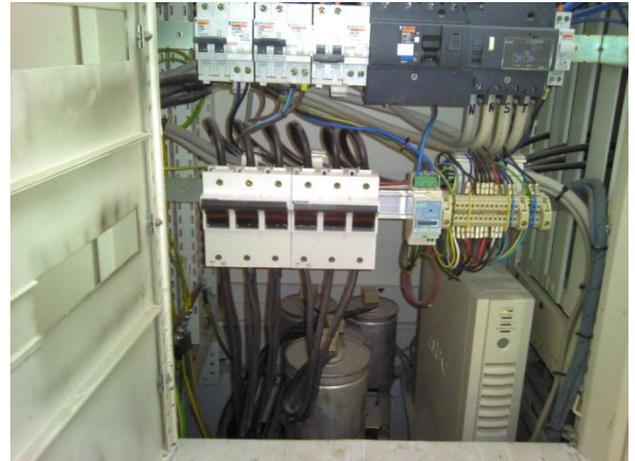


Fig. 4.32: Immagine nel visibile portafusibile

Fig. 4.31 Temperatura punto Sp1	Fig.4.31 Temperatura punto Sp2	Fig. 4.31 Temperatura punto Sp3
28,6°C	32°C	32,6°C

Come si vede in queste immagini di un portafusibili da 100 A la prima fase è fredda, mentre le altre due sono più calde in questo caso il fusibile ha protetto un banco di condensatori di rifasamento (come possiamo vedere dalla Fig. 4.32c'è un banco di condensatori per fase) probabilmente da una scarica atmosferica o da una sovracorrente.

Appena riparato il guasto è possibile vedere come, anche se le temperature sono diverse, il funzionamento sia tornato alla normalità, essendo applicato al rifasamento se non si disponeva di strumenti per la misura del $\cos\phi$ o della potenza reattiva era molto difficile accorgersi del problema mentre con la termocamera il guasto è stato individuato subito.

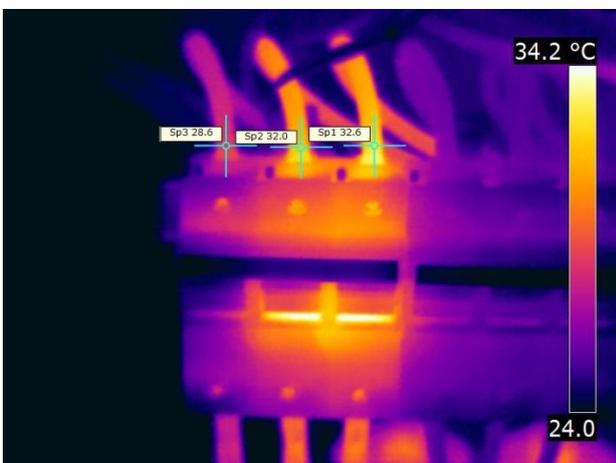


Fig.4.33: Immagine termica con fusibili funzionanti (fusibile appena cambiato)



Fig.4.34: Immagine termica con fusibili funzionanti (immagine dopo 5 minuti dal ripristino)

Con lo stesso ΔT osserviamo le temperature prima e dopo la riparazione. Come si può vedere nell'immagine a destra (Fig. 4.33) esse sono più o meno uguali rispetto alle temperature rilevate in Fig. 4.31, dato il breve tempo passato dalla riparazione alla realizzazione dell'immagine la temperatura sembra essere ancora bassa ma questo è dovuto solo al fatto che la fase si sta riscaldando infatti la temperatura passa dai 28,6 °C di Fig.4.33 ai 31°C Fig. 4.34 segno che il circuito sta tornando al funzionamento normale.

➤ MORSETTI DI COLLEGAMENTO DELLE APPARECCHIATURE NEL QUADRO ELETTRICO

Un altro elemento importante da rilevare con la termocamera è la morsetti del quadro di distribuzione, in esso infatti è possibile individuare delle anomalie termiche dovute all'errato serraggio delle viti dei morsetti che la compongono. Tali anomalie si traducono in un aumento della temperatura e quindi di facile individuazione per la termocamera.

Nell'immagine qui sotto (Fig. 4.35) si può osservare come l'errata chiusura delle viti di un morsetto scaldino il cavo, tale foto è stata fatta alla messa in servizio di un impianto di una fabbrica quindi con un carico poco elevato motivo per il quale la temperatura non è poi così elevata:

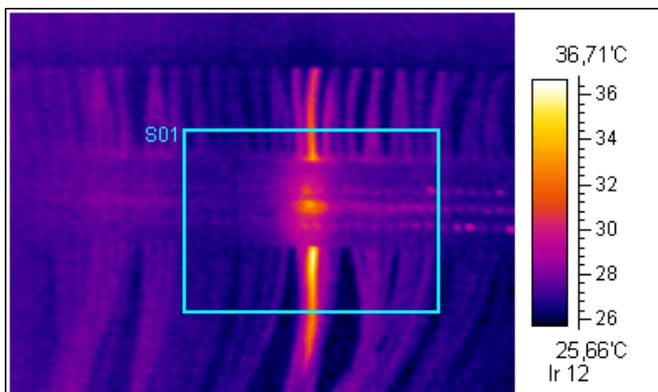


Fig.4.35: Morsetti di un quadro di distribuzione in Bassa Tensione con morsetto allentato



Fig. 4.36: immagine nel visibile morsetti di distribuzione di un quadro di bassa tensione

➤ **LINEA DI ALIMENTAZIONE CON “BINDOSBARRA”**

Le blindo sbarre sono dei sistemi per la distribuzione di energia elettrica a soffitto o a parete spesso usati in ambito industriale. Ad esse tramite delle cassette di connessione è possibile connettere delle linee di lampade o delle macchine. Data la loro costruzione è molto difficile con la termocamera rilevare anomalie sulla linea dato il fatto che solitamente le sbarre di rame o del materiale conduttore sono racchiuse in un materiale zincato che rende difficile a causa della lucidità fare una rilevazione adeguata. Per queste linee risulta più semplice l'individuazione dell'anomalia termica sulla cassetta di connessione con la blindo sbarra è infatti in questo punto dove si possono presentare anomalie termiche anche rilevanti. Nel funzionamento normale il termogramma si presenta in questo modo:

