



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica – curriculum
Termomeccanico

**RICOSTRUZIONE 3D, TERMICA ED OTTICA DI EDIFICI DI
CIVILE ABITAZIONE MEDIANTE INDAGINI AEREE
EFFETTUATE CON UAV (UNMANNED AERIAL VEHICLES)**

**THERMAL AND VISUAL DETECTION OF RESIDENTIAL
BUILDINGS BY UAV (UNMANNED AERIAL VEHICLES)**

Tesi di laurea di:

Federico Fioretti

Relatore: Chiar.mo

Prof. Ing. Renato Ricci

Correlatore:

Ing. Marco Ottaviani

Ringraziamenti

Giunti alla conclusione di questa esperienza, sono di dovere dei ringraziamenti.

Ringrazio il Professor Renato Ricci, relatore di questa tesi, per avermi concesso l'opportunità di lavorare con lui. Ancor prima che per la guida nella realizzazione di questo lavoro, lo ringrazio per la passione e l'entusiasmo che riesce a trasmettere, veri motori non solo dell'attività di ricerca, ma anche, e soprattutto, della vita.

Ringrazio Marco Ottaviani, correlatore di questa tesi, per avermi accompagnato con competenza, pazienza e soprattutto umanità nello sviluppo di tale elaborato.

Un ringraziamento è rivolto al gruppo di ricerca tutto, per avermi accolto, per il supporto e i consigli forniti, e per l'estrema disponibilità mostrata, aiutandomi anche quando non tenuti a farlo.

Desidero ringraziare poi la mia famiglia per avermi dato la possibilità di compiere questo percorso di studi, ma soprattutto per avermi supportato e sopportato nei momenti di difficoltà.

Ringrazio di cuore i miei amici, porti sicuri in ogni momento, per avermi accompagnato e aver preso parte in questo percorso di vita e di crescita umana.

Un ringraziamento speciale va infine a Cristina, per avermi spronato più di chiunque altro, per essere stata la mia roccia, la mia gioia. Grazie.

Sommario

Introduzione	3
1 Settori coinvolti nell'attività e apparato tecnologico utilizzato	6
1.1 UAVs: Unmanned Aerial Vehicles	6
1.2 Termografia infrarossa	8
1.3 Fotogrammetria aerea	13
1.4 Tecnologia impiegata	14
1.4.1 Quadricottero.....	14
1.4.1.1 Termocamera	14
1.4.1.2 Fotocamera	15
1.4.1.3 Gimbal	16
1.4.2 Ottacottero.....	19
1.4.2.1 Termocamera	19
1.4.2.2 Fotocamera	20
1.4.2.3 Gimbal	21
2 Protocolli e linee guida	23
2.1 Linee guida per operazioni con Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto (SAPR). ...	24
Acronimi e abbreviazioni.....	24
Riferimenti normativi.....	24
Scopo.....	24
Modalità di ottenimento del consenso per l'operazione	24
Studio dell'edificio e dell'area in cui giace	24
Analisi dei rischi e misure di sicurezza	25
Documentazione richiesta	27
Limitazioni per l'operatore SAPR	28
Personale tecnico.....	28
Misure di sicurezza per l'area	28
Organizzazione dell'attività.....	29
Procedure.....	29
Realizzazione, consegna e validazione della documentazione	29
Preparazione dell'attività	29
Preparazione dell'area	29
Attività di volo	29
2.2 Linee guida per l'analisi termografica di edifici	31
Riferimenti bibliografici.....	31

Scopo.....	31
Influenza di parametri esterni ed interni sulla termografia.....	31
Fattori esterni.....	31
Fattori interni	32
Elaborazione dei termogrammi	32
Specifiche richieste alla termocamera infrarossa	33
Grandezze geometriche caratteristiche.....	33
2.3 Linee guida per l'acquisizione di immagini nel visibile	39
3 Analisi termica dell'involucro di edifici.....	48
3.1 Fonti di incertezza nella termografia infrarossa	50
3.2 Fattore β	54
3.3 Pelle termica	57
3.3.1 Elaborazione mediante il software della termocamera.....	57
3.3.2 Mappa di β	59
3.4 Interpretazione della variazione di β in rilevazioni successive.....	62
Caso 1: mappa di β si ripresenta uguale.....	63
Caso 2: cambia il punto in cui si ha il potere emissivo massimo	64
Caso 3: il valore di β diminuisce.....	64
Caso 4: il valore di β aumenta	64
3.5 Realizzazione del modello 3D nel visibile.....	66
3.5.1 Ritaglio delle immagini nel visibile	66
3.5.2 Creazione modello 3D	68
4 Caso studio: la centrale termica dell'Università.....	69
4.1 Realizzazione del volo	69
4.2 Elaborazione delle immagini nel visibile e realizzazione del modello 3D	71
4.3 Elaborazione delle immagini termografiche e realizzazione del modello 3D termico	73
5 Conclusioni.....	79
Appendice.....	82
Calcolo del fattore di vista	82
Creazione della matrice di β – caso studio	84
Creazione della matrice di β – correzione con il fattore di vista	87
Ritaglio delle immagini nel visibile.....	89
Bibliografia.....	90

Introduzione

La crescente sensibilizzazione e la presa di coscienza riguardo l'inasprimento della crisi climatica in atto, sta conducendo i Governi verso un maggiore impegno nel risparmio e nell'efficientamento energetico. Sono questi, infatti, parallelamente all'aumento della produzione di energia da fonti rinnovabili, alla decarbonizzazione e all'investimento nell'innovazione, gli aspetti principali che caratterizzano il processo di transizione energetica intrapreso per cercare di contrastare la crisi climatica.

Il settore edile costituisce il 40% della domanda di energia in Europa e fa sì che si concentri in un unico ambito il maggior potenziale di efficienza energetica. A causa dell'enorme potenziale rappresentato da tale settore, la Commissione Europea ha stilato una direttiva per la regolamentazione delle prestazioni energetiche degli edifici, sulla base della quale sono state emanate numerose leggi nazionali in materia. In diversi Paesi è stato reso obbligatorio l'Attestato di Certificazione Energetica (EPC, Energy Performance Certificate) relativo ai nuovi edifici e alle ristrutturazioni. In questo modo, anche grazie ai meccanismi di incentivazione finanziaria promossi da vari Paesi, compresa l'Italia, si sta mettendo grande impegno nel processo di efficientamento energetico degli edifici, in particolare di quelli di civile abitazione, al fine di ridurre il consumo energetico e conseguentemente l'impatto ambientale.

In quest'ottica, risulta indispensabile la realizzazione di un'analisi energetica volta ad individuare in maniera accurata e il più possibile precisa le cause di inefficienza, così da pianificare gli interventi attuando le migliori strategie per ottimizzare le prestazioni della struttura.

Lo scopo del presente elaborato, che descrive l'attività di tirocinio svolta presso il DIISM, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche, è quello di gettare le basi per la definizione di un metodo di analisi termica di un involucro edilizio. La metodologia che si intende realizzare nasce dalla sinergia di tre settori che stanno trovando, negli ultimi anni, sempre maggiore spazio in campo ingegneristico, grazie alla loro praticità ed efficienza: il settore degli UAVs: *Unmanned Aerial Vehicles*, quello della termografia infrarossa e quello della fotogrammetria aerea. L'obiettivo dello studio condotto è quello di definire gli step di

un processo di analisi termica di un involucro edilizio in grado di permettere la rilevazione dei difetti che nel tempo si manifestano all'interno della struttura, al fine di intervenire in modo mirato per correggerli e migliorare l'efficienza energetica dell'edificio.