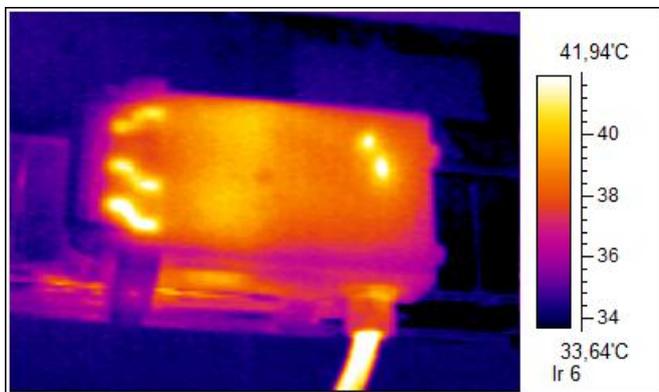


Fig. 4.37: Immagine termica cassetta di connessione collegata ad una blindo sbarra



Fig. 4.38: Immagine visibile della cassetta di connessione di Fig. 4.37

Gli elementi che possono essere riscontrati con l'indagine termografica sono il cavo di connessione che dalla blindo sbarra va verso l'apparecchiatura che essa alimenta e le tre fasi dove avviene il collegamento cassetta- blindo. Nel caso in esame nella Fig. 4.37 non c'è niente da segnalare dato che le temperature che vengono rilevate sono praticamente nella norma la temperatura è di circa 41 °C per tutte e tre le fasi.

Quando invece si viene a creare un'anomalia termica su una delle tre fasi il termogramma che otteniamo sarà più o meno il seguente:

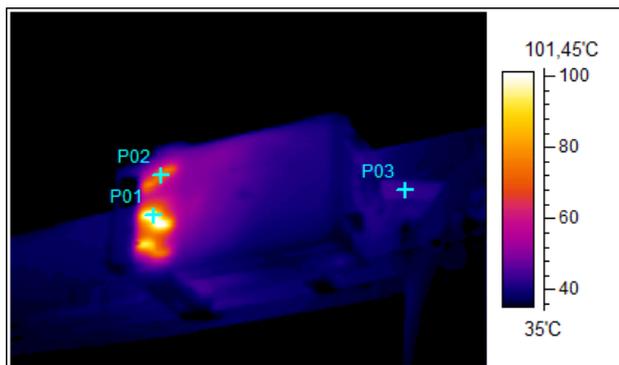


Fig. 4.39: Immagine termica cassetta di connessione a una blindo con problemi ad una fase



Fig. 4.40: Immagine visibile cassetta di connessione di Fig. 4.39

Dai tre punti dell'immagine vengono rilevate le seguenti temperature:

Temperatura punto P01	Temperatura punto P02	Temperatura punto P03
105,15 °C	78,69 °C	44,84 °C

Da questi tre punti si possono trarre le seguenti conclusioni:

Il punto caldo è probabilmente causato da una connessione difettosa della fase della scatola con la fase della blindo infatti l'anomalia è localizzata solo in quel punto, se invece fosse stato uno squilibrio di carico la temperatura sarebbe stata rilevata anche su tutto il conduttore, la soluzione per risolvere questo problema è controllare la scatola e in caso sostituirla.

4.6 ALTRE APPLICAZIONI DELLA TERMOGRAFIA NEL SETTORE ELETTRICO

➤ LINEE IN ALTA TENSIONE

Con la maggioranza delle termo camere di fascia medio bassa è possibile fare termografie di impianti di bassa e media tensione, per le apparecchiature in alta tensione, soprattutto di linee aeree o di sezionatori, a causa di diversi fattori ambientali e la distanza alla quale ,per motivi di sicurezza, si deve mantenere per fare le indagini necessitano di apparecchiature più sofisticate ed non saranno presenti in questa tesi.

➤ MOTORI ELETTRICI

La termografia ci permette di fare ispezioni e di poter ricavare alcuni risultati interessanti sui motori, e generatori elettrici. Nonostante il fatto che queste macchine elettriche abbiano una carcassa che rende difficile osservare direttamente gli avvolgimenti(praticamente impossibile), la termografia è in grado di vedere come il calore si distribuisca su di essa, la quantità che è sulla carcassa e da queste poche informazioni possiamo valutare se la macchina funziona o no in maniera corretta o se è possibile avere un problema.

I principali guasti osservabili con l'immagine termica sono:

- USURA DELLE SPAZZOLE PER CONTATTO;
- PERDITE DI INDOTTO;
- GUASTO DELL'AVVOLGIMENTO DI INDOTTO.

Un motore asincrono che funziona in modo corretto a pieno regime termograficamente si presenta come in Fig. 4.41:

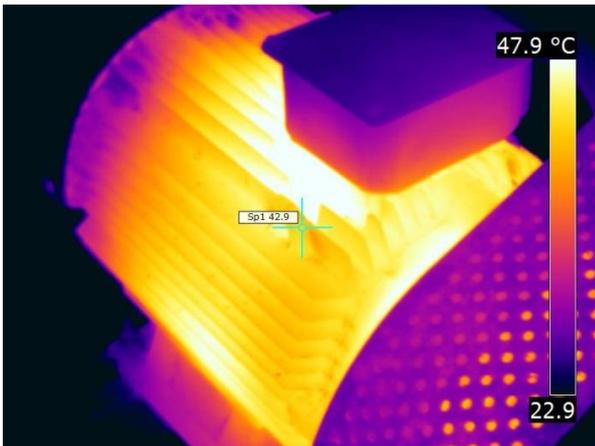


Fig. 4.41: Immagine termica motore asincrono



Fig. 4.42: Immagine visibile motore asincrono

Il punto segnalato nell'immagine termografica è di 42°C mentre il più caldo è di circa 48°C. Il motore in figura 4.41 è un motore asincrono trifase da 45 kW di potenza che lavora a pieno carico.

Un motore invece che presenta un problema con l'avvolgimento di indotto termograficamente si presenta così:

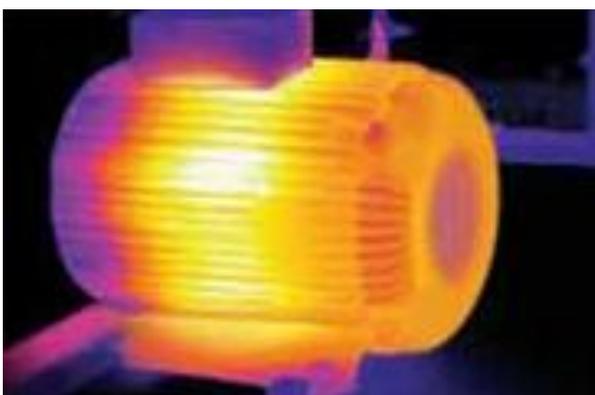


Fig.4.43: Immagine termica motore asincrono con problema all'avvolgimento



Fig. 4.44: Immagine visibile motore Fig. 4.41

Il problema del motore qui sopra è dovuto all'avvolgimento di indotto come possiamo vedere nel motore funzionante in modo corretto si può vedere come la parte terminarle risulti fredda cosa non vera in quello con problemi

Un altro elemento che si può analizzare con la termografia è la morsettiera di collegamento delle fasi del

motore anche in questo caso le immagini qui sotto non rilevano alcun punto caldo anomalo tuttavia mostrano come è la distribuzione di calore delle fasi in quel momento :



Fig. 4.45: Immagine termica morsettiera motore



Fig. 4.46: Immagine visibile morsettiera motore

➤ PANNELLI FOTOVOLTAICI:

Un altro elemento nel quale è possibile eseguire un'indagine termografica è il Pannello Fotovoltaico. Infatti con lo sviluppo delle energie rinnovabili si ha avuto in questi anni un incremento di impianti fotovoltaici. Tali impianti permettono di convertire la luce del sole in elettricità e per ottenere il massimo rendimento da questi (che al proprietario dell'impianto si traduce in un pagamento più rapido dell'impianto o a un guadagno maggiore quando viene venduta l'energia) è necessario che la qualità dell'impianto sia elevata.

Con la termografia è possibile monitorare l'impianto sia in fase di sviluppo sia durante la manutenzione dell'impianto per valutare lo stato del pannello e di tutte le altre apparecchiature che lo compongono.

Nella fase di sviluppo si va a valutare in generale lo stato delle singole celle per evitare il problema dello SHUNT. Per poterlo fare si applica alla cella prima del processo di laminazione una polarità inversa. I punti caldi che la termocamera individua sono gli "SHUNT" causati da eventuali difetti di produzione nel materiale semiconduttore delle celle.

Nella manutenzione in campo invece è possibile utilizzare la termocamera per monitorare l'impianto prima della messa in esercizio o negli anni successivi durante l'esercizio. Per l'individuazione dei punti caldi valutare le molteplici cause a monte del problema infatti anche se solitamente i punti caldi rappresentano un problema questo non è sempre detto.

Manutenzione preventiva degli impianti elettrici con analisi termografiche

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici

Solitamente le anomalie indicano una PERDITA della produzione poiché quel punto invece di funzionare come “generatore” funziona come un “carico” dissipando l’energia come un resistore e quindi scalda. Alcuni punti caldi a determinate ore della giornata possono arrivare a temperature molto elevate.

Spesso il problema può essere frutto di un lento degrado nel tempo della cella stessa, altre cause possono essere riassunte con questa tabella:

Tipo di errore:	Esempio:	Appare nell'immagine ad infrarossi come:
Difetto di produzione	Impurità e sacche di gas	Un punto caldo o freddo
	Incrinature nelle celle	Riscaldamento della cella, di forma principalmente allungata
Danno	Incrinature	Riscaldamento della cella, di forma principalmente allungata
	Incrinature nelle celle	Parte di una cella appare più calda
Ombreggiatura temporanea	Inquinamento	Punti caldi
	Deiezioni di uccelli	
	Umidità	
Diodo di bypass difettoso (causa cortocircuiti e riduce la protezione di un circuito)	N.D.	Motivo patchwork
Interconnessioni difettose	Modulo o serie di moduli non connessi	Un modulo o una serie di moduli sono costantemente più caldi

Si possono valutare anche gli altri elementi dell’impianto come :

- QUADRI DI CONNESSIONE;
- QUADRI DI CAMPO;
- INVERTER e CONTATTORI

Questi ultimi essendo elementi scatolati chiusi risultano difficili da indagare con la termocamera.

Per ispezionare in modo corretto un impianto fotovoltaico è necessario evitare di commettere errori molto comuni:

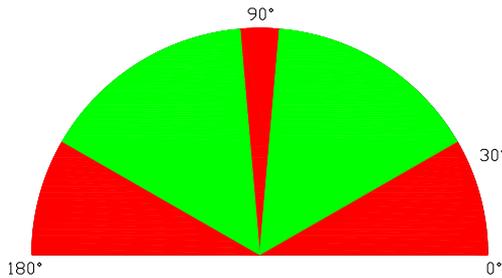
- ISPEZIONARE l’impianto con una quantità di irraggiamento solare su di esso minore di 700W/m^2 in modo tale da analizzare i pannelli durante il funzionamento a livello ottimale, dato che oltre questa soglia il pannello funziona correttamente. Questo parametro potrà essere valutato mediante un altro strumento detto “PIROMETRO”
- LA TERMOCAMERA deve avere una sensibilità termica minore di 80 mK
- L’ANALISI del pannello deve essere fatta, dove possibile, in entrambe le facce del pannello infatti in quella superiore la presenza del vetro può creare qualche problema. La causa è la non trasparenza all’infrarosso del vetro e quindi la distribuzione del calore sulla sua

Manutenzione preventiva degli impianti elettrici con analisi termografiche

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici

superficie e indirettamente le celle sottostanti con la conseguenza di una differenza di temperatura misurata ridotta. Un altro problema del vetro è cosa riflette, la presenza di eventuali punti caldi quindi dovrà essere valutata come un possibile riflesso (operatore stesso posto in posizione scorretta può generare un punto caldo), esclusa quella causa possiamo andare a vedere il pannello.

L'operatore dovrà quindi eseguire l'analisi della faccia superiore del pannello ponendosi non in modo perpendicolare ad esso ma secondo questo schema:



Le zone in verde rappresentano le angolazioni in cui deve essere fatta l'ispezione mentre quelle in rosso rappresentano le zone in cui può esserci la presenza di riflessi dovuti all'operatore.