L'elaborato si articola in quattro capitoli.

Il capitolo I descrive i settori tecnologici che vengono coinvolti nella metodologia di analisi termica che si intende sviluppare. Si riportano nozioni relative alla nascita e allo sviluppo di tali settori fino ai giorni d'oggi, evidenziandone le possibilità di impiego e gli aspetti che ne hanno permesso la diffusione negli ultimi decenni; inoltre, si espongono le motivazioni che hanno portato al loro coinvolgimento nel processo di indagine descritto e le tecnologie che vengono impiegate per lo svolgimento dell'analisi termica.

Il capitolo II riporta le linee guida che sono state definite al fine di realizzare una analisi termica corretta i cui dati forniti siano affidabili. Il protocollo di volo nasce dal connubio tra la normativa vigente in materia di droni e il buon senso delle persone coinvolte; vengono indicati i requisiti che l'operatore deve soddisfare per poter ottenere le autorizzazioni necessarie a condurre la missione; vengono descritte le misure di sicurezza da attuare al fine di evitare danni a cose e persone e si riportano indicazioni relative alla realizzazione pratica del volo. Le linee guida relative alla termografia infrarossa definiscono i fattori che influenzano la pratica termografica e indicano gli scenari ottimali in cui realizzare la rilevazione, in modo tale da ridurre al minimo le fonti di incertezza che potrebbero portare ad interpretazioni errate delle immagini termografiche ottenute. Relativamente all'acquisizione delle immagini nel visibile, viene descritta l'impostazione necessaria da dare alle camere in funzione della termocamera con cui sono accoppiate, al fine di massimizzare la qualità della analisi condotta.

Il capitolo III descrive la metodologia di analisi termica sviluppata, dall'acquisizione delle immagini nell'infrarosso fino alla realizzazione della pelle termica che rappresenta lo stato dell'involucro dell'edificio studiato. Si definisce il parametro adimensionale β , i cui valori caratterizzano proprio la pelle termica: è studiando la variazione nel tempo di tale parametro che si realizza l'analisi termica dell'edificio e si è in grado di capire se si siano

manifestati difetti nell'involucro edilizio. Inoltre, si descrive l'elaborazione delle immagini nel visibile e la realizzazione del modello 3D.

Il capitolo IV descrive il caso studio realizzato sulla struttura dell'Università che ospita la centrale termica. Viene descritto un caso applicativo che, attraverso i diversi step che compongono la metodologia, conduce alla realizzazione di un modello 3D termico della struttura indagata. Dalla realizzazione del volo, si passa alla elaborazione delle immagini, sia nel visibile che nell'infrarosso, fino alla realizzazione dei rispettivi modelli tridimensionali.

Infine, si traggono le conclusioni relative alla metodologia sviluppata, ai risultati ottenuti e si valutano gli sviluppi futuri che potrebbero essere perseguiti.

In appendice si riportano i codici Matlab che sono stati sviluppati per le fasi di elaborazione delle immagini e per la creazione della matrice di β .

1 Settori coinvolti nell'attività e apparato tecnologico utilizzato

1.1 UAVs: Unmanned Aerial Vehicles

Un primo settore coinvolto nella metodologia di analisi di un involucro edilizio è quello degli UAVs. Gli UAVs: *Unmanned Aerial Vehicles*, anche detti APR (*Aeromobili a Pilotaggio Remoto*), ebbero il loro iniziale sviluppo iniziale in ambito militare. Tentativi approssimativi di sfruttare velivoli senza piloti iniziarono ad essere condotti già nell'ultimo decennio dell'Ottocento. Gli studi furono portati avanti durante le due Guerre mondiali fino ad oggi. Parallelamente allo sviluppo in campo militare, negli ultimi decenni la tecnologia dei droni si è imposta anche in ambito civile. Sono sempre più numerosi i professionisti, le istituzioni e i centri di ricerca che scelgono di impiegare tali dispositivi per svolgere le loro attività. Le applicazioni civili sono molto varie:

- intrattenimento;
- sicurezza delle frontiere e lotta ai narcotrafficanti;
- ampliamento della connessione internet;
- monitoraggio di siti archeologici;
- monitoraggio di fauna e biodiversità;
- operazioni di ricerca e soccorso;
- agricoltura;
- monitoraggio ambientale (inquinamento dell'aria, acustico) e calamità naturali (meteorologia);
- applicazioni in ambito sportivo.

Tale elenco dimostra l'impatto che questa tecnologia sta avendo nei più disparati aspetti delle nostre vite. Il contributo che i droni forniscono e che forniranno in futuro grazie al continuo sviluppo, influenza in maniera sempre più profonda e insostituibile gli ambiti della nostra quotidianità.

La motivazione che ha spinto a coinvolgere gli UAVs nella metodologia di analisi termica di edifici che si intende esporre è la possibilità di impiegare tali dispositivi nella realizzazione di indagini termografiche. Le indagini vengono, infatti, effettuate attraverso gli APR (Aeromobili a Pilotaggio Remoto), in particolare un quadricottero ed un ottacottero, creati nell'ambito del "progetto *A.D.E.L.E, Aerial Drone for Environmental and Energy Researchs*", condotto dal DIISM. Lo svolgimento delle operazioni di diagnostica termografica mediante drone consente di superare una serie di problematiche che si incontrano nella usuale pratica termografica. I vantaggi che se ne traggono sono:

- velocità di esecuzione: la maneggevolezza dei droni consente di poter compiere l'analisi in un tempo decisamente ristretto, in termini di ore, in funzione della dimensione dell'edificio;
- accessibilità: l'impiego di un drone consente di compiere l'analisi in siti di difficile accesso all'uomo, dove sono presenti ostacoli naturali o artificiali che non consentirebbero la realizzazione completa dell'indagine se fosse condotta con altri strumenti;
- completezza dell'analisi: la possibilità di posizionare la termocamera ad altezze elevate consente di condurre un'indagine termografica completa anche in edifici di grandi dimensioni permettendo di raggiungere strutture, come tetti o coperture, che altrimenti rimarrebbero escluse dall'analisi;
- sicurezza: il drone consente un miglioramento delle condizioni generali di sicurezza, costituendo un'efficace alternativa all'intervento di operatori in aree a rischio a causa della difficile accessibilità;
- accuratezza: la possibilità di programmare il percorso del drone e l'elevata precisione che caratterizza il volo, grazie ai sistemi GPS di elevata qualità, consente di far sì che la termocamera sia sempre orientata in maniera ottimale rispetto alla superficie che sta inquadrando.