Nell'ispezione del retro del pannello invece si riduce al minimo le interferenze dei riflessi del sole, inoltre misurando direttamente la cellula possiamo rilevare temperature più basse rispetto alla cellula osservata dal vetro;

- EVITARE di fare ispezioni nelle ore più calde. Questo lo si fa per avere un maggior contrasto termico tra celle e temperatura esterna, per evitare riflessi è consigliabile farlo in una giornata senza nuvole.

Una volta individuata l'anomalia termica del pannello o di un'intera stringa si dovrà procedere all'analisi di questi elementi con altri strumenti più specifici e che permettono di individuare la possibile causa del problema che è stato rilevato con la termografia.

Qui sotto verranno mostrate alcune immagini di indagini termografiche fatte su pannelli fotovoltaici sia MONOCRISTALLINI sia POLICRISTALLINI:

PANNELLO POLICRISTALLINO

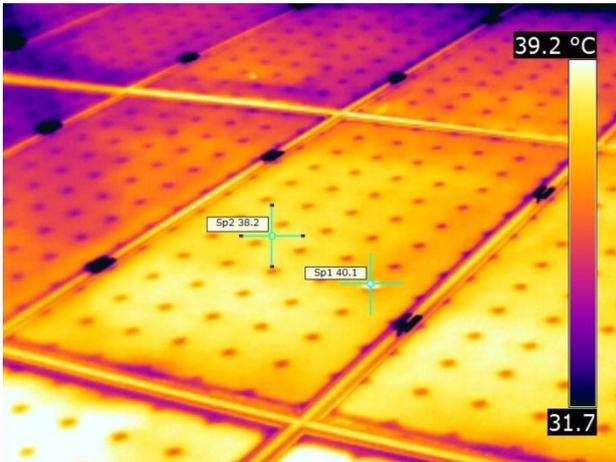


Fig.4.47: Immagine termica pannello funzionante policristallino, i due punti caldi sono dovuti a sporcizia presente sul pannello



Fig.4.48: Immagine visibile pannello fotovoltaico policristallino

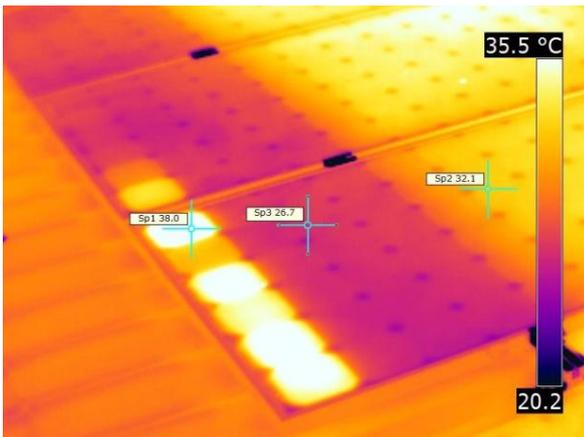


Fig.4.49: Immagine termica pannelli fotovoltaici con una zona d'ombra



Fig. 4.50: Immagine visibile pannelli fotovoltaici con l'ombra

La foto a destra ci mostra come l'ombra può influire sul funzionamento del pannello e sull'andamento del calore di questo.

Le immagini relative ad un PANNELLO POLICRISTALLINO sono:

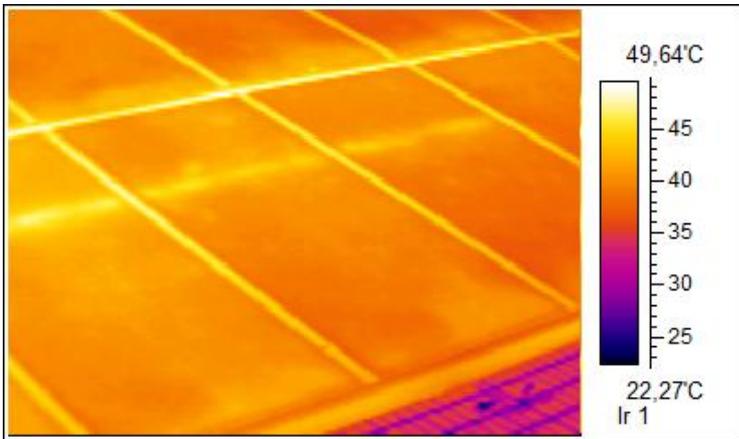


Fig.4.51: Immagine termica pannelli monocristallini



Fig.4.52: Immagine nel visibile pannelli monocristallini

La linea continua sul pannello rappresenta il montante sul quale poggiano i pannelli, la superficie risulta comunque e il funzionamento è quindi corretto.

In presenza di anomalie del pannello abbiamo un punto caldo come nell'immagine qui sotto:

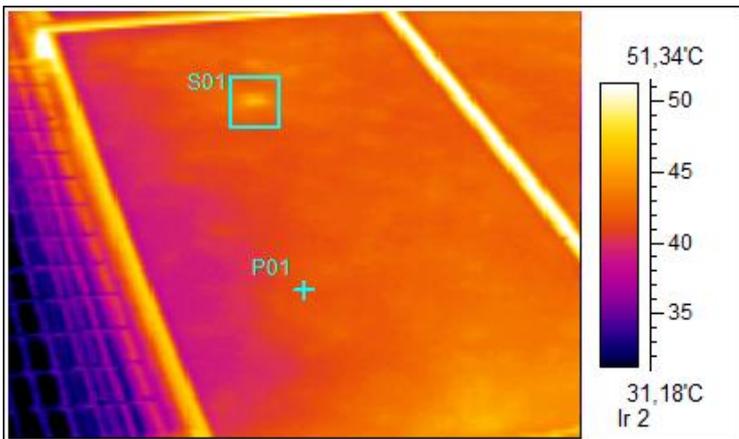


Fig. 4.53 Immagine termica pannello monocristallino con anomalia



Fig.4.54: Immagine nel visibile pannello monocristallino di Fig. 2.50

In Fig. 4.53 possiamo vedere un punto più chiaro racchiuso all'interno dell'area S01 quel punto è a temperatura di 46,8°C mentre il pannello nel punto P01 è a temperatura di 41 °C, tale punto caldo ci può indurre a pensare che in quel punto il pannello non stia generando ma assorbendo corrente.

Manutenzione preventiva degli impianti elettrici con analisi termografiche

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici

Le immagini seguenti si riferiscono invece agli altri elementi che compongono un impianto fotovoltaico, in questo caso si riferendosi ad un impianto da 10 kW di potenza posto su un tetto di una casa sono: i quadri di campo e di inverter i quali possono essere più o meno grandi a seconda della potenza installata.

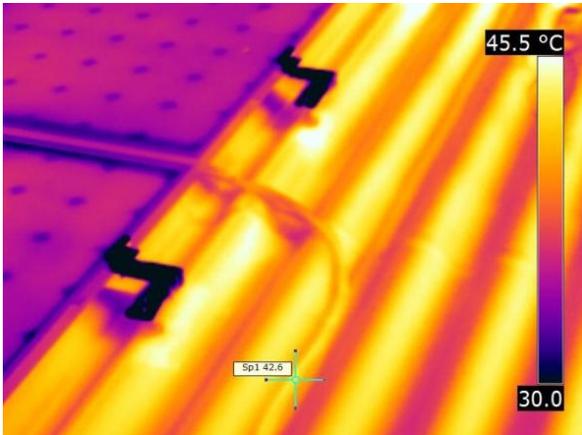


Fig. 4.55: Immagine termica di conduttori dal pannello al quadro di campo



Fig. 4.56: Immagine nel visibile dei conduttori dal pannello al quadro di campo

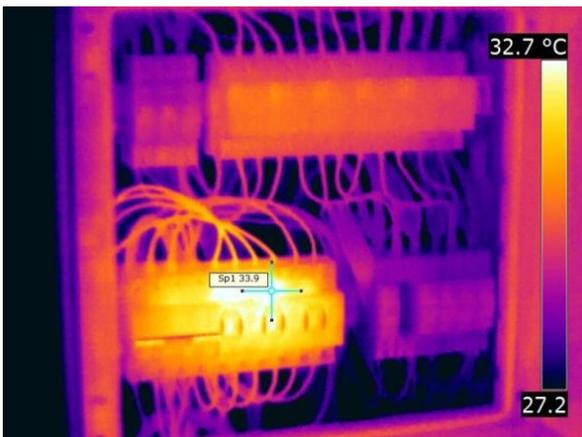


Fig. 4.57: Immagine termica del quadro di campo



Fig.4.58: Immagine nel visibile del quadro di campo



Fig. 4.59: Immagine termica dell'inverter



Fig. 4.60: Immagine nel visibile dell'inverter

➤ **GENERATORE IDROELETTRICO**

Illustriamo ora un'analisi termografica effettuata su una centrale idroelettrica formata da due gruppi generatori, tali gruppi hanno le seguenti specifiche:

sono installate due turbine dalle seguenti caratteristiche:

- Costruzione Tschurtschentaler Turbinenbau
- Tipo Kaplan Watech-Hydro
- Serie KDD-4-2000
- Salto nominale m 4,70
- Potata nominale m³/s 17,5
- Potenza nominale 724 kW
- Velocità 163 g/min

Mentre i generatori sincroni i quali hanno il compito di convertire l'energia meccanica delle pale in energia elettrica la quale in un secondo momento, grazie ad un trasformatore che innalzerà la tensione 20 kV, è possibile cederla alla linea di distribuzione, il montaggio avviene direttamente sull'asse della turbina, avranno le seguenti caratteristiche:

- Costruzione Vuos Brno
- Serie PMG 750-36-3V6
- Potenza nominale 750 kVA
- Frequenza 50 Hz
- Velocità 166,7 g/min
- Grado di protezione IP21/IC01
- Classe isolamento F
- Raffreddamento IC06

La centrale idroelettrica nella quale sono state installate queste due macchine è di nuova costruzione per questo si è deciso di utilizzare la termografia, insieme ad altri strumenti di misura già presenti nella centrale e nelle apparecchiature, per monitorare uno dei due gruppi macchina durante il primo periodo transitorio di funzionamento per osservare la distribuzione del calore all'esterno della macchina.

Manutenzione preventiva degli impianti elettrici con analisi termografiche

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici

Il costruttore della macchina nelle specifiche assicura il suo funzionamento anche con temperature al suo interno superiori ai 100 °C. Le seguenti immagini fanno riferimento alla temperatura durante i primi giorni di operatività di una sola macchina mentre l'altra era spenta:

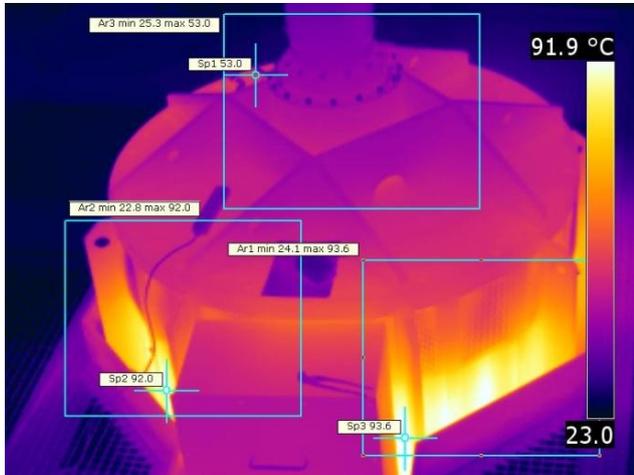


Fig. 4.61: Immagine termica generatore sincro



Fig.4.62: Immagine nel visibile del generatore sincro in Fig. 4.61

La macchina mostra una temperatura molto alta nell'involucro esterno alla base del terreno con temperature intorno ai 90 °C in prossimità del generatore sincro.

Nel corso delle giornate sono state rilevate varie fermate della macchina per motivi di sovratemperatura come possiamo vedere da questo grafico delle potenze :