1.2 Termografia infrarossa

La termografia infrarossa è una tecnica di indagine non distruttiva il cui obiettivo è quello di convertire la radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie di un corpo nello spettro dell'infrarosso in una immagine radiometrica, sulla quale è possibile leggere i valori della temperatura. Ogni corpo avente una temperatura maggiore dello zero assoluto (0 [K]) emette energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche: di queste la termocamera intercetta solamente quelle che ricadono nello spettro dell'infrarosso. Quella della termografia infrarossa è una tecnica nata non molto tempo fa. Nel 1800, l'astronomo Sir William Herschel scoprì la porzione dell'infrarosso dello spettro elettromagnetico. Nel 1840, il figlio di William, Sir John Herschel, ottenne un primitivo risultato di immagine termica su carta che chiamò "termografia". Sulla scia di tali scoperte, i primi dispositivi volti all'intercettazione della radiazione nell'infrarosso furono sviluppati in ambito militare durante la Prima guerra mondiale, al fine di individuare artiglieria, soggetti e veicoli nemici. Lo sviluppo proseguì poi a cavallo della Seconda guerra mondiale, ma la tecnologia era ancora primordiale e le camere ingombranti. Solo a partire dalla metà degli anni '50, una volta rimosso il segreto militare, i dispositivi di *imaging* termico iniziarono ad essere disponibili per la scienza e l'industria civile. A partire dagli anni '70, vennero resi disponibili sistemi di dimensioni ridotte e più facilmente portabili; si trattava di sistemi a scansione meccanica costituiti da un unico sensore fotonico raffreddato mediante azoto liquido. Tali dispositivi resero possibile l'applicazione commerciale e industriale della termografia. Grazie all'enorme progresso nella tecnologia dei microsistemi, alla fine degli anni '90 comparvero i primi sensori microbolometrici non raffreddati; questi permisero la realizzazione dei FPA: Focal Plane Arrays. Il Focal Plane Array è una tipologia di sensore termico costituito da una serie di piccoli bolometri a film sottile disposti a formare una matrice sul piano focale del sensore stesso. Ciò si traduce in un sensore piano costituito da tanti pixel, attraverso il quale è possibile ottenere un miglioramento del rapporto qualità-prezzo in varie applicazioni, anche se la sensibilità termica risulta minore rispetto a quella dei sensori fotonici. Per la realizzazione dei piccoli bolometri a film sottile si utilizzano prevalentemente Ossido di Vanadio (Vox) e Silicio Amorfo. Oggigiorno, le dimensioni

tipiche dei sensori sono 160x120, 320x240 e 640x480 pixel. Inoltre, mentre in passato i pixel avevano generalmente dimensioni di 35x35 μm , oggi è possibile trovare pixel di dimensioni 25x25 μm , 17x17 μm o anche 12x12 μm . La disponibilità di pixel di dimensioni minori ha permesso la realizzazione di sensori di superficie ridotta. Ciò si è tradotto nella produzione e messa in commercio di termocamere dalle dimensioni contenute che ne permettono l'applicazione in numerosi settori. L'impiego degli UAVs nella realizzazione di indagini termografiche è un esempio delle tante possibilità che l'enorme sviluppo delle termocamere negli ultimi decenni ha portato. Infatti, la riduzione delle dimensioni di tali dispositivi non ha inficiato la loro risoluzione termica, anzi, le prestazioni sono migliorate in qualità.

Di seguito si riportano alcuni esempi di termocamere adatte all'installazione su drone.

- FLIR DUO PRO R: è un potente dispositivo di imaging termico e a luce visibile dotato di un doppio sensore ad alta risoluzione, progettato per un'ampia gamma di applicazioni con drone in ambito commerciale, industriale e di sicurezza pubblica. Combinando una termocamera e una video camera a colori ad alta definizione, 4K, in un singolo pacchetto integrato, consente di catturare immagini termiche e immagini visibili in un unico volo.



SPECIFICATION		
THERMAL IMAGER	Uncooled VOx Microbolometer	
SENSOR RESOLUTION	640x512	336x256
LENS	13 mm: 45° x 37°	9mm: 35° x 27°
	19 mm: 32° x 26°	13 mm: 25° x 19°
	25 mm: 25° x 20°	19 mm: 17° x 13°
THERMAL SENSITIVITY	<50 mK	
SPECTRAL BAND	7.5 – 13.5 μm	
THERMAL FRAME RATES	30 Hz	
ACCURACY	+/- 5°C	
VISIBLE CAMERA RESOLUTION	4000 x 3000	
SIZE	85x81.3x68.5mm	
	85x86.5x68.5mm (640-25 mm lens only)	
WEIGHT	325g	
	375g (640-25 mm lens only)	
INPUT VOLTAGE	5.5 – 26.0 VDC	
POWER DISSIPATION	10 W	

Figura 1-1: termocamera FLIR DUO PRO R e specifiche

- FLIR BOSON: la termocamera ad onde lunghe (LWIR) Boson stabilisce un nuovo standard per dimensioni, peso, consumi e prestazioni. Tale dispositivo si presta perfettamente ad essere impiegato con sistemi aerei a pilotaggio remoto.



SPECIFICATION		320 x 256	640 x 512
THERMAL IMAGER	Uncooled Vox Microbolometer		LENS OPTIONS (HFOV; effective focal length)
SENSOR RESOLUTION	320 x 256	640 x 512	
SPECTRAL BAND	7.5 – 13.5 μm	8 – 14 μm	92°; 2.3 mm
THERMAL FRAME RATES	60 Hz baseline; 30 Hz runtime selectable (≤ 9 Hz available)		95°; 4.9 mm
ACCURACY	<40 mK (Industrial); <50 mK (Professional); <60 mK (Consumer)		50°; 8.7 mm
SIZE AND WEIGHT	21x21x11 mm (without lens)	7,5g (without lens)	34°; 6.3 mm
INPUT VOLTAGE	3.3 VDC		24°; 9.1 mm
POWER DISSIPATION	As low as 500 mW		16°; 13.8 mm
			12°; 18.0 mm
			8.0°; 55.0 mm
			4.0°; 55.0 mm
			5.5°; 73 mm

Figura 1-2: termocamera FLIR BOSON e specifiche

- OPRIS P640: è la termocamera per misurazioni nell'infrarosso con il più piccolo VGA (Video Graphics Array) al mondo. Tale dispositivo è caratterizzato da elevata risoluzione e va impiegata nel momento in cui è necessario avere un elevato dettaglio termico. Le sue dimensioni contenute la rendono ideale per l'applicazione aerea.

SPECIFICATION		Optics (FOV)
DETECTOR	FPA, uncooled (17 μm x 17 μm)	33° x 25° / f = 18.7 mm or 15° x 11° / f = 41.5 mm or 60° x 45° / f = 10.5 mm or 90° x 64° / f = 7.7 mm
OPTICAL RESOLUTION	640 x 480 pixel VGA	
SPECTRAL RANGE	7.5 – 13 μm	
FRAME RATE	32 Hz * 125 Hz in sub-frame mode (640x120 pixels)	
SENSITIVITY	75 mK	
DIMENSION	46 mm x 56 mm x 90 mm	
WEIGHT	320 g, incl. Lens	
VOLTAGE	0 – 10 V input, digital input (max. 24 V), 0 – 10 V output	



Figura 1-3: termocamera OPRIS P640 e specifiche

Le camere che possono essere impiegate nelle indagini termografiche aeree devono avere, chiaramente, dimensioni contenute. Ma la loro scelta va fatta anche in base al drone di cui si dispone: UAVs più piccoli e meno potenti consentiranno il trasporto di termocamere di piccole dimensioni, compatte, come quelle elencate qui sopra, che magari abbiano integrato anche un sensore per la cattura di immagini nello spettro del

visibile, mentre con UAVs più grandi e di potenza maggiore sarà possibile utilizzare termocamere di dimensioni maggiori e magari accoppiate ad un'altra fotocamera che catturi immagini nel visibile, trasportando così due dispositivi distinti.