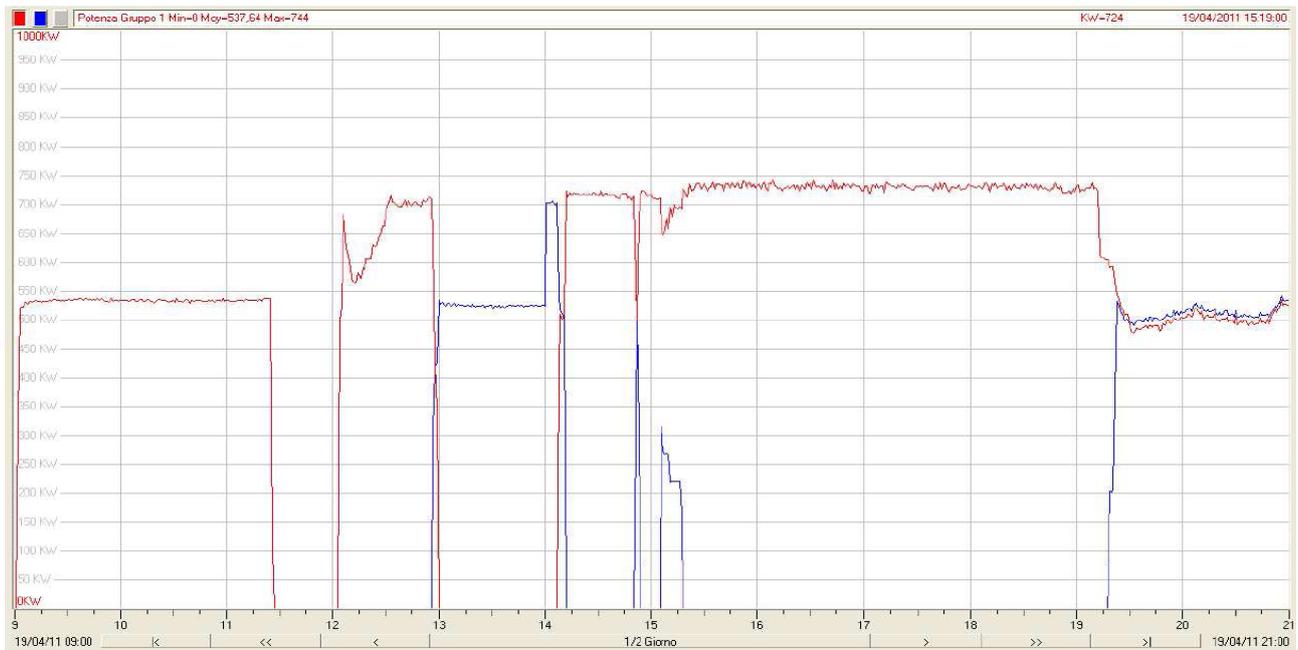


Fig. 4.63: Analisi delle potenze dei due gruppi insieme o singolarmente

Le curve fanno riferimento alla potenza prodotta dai gruppi nel corso di dodici ore dalle nove del mattino fino alle ventuno, come possiamo vedere ci sono frequenti fermate della macchina tutte causate dalla una

Manutenzione preventiva degli impianti elettrici con analisi termografiche

Capitolo 4: Applicazioni reali della termografia nel monitoraggio e la manutenzione di impianti elettrici sovratemperatura. La linea in rosso del grafico di Fig. 4.63 rappresenta la potenza generata dal gruppo 1 cioè quello monitorato con la termocamera.

Sempre nel grafico possiamo vedere come la potenza della macchina sia arrivata quasi a regime di produzione, circa 750kW, anche se mentre avveniva ciò si sono rilevate temperature pericolosamente alte con valori massimi individuati con la termocamera di circa 102 °C all'esterno della macchina come è possibile vedere nella Fig. 4.64 indicato nell'area Ar1:

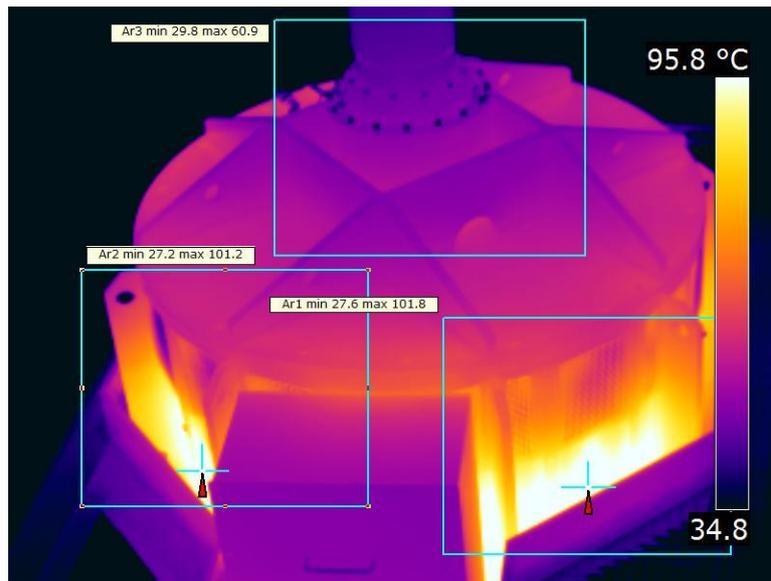


Fig. 4.64: Immagine termica generatore funzionante insieme al secondo generatore

Naturalmente il funzionamento in queste condizioni della macchina è molto critico, il rilevamento della temperatura esterna così alta fa pensare ad una temperatura molto più alta all'interno della macchina.

Da considerare è anche la temperatura esterna, il rilevamento è stato fatto nel mese di aprile quando la temperatura era di poco al di sotto di 20 °C, se si va a valutare il termogramma fatto nelle ore notturne, quando la temperatura scende di alcuni gradi, notiamo che anche la macchina si raffreddava lavorando in ogni caso con temperature di 85-88°C valori elevati considerando che si tratta di temperature superficiali esterne.

Notando che la sovratemperatura era localizzata alla base della macchina dove era allocato il generatore sincro è stata fatta una verifica termografica anche al di sotto della macchina per verificare esattamente l'area precisa della sovratemperatura per farsi un'idea della possibile causa. Sono state ottenute le seguenti immagini:

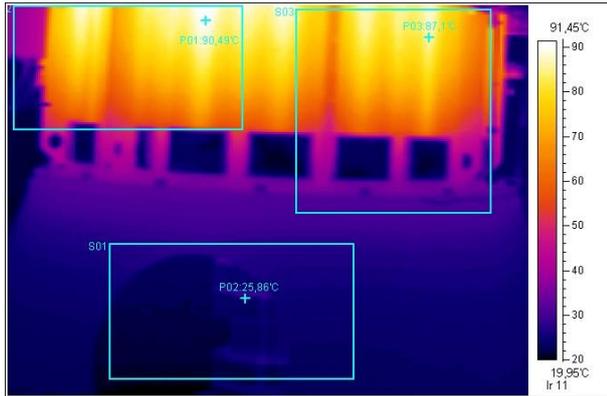


Fig. 4.65: Immagine termica della parte inferiore del generatore



Fig.4.66: Immagine nel visibile della parte inferiore del generatore

Come si può vedere in Fig. 4.65 la sezione più calda (quella più chiara) è localizzata nella parte superiore della macchina. Ciò ci ha permesso di escludere come problema l'albero di accoppiamento pala generatore sincro (indicato con l'area S01 che è a 35.5 °C) mentre ha rafforzato l'idea che il problema è legato al raffreddamento del generatore sincro indicato con le altre due aree con temperature poco sopra i 90 °C

Il gruppo in esame anche dopo la fine del monitoraggio con la termocamera ha continuato ad avere problemi con numerose fermate per la sovratemperatura fino a quando si è incendiato e si dovrà provvedere alla sostituzione di esso.