Attualmente, l'impiego della termografia infrarossa coinvolge numerosi settori:

- industria, per manutenzione preventiva;
- agricoltura di precisione;
- indagine di campi fotovoltaici e parchi eolici;
- diagnostica di componenti elettronici;
- monitoraggio e sorveglianza;
- monitoraggio ambientale;
- controllo qualità e di processo;
- diagnostica in medicina e veterinaria.

L'applicazione su cui si pone l'attenzione in questo elaborato, che è anche la più diffusa, è quella relativa al campo dell'edilizia. La termografia infrarossa passiva, nella quale cioè il soggetto osservato non viene alterato, ma si sfrutta la sua naturale emissività, è ormai una tecnica affermata per il monitoraggio dello stato di strutture edilizie e per l'identificazione rapida delle possibili anomalie presenti. Tale procedura evita di affrontare onerose e potenzialmente dannose investigazioni mediante tecniche distruttive e permette di correggere i difetti prima che diventino più ingenti e costosi da riparare. Inoltre, indagini termografiche qualitative consentono di realizzare analisi energetiche volte a determinare le prestazioni dell'involucro degli edifici, potendo visualizzare: perdite energetiche, carenze o difetti nell'isolamento, condensa e umidità nei vari componenti edilizi, infiltrazioni d'aria, ponti termici. È possibile, in questo modo, individuare le cause di inefficienza energetica e studiare i migliori interventi da realizzare, al fine di incrementare le prestazioni dell'edificio in termini di risparmio energetico, risparmio economico, ed impatto ambientale.

I termogrammi catturati vengono elaborati, corretti degli errori da cui sono affetti, per poi essere sfruttati per la realizzazione di un modello 3D termico dell'edificio, che ne rappresenti l'involucro e che lo caratterizzi dal punto di vista delle prestazioni energetiche. L'obiettivo sarà poi quello di individuare, in indagini svolte a distanza di

tempo, eventuali variazioni della mappa termica 3D, dalle quali è possibile rilevare la manifestazione di difetti all'interno dell'involucro, i quali sono causa di inefficienza energetica.

1.3 Fotogrammetria aerea

La fotogrammetria è una tecnica che consente di determinare metricamente forma e posizione di oggetti, partendo da almeno due fotogrammi distinti che riprendono lo stesso oggetto. Questa tecnica viene solitamente impiegata in cartografia, topografia e in architettura. Lo sviluppo di calcolatori in grado di gestire una grande quantità di dati e della grafica computerizzata ne hanno permesso un utilizzo sempre più semplice e rapido e con costi minori. Una particolare tecnica fotogrammetrica è quella chiamata “Structure from Motion”, la quale permette di ricostruire la forma di oggetti attraverso la collimazione automatica di punti da un insieme di foto. Questa tecnica consente la realizzazione di modelli 3D mediante software dedicati. È proprio questa la finalità con cui la fotogrammetria aerea viene impiegata all’interno del processo di analisi termica di edifici che si sta esponendo: l’utilizzo di una fotocamera, accoppiata alla termocamera, consente di catturare fotogrammi dell’edificio studiato e, tramite il software di fotogrammetria 3DF Zephyr Aerial, di realizzare il modello 3D dell’edificio stesso. La realizzazione del modello 3D permette di disporre di un riscontro visibile che consente di collocare sulla struttura i difetti individuati e aggiungere un ulteriore dato per la loro interpretazione.

Il software 3DF Zephyr Aerial viene sfruttato anche per realizzare il modello 3D termico dell’edificio indagato.

1.4 Tecnologia impiegata

Entriamo ora nel dettaglio dei dispositivi e della strumentazione impiegati per lo svolgimento dell'attività di tesi.

Nell'ambito del progetto "A.D.E.L.E, Aerial Drone for Environmental and Energy Researchs" il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dispone di diversi SAPR di varie dimensioni. Quelli impiegati nell'ambito dell'attività di tesi sono due: un quadricottero ed un ottacottero.

1.4.1 Quadricottero

Di seguito vengono riportate le specifiche tecniche del quadricottero.

NOME	ADELE 4
CONFIGURAZIONE	Quadricottero
MOTORI (4x)	
• kV	185
• Potenza	2755 [W]
ELICHE (TRI PALA)	24.5 x 8.1 [in]
BATTERIA (1x)	
• Numero celle	10S LiPo
• Capacità	1 x 22000 [mAh]
• Potenza di scarica	30C (660 A)
PESO STRUTTURA	13 [kg]
PAY LOAD MASSIMO	12[kg]

Tabella 1: specifiche del drone quadricottero

La potenza che il drone riesce ad erogare consente di equipaggiarlo con due dispositivi ottici per la realizzazione dell'indagine termica: una termocamera ed una fotocamera.

1.4.1.1 Termocamera

La termocamera impiegata in questa configurazione è la *FLIR A655sc*; monta un sensore microbolometrico non raffreddato da 640 x 480 pixel; è caratterizzata da elevata risoluzione, la quale fornisce una eccellente qualità di immagine, e da funzionalità d'avanguardia che la rendono una delle migliori termocamere per applicazioni scientifiche di ricerca e sviluppo. Sono disponibili varie ottiche; quelle in dotazione del

Dipartimento sono da 15° e da 25°. Di seguito vengono mostrate le specifiche della termocamera FLIR A655sc.



SPECIFICATION	
THERMAL IMAGER	Uncooled Vox Microbolometer
SENSOR RESOLUTION	640 x 480
LENS	15° x 11° 25° x 19°
FOCAL LENGTH	41.3 mm 24.6 mm
IFOV	0.41 mrad 0.68 mrad
SENSOR PITCH	17 µm
NEDT	<30 mK
SPECTRAL BAND	7.5 – 14 µm
THERMAL FRAME RATES	50 Hz
ACCURACY	+/- 2°C
STANDARD TEMPERATURE RANGE	-40°C to 150°C 100°C to 650°C
SIZE AND WEIGHT	216x73x75mm (senza ottica) 0,92 KG
INPUT VOLTAGE	12 – 24 VDC
POWER DISSIPATION	24W

Figura 1-4: termocamera FLIR A655sc e specifiche

1.4.1.2 Fotocamera

La fotocamera che viene accoppiata alla termocamera è una SONY α7R III. È una macchina fotografica di elevata qualità che garantisce eccellenti prestazioni. Di seguito ne vengono riportate le specifiche.