CONCLUSIONI:

Oggi giorno gli impianti industriali hanno bisogno di funzionare costantemente per tutto il giorno e gran parte di questo a pieno carico, è quindi importante poter monitorare in ogni momento possibile lo stato dell'impianto elettrico.

Infatti un guasto o un disservizio all'intero di un ciclo produttivo continuo può portare a grosse perdite economiche sia per la mancata realizzazione del prodotto sia per l'onere di dover sostituire il componente o l'apparecchiatura guastatasi.

Come abbiamo visto la termografia permette di evitare tutto questo, nel corso degli esempi riportati nelle pagine precedenti gran parte degli elementi che compongono un impianto e le stesse apparecchiature del ciclo produttivo possono essere monitorati ed è possibile rilevare problemi come anomalie termiche valutando per esempio anche i motori. Tale strumento quindi oltre a monitorare il buon funzionamento dell'apparecchiatura ci permette di constatare le più piccole segnalazioni che possono essere presenti su un componente quando inizia a deteriorarsi.

Le potenzialità di fare prevenzione sono grandi, importante è comunque la possibilità di avere strumenti che ci permettono di capire dove esattamente sta l'anomalia per esempio con una fotografia.

Successivamente allo studio del componente si potranno: confrontare il risultato di ispezioni passate fatte in momenti precedenti o archivarla per indagini future eseguite in condizioni il più possibile simili per permetterci di osservare se il componente ha peggiorato le sue caratteristiche termiche o se sono ancora ottimali soprattutto dei componenti in cui sono state rilevate sovratemperature anomale poco al di sopra della normale temperatura di esercizio poiché nonostante non siano in quel momento pericolose, possono in futuro aggravarsi sempre di più.

Ormai la termografia è uno strumento che sta prendendo sempre più piede nella manutenzione, vengono realizzate ispezioni periodiche anche per motivi assicurativi, nei quali si mostra lo stato dei componenti e come con essa si può prevenire le cause di incendio in modo da avere sconti sui premi assicurativi.

Nei componenti in media tensione l'analisi termografica esposta non ha mostrato casi di temperature anomale elevate se si esclude la crimpatura difettosa dei capocorda di una fase, in ogni caso proprio quell'esempio ci permette di vedere come la termografia abbia permesso la risoluzione a buon fine di un problema che poteva se si aggravava portare a situazioni molto pericolose e si evidenzia il fatto che l'isolamento dei cavi della fase stavano iniziando a deteriorarsi.

In bassa tensione il numero di componenti che possono essere analizzati con la termocamera è maggiore questo perché si ha un più facile accesso alle apparecchiature. Come mostrato dagli esempi riportati lo squilibrio dei carichi è la causa che contribuisce alla maggior parte delle anomalie termiche, è stato anche possibile individuare il non funzionamento di parte di alcuni apparecchi che ha permesso un rapido ripristino delle condizioni di funzionamento normale. Nonostante le grandezze siano più piccole

Manutenzione preventiva degli impianti elettrici con analisi termografiche

Conclusione

e quindi un guasto in bassa tensione sia meno pericoloso (ATTENZIONE !!! le correnti e le tensioni in gioco sono comunque MOLTO PERICOLOSE!!!) e meno oneroso dal punto di vista economico rispetto ad un guasto in media tensione (le apparecchiature in MT costano di più delle apparecchiature in BT) può comunque essere una perdita per l'azienda poiché viene a crearsi in ogni caso un disservizio e quindi un danno per l'azienda stessa.

Nonostante la termografia valuti "solo" l'aspetto esteriore dell'oggetto in esame questo può comunque essere sufficiente al fine di valutare il suo corretto funzionamento.

Come è stato descritto nell'ultimo esempio, relativo al funzionamento del generatore sincrono, la temperatura esterna anche se non mostrava la temperatura realmente interna presente nella macchina era comunque una segnalazione di allarme e questo bisognava evidenziarlo. Essendo stato trascurato il risultato è stato l'incendio della macchina e quindi una perdita dal punto di vista economico molto rilevante.

La termografia effettuata sugli impianti e sui componenti è uno strumento potente ed affidabile, non è però uno strumento che universale, non sostituisce il multimetro o altri strumenti già impiegati nella manutenzione degli impianti. In ogni caso poter integrare le informazioni della termocamera con le informazioni degli altri strumenti come per esempio l'assorbimento di corrente di quell'apparecchio rilevato con un amperometro, o per esempio nel solare una conoscere esattamente la potenza dell'impianto prodotto in quel momento e l'irraggiamento solare rilevato con un piranometro ci permette di fare una corretta analisi della situazione che si sta osservando considerando se ci sono o no anomalie nell'impianto individuandole più velocemente.

La termografia è comunque ancora un metodo di indagine giovane e quindi gli strumenti e le apparecchiature non permettono di eseguire analisi dettagliate. L'indagine è legata anche a fattori esterni che devono essere presi in considerazione per fare la differenza da un'indagine termografica e un'ottima indagine termografica, come abbiamo detto all'inizio non basta andare davanti ad un'apparecchiatura accendere lo strumento e fare la foto termica per poter dire di aver fatto un'indagine termografica, è necessario valutare tutta la serie di parametri a cominciare dalla natura dell'oggetto fino alla valutazione dell'ambiente esterno passando per la posizione in cui si sta eseguendo l'indagine. Per questo è necessario avere una buona formazione e soprattutto fare molta esperienza. Purtroppo in Italia la termografia industriale non è ancora molto utilizzata e solo in pochi siti internet è possibile confrontarsi con altri operatori per verificare le proprie idee su un'indagine. Il motivo principale è sicuramente il fatto che sia giovane come metodo di indagine, e soprattutto questo è legato al costo della tecnologia che risulta molto alto, anche se ultimamente più case produttrici di strumenti stanno sviluppando la loro gamma di termocamere.