SPECIFICATION	
SENSORE	CMOS Exmor R full-frame 35mm (35.9 x 24 mm)
RISOLUZIONE	42.4 megapixel (effettivi)
RAPPORTO DI VISUALIZZAZIONE	3:2
DIMENSIONE IMMAGINE (pixel) [3:2]	7952 x 5304
DIMENSIONI E PESO	126.9x95.6x73.7mm 657 g
ALIMENTAZIONE	Batteria ricaricabile NP-FZ100

Figura 1-5: specifiche della fotocamera SONY α7R III

Tale camera monta l'obiettivo SONY FE 24-105 MM F4 G OSS, di cui vengono riportate le specifiche:

SPECIFICATION	
FORMATO	Full-frame 35mm
LUNGHEZZA FOCALE	24-105 mm
ANGOLO DI VISIONE	84°-23°
DISTANZA MINIMA DI MESSA A FUOCO	0.38 m
DIMENSIONI E PESO	83.4x113.3 mm 663 g

Figura 1-6: specifiche dell'obiettivo SONY FE 24-105 MM F4 G OSS



Figura 1-7: fotocamera SONY α7R III equipaggiata con l'obiettivo SONY FE 24-105 MM F4 G OSS

Le dimensioni della fotocamera, una volta equipaggiata con l'obiettivo, potrebbero risultare sconvenienti al fine di un utilizzo su drone, ma il quadricottero di cui si dispone, avendo potenza considerevole, ne permette l'impiego. In questo modo è possibile equipaggiare l'UAV con dispositivi dalle migliori prestazioni che non si sarebbero potuti impiegare su droni di più piccole dimensioni.

1.4.1.3 Gimbal

Per la stabilizzazione di termocamera e fotocamera in volo viene utilizzato un gimbal. In particolare, il quadricottero viene equipaggiato con il *Gremys H16*. È un gimbal a tre assi ed è il più leggero e potente della sua classe sia per applicazioni portatili che aeree. Viene alimentato da una batteria 4S agli ioni di litio da 3400 mAh. Grazie agli encoder ad altissima risoluzione, con una risoluzione fino a 0,005°, ed al controllo avanzato dei motori in combinazione con un sensore IMU (Inertial Measurement Unit, costituito da

accelerometri e giroscopi) ultra-preciso, il *Gremsy H16* garantisce elevati livelli di stabilità anche nelle situazioni più impegnative. Il carico utile massimo di 7,25 Kg consente di supportare facilmente sia termocamera che fotocamera. A tal fine è stata realizzata appositamente una piastra in fibra di carbonio sulla quale vengono fissate, tramite delle viti, fotocamera e termocamera, una di fianco all'altra, in modo tale che gli assi delle ottiche siano paralleli tra loro e gli obiettivi si trovino alla stessa altezza in verticale e ad una distanza orizzontale di 10 cm l'uno dall'altro. La piastra viene poi fissata sul supporto del gimbal.



Figura 1-8: dettaglio del sistema di acquisizione delle immagini



Figura 1-9: drone quadricottero equipaggiato con il sistema di acquisizione delle immagini

La gestione del sistema di acquisizione immagini da terra avviene mediante un radiocomando. Gimbal e termocamera sono collegati alla PixHawk, cioè alla centralina di controllo del drone, ed è quest'ultimo componente che permette la loro gestione da terra. La fotocamera è invece equipaggiata con un controller della Sony, il "Seagull #REC"; questo, essendo collegato ad una ricetrasmittente, consente la gestione della fotocamera con il radiocomando. La fotocamera salva filmati e immagini acquisiti nella scheda SD integrata, mentre la termocamera li salva nel Raspberry Pi, un computer a scheda singola. Questo permette inoltre, essendo collegato tramite un cavo HDMI ad una ricetrasmittente, di mostrare la scena inquadrata dalla termocamera in un piccolo televisore posto a terra. Per la fotocamera ciò avviene collegando direttamente alla fotocamera la ricetrasmittente mediante cavo HDMI.



Figura 1-10: radiocomando per la gestione da terra del sistema di acquisizione delle immagini

1.4.2 Ottacottero

Di seguito vengono riportate le specifiche tecniche dell'ottacottero.

NOME	DJI S1000+ "ADELE 5"
CONFIGURAZIONE	Ottacottero
MOTORI (8x)	
• kV	400
• Potenza	500 [W]
ELICHE	15 x 5.5 [in]
BATTERIA (2x)	
• Numero celle	6S LiPo
• Capacità	2 x 10000 [mAh]
• Potenza di scarica	10C (200 A)
PESO STRUTTURA	4.5 [kg]
PAY LOAD MASSIMO	7[kg]

Tabella 2: specifiche del drone ottacottero

La potenza che il drone riesce ad erogare consente di equipaggiarlo con due dispositivi ottici per la realizzazione dell'indagine termica: una termocamera ed una fotocamera.

1.4.2.1 Termocamera

La termocamera impiegata in questa configurazione è la *OPTRIS PI400*. Questa termocamera costituisce un'ottima soluzione per tutte le applicazioni nelle quali è richiesto un rilevamento termografico controllato da remoto, come nel caso di indagini mediante UAV. È, infatti, una delle termocamere più piccole al mondo. Il sensore è un FPA (Focal Plane Array) microbolometrico non raffreddato, con una risoluzione di 382 x 288 pixel. Sono disponibili diverse ottiche, ma quella in dotazione del Dipartimento è caratterizzata da un'apertura di 29° x 22° per una lunghezza focale di 18.7 mm. Di seguito vengono riportate le specifiche della OPTRIS PI400.


SPECIFICATION		Optics (FOV)
DETECTOR	FPA, <u>uncooled</u> (25 μm x 25 μm)	29° x 22° / f = 18,7 mm or 13° x 10° / f = 41 mm or 53° x 40° / f = 10,5 mm or 80° x 56° / f = 7.7 mm
OPTICAL REOLUTION	382 x 288 <u>pixe</u>	
SPECTRAL RANGE	7.5 – 13 μm	
FRAME RATE	80 Hz / <u>switchable</u> to 27 Hz	
SENSISTIVITY	PI 400: 0,08 K with 29°, 53°, 80° FOV PI 450: 0,04 K with 29°, 53°, 80° FOV	
TEMPERATURE RANGE	-20°C....100°C, 0°C....250°C, 150°C...900°C	
ACCURACY	±2°C	
DIMENSION	46 mm x 56 mm x 90 mm	
WEIGHT	320 g, <u>incl.</u> Lens	
VOLTAGE	0 – 10 V input, <u>digital</u> input (max. 24 V), 0 – 10 V output	

Figura 1-11: termocamera OPTRIS PI400 e specifiche

1.4.2.2 Fotocamera

La fotocamera che nell'ottocottero viene accoppiata alla termocamera è una *SONY α6000*. È anch'essa una macchina fotografica di elevata qualità, anche se dalle prestazioni leggermente inferiori rispetto alla *α7R III*, rispetto alla quale è caratterizzata anche da minori dimensioni, in quanto necessita di essere equipaggiata su un UAV di potenza minore rispetto al quadricottero. Di seguito vengono riportate le specifiche della *SONY α6000*.

SPECIFICATION	
SENSORE	APS-C (23.5 x 15.6 mm)
RISOLUZIONE	24.3 megapixel (effettivi)
RAPPORTO DI VISUALIZZAZIONE	3:2
DIMENSIONE IMMAGINE (pixel) [3:2]	6000 x 4000
DIMENSIONI E PESO	120 x 66,9 x 45,1 mm 344 g
ALIMENTAZIONE	Batteria ricaricabile NP-FW50



Figura 1-12: fotocamera *SONY α6000* e specifiche

Tale camera monta l'obiettivo *SONY E PZ 18-105 MM F4 G OSS*.

SPECIFICATION	
FORMATO	APS-C
LUNGHEZZA FOCALE	18-105 mm
LUNGHEZZA FOCALE EQUIVALENTE A 35mm (APS-C)	27-157.5 mm
ANGOLO DI VISIONE	76°-15°
DISTANZA MINIMA DI MESSA A FUOCO	0.45 (grandangolo) – 0.95 m (teleobiettivo)
DIMENSIONI E PESO	78 x 110 mm 427 g



Figura 1-13: obiettivo *SONY E PZ 18-105 MM F4 G OSS* e specifiche

1.4.2.3 Gimbal

Per la stabilizzazione di termocamera e fotocamera in volo viene utilizzato un gimbal. In particolare, l'ottacottero viene equipaggiato con il *Gremysy T3*. È un sistema di stabilizzazione a tre assi in grado di fornire elevate prestazioni di stabilizzazione in volo; il sensore IMU, costituito da un giroscopio a tre assi e da un accelerometro a tre assi, essendo controllato termicamente consente di ottenere performance affidabili in qualsiasi condizione. Può essere alimentato da una batteria esterna o direttamente dalla batteria del drone. Il voltaggio di input va da 15 V a 52 V e viene convertito dai circuiti interni a 14.5 V per l'alimentazione. È caratterizzato da un payload massimo di 1.7 Kg. Anche per questo gimbal si è realizzata una apposita piastra in fibra di carbonio per permettere l'equipaggiamento con termocamera e fotocamera accoppiate una di fianco all'altra.



Figura 1-14: drone ottacottero equipaggiato con il sistema di acquisizione delle immagini

Nel quadricottero, il gimbal è collegato alla PixHawk del drone e grazie ad essa può essere gestito da terra mediante un radiocomando. Per quanto riguarda la gestione della *SONY α6000* da terra, è stato realizzato appositamente un programma nel raspberry a cui la camera è collegata: questo permette, tramite una ricetrasmittente cui è collegato, la gestione da terra tramite radiocomando e il salvataggio delle immagini e riprese video. La termocamera, invece, è gestita da un mini-PC cui è collegata mediante un cavo USB, nel quale salva le immagini acquisite. Il mini-PC è montato sul drone, alimentato dalla

batteria del drone stesso ed è collegato anch'esso alla ricetrasmittente grazie alla quale è possibile realizzare sia il controllo da terra mediante radiocomando che la trasmissione video della termocamera.

2 Protocolli e linee guida

L'indagine termografica condotta mediante UAV è una tecnica diagnostica che coinvolge due settori caratterizzati entrambi da limitazioni nella possibilità di applicazione. Le limitazioni relative al settore dei droni sono imposte dall'apparato normativo che lo regola, mentre quelle relative alla termografia sono legate al funzionamento della camera e all'affidabilità dei dati che si ottengono dalla rilevazione.

Al fine di poter compiere delle indagini attendibili e che soddisfino i requisiti legislativi, sono state definite delle linee guida che gli operatori sono tenuti a seguire. Quelle relative all'impiego di UAVs sono state stilate sulla base della normativa che regola il settore dei droni e descrivono, in maniera riassuntiva, l'iter che un operatore deve compiere per poter realizzare il volo in modo conforme legge. Tali linee guida hanno lo scopo di evidenziare i principi fondamentali su cui si basa la normativa in vigore, ma nel momento in cui si intende realizzare un volo, l'operatore è tenuto a conoscere in maniera approfondita tutto l'apparato legislativo legato a tale settore. A causa del continuo sviluppo delle tecnologie e del progressivo ampliamento dei campi di applicazione, la normativa relativa al volo dei droni è in continua evoluzione e non sempre è chiara. Gli enti interessati, l'ENAC per l'Italia, sono coinvolti in una profonda fase di studio per adattare le normative e poter così sfruttare pienamente le potenzialità e le opportunità che l'utilizzo dei droni offre.

Per quanto concerne la termografia infrarossa, le linee guida che sono state definite derivano da considerazioni relative al funzionamento della macchina termografica, agli aspetti che influenzano le misurazioni e al livello di dettaglio che si intende osservare.

2.1 Linee guida per operazioni con Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto (SAPR).

Acronimi e abbreviazioni

SAPR: Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto

APR: Aeromobile a Pilotaggio Remoto

ENAC: Ente Nazionale Aviazione Civile

EASA: European Union Aviation Safety Agency

Riferimenti normativi

- REGOLAMENTO DI ESECUZIONE (UE) 2019/947 DELLA COMMISSIONE del 24 maggio 2019 relativo a norme e procedure per l'esercizio di aeromobili senza equipaggio;
- Regolamento UAS-IT;
- Regolamento ENAC: "Regole dell'aria Italia"

Scopo

Lo scopo di tale documento è presentare le linee guida per lo svolgimento delle operazioni con SAPR. I rischi legati alla tipologia di operazione richiedono specifiche regole e procedure che l'operatore SAPR deve rispettare per garantire i livelli di sicurezza richiesti.

Modalità di ottenimento del consenso per l'operazione

Studio dell'edificio e dell'area in cui giace

Il primo passo per la realizzazione della missione è quello di studiare l'edificio oggetto di indagine. È necessario capire:

- se si trova in una zona libera o all'interno di una NO FLY ZONE: zona di interdizione al volo, entro la quale vige il divieto di sorvolo. Gli operatori hanno a disposizione varie soluzioni per individuare quali sono le NO FLY ZONES: la d-flight S.p.A, società del Gruppo ENAV (società per azioni italiana che opera come

fornitore in esclusiva di servizi alla navigazione aerea civile nello spazio aereo di competenza italiana), mette a disposizione una pagina web, alla quale è possibile accedere registrandosi gratuitamente e inserendo i dati del proprio APR, nella quale viene mostrata la mappa NO FLY ZONE; l'app Italian Airspace Lite espone in maniera chiara e precisa le zone dove non si può volare e i dati che fornisce si basano su fonti ufficiali;

- se è pubblico;
- se è privato;
- la destinazione d'uso (lavorativo, residenziale, industriale);
- le dimensioni (altezza e lunghezza delle facciate oggetto di indagine).

È poi necessario compiere un sopralluogo sul sito in cui l'edificio si trova. Ciò va fatto per determinare:

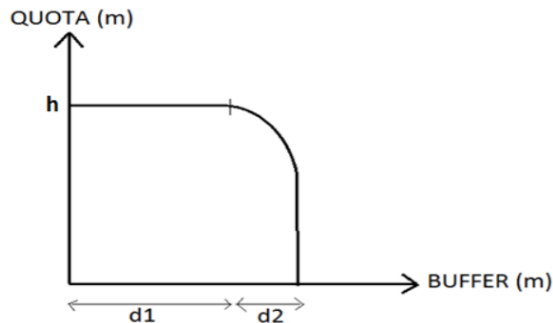
- la tipologia di area in cui l'edificio è situato (urbana, extraurbana, scarsamente popolata, industriale, ecc.);
- la vicinanza con altri edifici e loro destinazione d'uso (pubblici o privati);
- vicinanza con strade o altre infrastrutture di dominio pubblico;
- eventuali criticità che non possono essere rilevate con un'analisi documentale.