BIBLIOGRAFIA

TESTI:

- [1] “Macchine elettriche rotanti teoria ed esercizi” M. Andriollo – G. Martinelli – A. Morini; Libreria Cortina; 2003
- [2] “Trasformatori teoria ed esercizi” M. Andriollo – G. Martinelli – A. Morini; Libreria Cortina; 2003
- [3] “Manuale per la termografia ad infrarossi per applicazioni industriali”, FLIR Systems AB, 2011
- [4] “Dispense corso secondo livello UNI EN 437”, Overload srl, 2008
- [5] “Appunti di Componenti e Tecnologie elettrici” R. Gobbo, 2003
- [6] “Lezioni di Impianti elettrici” A. Paolucci; Cleup 1997

SITI:

- [A] www.wikipedia.it , giugno 2011
- [B] www.flir.com/termography/eurasia/it , maggio 2011
- [C] “Guida tascabile sulla termografia” www.testo.it , maggio 2011
- [D] “Normative e standard” www.associazionetermografia.it , giugno 2011
- [E] www.ceiweb.it , maggio 2011
- [F] www.uni.com , maggio 2011

APPENDICE 1 CARATTERISTICHE TERMOCAMERA

Dati strumentali della termocamera utilizzata per le analisi:

Le foto termografiche realizzate in questa tesi sono state fatte con una termocamera T335 della **Flir®**

azienda leader nella costruzione delle termocamere. Tale strumento è posto nella fascia media delle termocamere ed è adatta quindi ad indagini professionali. I dati della macchina che vengono forniti nel sito del costruttore sono:

Caratteristiche Immagine

- Sensibilità termica/NETD: 50 mK a 30 °C
- Risoluzione IR: 320 x 240 pixels
- Zoom: Zoom digitale continuo 1-2x, con funzionalità di mappatura
- Campo visivo (FOV, Field of view)/distanza minima di messa a fuoco: 25° x 19°/0,4 m
- Campo spettrale :7,5 - 13 µm
- Risoluzione spaziale (IFOV): 1,82 1,36 mrad
- Frequenza di immagine: 9 Hz o 30 Hz
- Messa a fuoco: Automatica o manuale
- Focal Plane Array (FPA) Microbolometrico non raffreddato

Presentazione dell'immagine:

- Display Touch screen incorporato, LCD a colori da 3,5", 320 x 240 pixels
- Modalità immagine Immagine IR, immagine visiva, Picture-in-Picture, galleria immagini

Misurazione

- Intervallo temperatura: Da -20 °C a +650 °C in 3intervalli: da -20 °C a +120 °C o da 0 °C a +350 °C o da +200 °C a +650 °C
- Accuratezza: ±2°C o 2% della lettura

Analisi della misurazione

- Puntatore: 5
- Area: 5 aree con max./min./media
- Isoterma: Isoterma sopra/sotto/intervallo
- Rilevamento automatico: caldo/freddo Marcatori con puntatori caldi o freddi automatici entro l'area
- Correzione dell'emissività: Variabile tra 0,01 e 1,0 o selezionata dall'elenco dei materiali
- Correzioni di misura: Temperatura ambiente riflessa, ottiche & temperatura atmosferica
- Correzione ottiche/finestre esterne: Automatica, basata sui valori di trasmittanza e temperatura delle ottiche/finestre IR

Impostazioni

- Tavolozze: colori Bianco e nero, Bianco e nero inv, Iron, Rain - Rain HC, Bluered(solo nel modello FLIR T425)
- Controlli di configurazione: Adattamento geografico di unità, lingua, formati data e ora; spegnimento automatico, intensità display

Memorizzazione delle immagini

- Tipo Scheda di memoria: SD
- Formato: JPEG standard - inclusi dati di misurazione
- Modalità Immagini: IR/visive, memorizzazione contemporanea di immagini IR e visive

Commenti immagini

- Annotazioni di testo Creazione di annotazioni di testo utilizzando una lista predefinita o scrivendo direttamente su touch screen tramite tastiera

Fotocamera digitale

- Fotocamera digitale integrata 3,1 Megapixel (2048 x 1536 pixel) con due illuminatori a LED

Puntatore laser

- Laser :Laser a diodo AlGaInP a semiconduttore, Classe 2
- Allineamento laser: La posizione viene visualizzata automaticamente sull'immagine IR

Sistema di alimentazione

- Autonomia batteria: Batteria al di litio ricaricabile, sostituibile sul posto
- Autonomia della batteria: 4 ore
- Sistema di ricarica: Integrato nella termocamera, adattatore CA, caricabatteria a due vani o 12 V da un veicolo
- Gestione energetica: Spegnimento automatico (selezionabile dall'utente)
- Funzionamento con alimentazione CA: Adattatore CA, 90-260 V CA, 50/60 Hz
- Tensione adattatore Uscita: 12 V CC

Specifiche ambientali

- Intervallo temperatura di funzionamento: Da -15 °C a +50 °C
- Intervallo temperatura di stoccaggio: Da -40 °C a +70 °C
- Umidità (funzionamento e stoccaggio): IEC 60068-2-30/24 h 95% di umidità relativa tra +25 °C e +40 °C
- Urti: 25 g (IEC 60068-2-29)
- Vibrazioni: 2 g (IEC 60068-2-6)
- Isolamento Corpo termocamera e lente: IP 54 (IEC 60529)

Interfacce

- USB-A: Collegamento di un dispositivo USB esterno (copia su chiavetta)
- USB Mini-B: Trasferimento dati da e verso PC/streaming
- Video: composito PAL o NTSC

Caratteristiche fisiche

- Peso termocamera inclusa. Batteria: 0,88 kg
- Dimensioni della termocamera (L x P x A): 106 x 201 x 125 mm



Immagine della termocamera utilizzata[B]

Le immagini presenti in questa tesi sono state date gentilmente messe a disposizione dall'azienda

Elettroindustriale Andreola srl azienda di Montebelluna (TV) che realizza impianti elettrici civili ed industriali che cominciato a fare manutenzione di impianti elettrici con l'indagine termografica da circa 5 anni.