Analisi dei rischi e misure di sicurezza

Indipendentemente dallo scenario in cui si andrà a compiere la missione, è necessario realizzare una analisi dei rischi. Questa è fondamentale per poter garantire il livello di sicurezza richiesto ed evitare di incappare in incidenti che possano interessare oggetti e persone non coinvolte. La documentazione relativa all'analisi dei rischi deve essere accompagnata dall'elenco delle misure di sicurezza che si intende adottare e dalle modalità con cui queste verranno applicate.

La misura di sicurezza principe per operazioni che prevedono il volo di un drone è la definizione di un'area a terra, opportunamente valutata, che va transennata in modo da vietare l'accesso alle persone, esclusi gli operatori, così da evitare che il SAPR voli sopra soggetti non coinvolti. Oltre all'*area delle operazioni*, che è la regione all'interno della quale avviene il volo vero e proprio del drone, valutata in base alla distanza dall'edificio a cui si vuole far volare il drone stesso, è necessario prevedere un'ulteriore area, definita

“area di buffer”, che ha la funzione di margine di sicurezza, entro cui dovrà terminare il volo se attivato il terminatore di volo. Il calcolo dell’area di buffer avviene nel seguente modo:



$$d = d_1 + d_2 = V \times T_{fts} + V \times \sqrt{\frac{2 \times h}{g}}, \text{ dove:}$$

d = dimensione dell'area di buffer (m)

V = velocità operativa max dell'APR + velocità del vento max ammesso (m/s)

T_{fts} = tempo di attivazione del flight termination system (3s)

h = quota (m)

g = accelerazione di gravità ($9,8 \text{ m/s}^2$)

L'individuazione di un'area a terra, orizzontale, nella quale sia vietato l'ingresso di persone non coinvolte nell'operazione è una misura di sicurezza che va applicata in qualsiasi scenario. Tale area va opportunamente transennata e vanno poste delle “sentinelle” sul confine che aiutino a garantirne l'inaccessibilità.

Per la determinazione dell'area delle operazioni si deve tener conto che la distanza minima da un edificio a cui può essere fatto volare un SAPR è di 2 metri. Se si ha la possibilità, tenendo conto dello scenario in cui la missione si svolge e dei requisiti necessari alla corretta realizzazione dell'analisi, si può considerare di volare a distanza maggiore dall'edificio, in modo da avere un più ampio margine di sicurezza in caso di inconvenienti, sia per i soggetti non coinvolti che per l'attrezzatura impiegata.

All'interno dell'area interessata dalla missione, data dall'area delle operazioni e dall'area di buffer, potrebbero essere presenti infrastrutture che necessitano di accorgimenti:

- strade. Va vietata, tramite un transennamento, la circolazione lungo il tratto di strada che passa all'interno dell'area interessata dalla missione e si deve valutare una deviazione al traffico che eviti di creare disagi e ingorghi. A tal fine, va informata l'Autorità locale competente (Comune) in modo che richieda l'intervento delle forze dell'ordine locali (Vigili urbani) per regolare il traffico ed evitare congestionamenti;
- marciapiedi, sui quali deve essere vietato il transito di persone. È, quindi, necessario garantire un passaggio pedonale alternativo che sia in sicurezza rispetto alle operazioni che si stanno svolgendo. Si potrebbe allestire, a tal fine, un'impalcatura al confine dell'area di buffer che non interferisca con il volo del drone, né con le rilevazioni termografiche e digitali, e che permetta ai pedoni di circolare senza rischi;
- parcheggi pubblici e privati, i quali diverrebbero inutilizzabili. Vanno perciò informati, con opportuno anticipo, i residenti e gli utenti degli edifici limitrofi a quello oggetto di analisi della impossibilità di posteggio per tutta la durata delle operazioni;
- eventuali parchi, piazze, e altre aree pubbliche, che andrebbero transennate e vietate all'accesso per tutta la durata delle operazioni;
- edifici il cui accesso va garantito nonostante lo svolgimento della missione. Per questi, è necessario organizzare le entrate e uscite dall'edificio in modo tale che le persone non coinvolte non vengano sottoposte a rischi legati all'operazione. A tal fine, si potrebbe organizzare il volo del SAPR in modo da eseguire la rilevazione facciata per facciata, così da rendere possibile l'accesso all'edificio da uscite secondarie poste nella facciata non interessata, in quel momento, dall'analisi.

Documentazione richiesta

Per l'ottenimento del permesso di realizzare la missione, con eventuale occupazione del suolo pubblico, l'operatore deve presentare una richiesta all'Autorità locale competente (Comune, Prefettura, ecc.), nella quale vanno indicati:

- dati dell'operatore (nome società, proprietario, pilota, ecc.)

- autorizzazione ENAC
- costruttore, tipo e numero di serie del SAPR
- numero e data di conseguimento Attestato di pilotaggio per tutti i piloti (teorico, pratico)
- tipo di operazione per cui si richiede l'autorizzazione (Open, Specific, Certified)
- dichiarazione di tutela della privacy, debitamente firmata dai soggetti interessati, nel caso venga ripreso l'interno di abitazioni

Della richiesta deve far parte anche la seguente documentazione:

- dichiarazione di presa visione e rispondenza alle linee guida indicate in questo documento
- manuale delle operazioni
- documentazione relativa all'analisi del rischio
- documentazione relativa alle misure di sicurezza previste e modalità di attuazione delle stesse
- documentazione riportante le caratteristiche dell'area e dello spazio aereo per le quali è valida la richiesta di accesso ed i tempi richiesti di attività
- documentazione attestante il riconoscimento dell'organizzazione da parte di ENAC (autorizzazione per attività in categoria "specific" e "certified")
- assicurazione danni a terzi

Limitazioni per l'operatore SAPR

Personale tecnico

L'organizzazione dell'operatore deve disporre di personale tecnico adeguato, esperto nei settori dell'attività da effettuare. L'operatore deve fornire documentazione che descriva le responsabilità associate alle varie funzioni.

Misure di sicurezza per l'area

L'operatore deve prevedere l'adozione di misure e strumenti al fine di garantire la sicurezza di persone non coinvolte e la protezione di oggetti, nonché dell'edificio oggetto dell'analisi. Deve essere fornito un documento che descriva strumenti e

procedure specifiche per l'area interessata dall'operazione, che deve essere parte integrante della documentazione relativa all'analisi del rischio.

Organizzazione dell'attività

L'operatore è tenuto a dare comunicazione all'Autorità competente dei tempi complessivamente necessari allo svolgimento dell'attività mediante presentazione di un programma comprensivo di tutte le attività necessarie all'effettuazione del rilievo. Inoltre, l'operatore deve comunicare con opportuno anticipo all'Autorità competente qualsiasi modifica al programma prestabilito (rinvio per condizioni meteo non ideali, ecc.).

Procedure

Realizzazione, consegna e validazione della documentazione

L'operatore stila la documentazione necessaria, la consegna all'Autorità competente la quale la esamina e rilascia un documento di accettazione ed autorizzazione.

Preparazione dell'attività

L'operatore è tenuto ad effettuare tutti i passi necessari per una adeguata analisi dell'area oggetto dell'attività per minimizzare il livello di rischio associato all'operazione. Se ritenuto necessario l'operatore può effettuare un sopralluogo fisico nell'area delle operazioni.

Preparazione dell'area

L'operatore deve procedere alla messa in sicurezza dell'area, in conformità con quanto previsto dalla documentazione di analisi del rischio e con strumenti adeguati (transennamenti, sentinelle sul perimetro, ecc.) al fine di garantire l'area di buffer e di terminazione del volo.

Attività di volo

L'attività di volo deve svolgersi nel completo rispetto delle condizioni e limitazioni indicate nella documentazione di analisi del rischio.

In relazione all'attività di indagine termica di un involucro edilizio con ricostruzione 3D dello stesso, è preferibile che il volo mediante UAV sia condotto attorno all'edificio indagato realizzando spazzate parallele alle pareti e con l'asse ottico della termocamera disposto ortogonalmente al piano della superficie che viene inquadrata. La maggior parte degli edifici residenziali è composto da pianta rettangolare, quindi con pareti perimetrali perpendicolari fra loro, il che rende facilmente realizzabile il percorso di volo appena descritto. Tale accorgimento permette di ridurre al minimo le superfici da correggere con il fattore di vista, le quali si limitano ad essere quelle aventi geometria non piana, ma per esempio cilindrica, e quelle che, avendo un orientamento particolare, non permettono di essere inquadrare con spazzate ad esse parallele e con termocamera posta perpendicolarmente.

La possibilità di realizzare un tale percorso di volo va valutata in funzione dello scenario in cui ci si trova ad operare, in quanto vanno obbligatoriamente soddisfatti i requisiti di sicurezza necessari.

Il numero di spazzate necessario, indipendentemente dal modo in cui vengono compiute, è funzione della distanza dall'edificio a cui si vola e all'altezza dell'edificio stesso, tenendo in considerazione che per una corretta realizzazione del modello 3D è necessario un grado di sovrapposizione delle immagini di almeno l'80%.

2.2 Linee guida per l'analisi termografica di edifici

Riferimenti bibliografici

- M. Vollmer, K.-P. Möllmann, *Infrared Thermal Imaging. Fundamentals, Research and Applications*, WILEY-VCH.
- Gerald C. Holst, *Common Sense Approach to Thermal Imaging*, JCD Publishing, SPIE Optical Engineering Press.
- FLIR, *Manuale di termografia ad infrarossi per il mercato delle costruzioni e delle energie rinnovabili*.

Scopo

Lo scopo di tale documento è presentare le linee guida per la realizzazione dell'analisi termografica esterna di un edificio. Per ottenere immagini che abbiano la qualità necessaria e per poterne dare una interpretazione corretta occorre seguire delle indicazioni precise.

Influenza di parametri esterni ed interni sulla termografia

La termografia è fortemente influenzata dalle condizioni dell'ambiente in cui viene applicata. Tale influenza incide in maniera determinante soprattutto nell'analisi della superficie esterna di un edificio, in quanto all'interno è invece possibile considerare le condizioni di esercizio quasi stazionarie.

Fattori esterni

I fattori esterni che principalmente influenzano la termografia sono:

- radiazione solare diretta
- ombre
- vento
- cielo nuvoloso e cielo sereno
- pioggia, umidità, nebbia
- neve

Rilevazioni termografiche di edifici vanno realizzate cercando di soddisfare le seguenti condizioni:

- assenza di radiazione solare incidente. Quindi rilevazioni prima dell'alba o dopo il tramonto;
- assenza di vento, o al limite con velocità non superiore a 1 m/s;
- presenza di cielo nuvoloso completamente coperto;
- assenza di umidità, nebbia, pioggia e neve.

Fattori interni

Il fattore interno che principalmente influenza la termografia è:

- la temperatura interna dell'edificio.

È sempre necessario conoscerne il valore. Si deve fare in modo che sia la stessa in tutti gli ambienti, così da poter considerare l'interno dell'edificio in stato quasi stazionario. Inoltre, la differenza di temperatura tra ambiente interno e ambiente esterno deve essere di almeno 15°C. È chiaro che questa condizione, insieme alle considerazioni fatte per i fattori ambientali esterni che influenzano la termografia, fa sì che le misurazioni termografiche vengano realizzate prevalentemente in inverno.

Elaborazione dei termogrammi

Alle termocamere sono affiancati software per l'elaborazione e la visualizzazione delle immagini termiche. Tali software permettono di considerare e di correggere automaticamente alcuni aspetti che influenzano la termografia. Per poter realizzare queste correzioni è necessario registrare ed inserire nel software i seguenti parametri:

- emissività della superficie osservata: permette di considerare quanto l'oggetto è in grado di emettere rispetto al riferimento ideale di corpo nero;
- distanza tra la termocamera e l'oggetto di misura;
- condizioni ambientali: temperatura dell'aria e umidità relativa, che insieme alla distanza tra termocamera e oggetto osservato permettono di tenere conto della quota parte di radiazione assorbita dall'atmosfera;

- parametri dell'ottica esterna: temperatura dell'ottica e coefficiente di trasmissione dell'ottica, che permettono di tenere conto della presenza di una eventuale ottica esterna interposta tra termocamera e oggetto di misura;
- reflected temperature: è la temperatura di ciò che si riflette sull'oggetto di misura; solitamente viene presa pari alla temperatura ambiente, se intorno all'oggetto osservato non sono presenti fonti di calore importanti. Se, invece, si hanno elementi a temperatura elevata è necessario stimare tale temperatura e considerare questa come reflected temperature.

Specifiche richieste alla termocamera infrarossa

- intervallo spettrale: 2,5-5 μm (MWIR); 8-14 μm (LWIR)
- ambito di misurazione della temperatura: da -20°C fino a $+100^{\circ}\text{C}$
- ambito di impiego: da -10°C fino a $+40^{\circ}\text{C}$
- obiettivi: obiettivo normale, grandangolo e teleobiettivo in base allo scopo
- risoluzione termica: $<100\text{ mK}$ a 30°C (raccomandata $\leq 60\text{ mK}$)
- grandezza reale dell'oggetto più piccolo misurabile: $\leq 2 \times 2\text{ cm}$
- precisione di misura: $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 3.6^{\circ}\text{F}$) o $\pm 2\%$
- risoluzione del detector: $\geq 160 \times 120$ pixel (raccomandata 320×240 o superiore)

Grandezze geometriche caratteristiche

Data la termocamera di cui si dispone e che si utilizzerà per l'analisi dell'edificio, note le sue specifiche tecniche, in particolare dell'ottica e del sensore, si calcola la distanza massima R dall'edificio a cui è possibile acquisire le immagini in modo tale da rilevare il livello di dettaglio geometrico e termico richiesti. Tale distanza corrisponde alla distanza dall'edificio da cui bisogna far volare il drone. Inoltre, si calcolano le dimensioni della scena che la termocamera riesce ad inquadrare.

Le relazioni utilizzate per tali calcoli sono le seguenti:

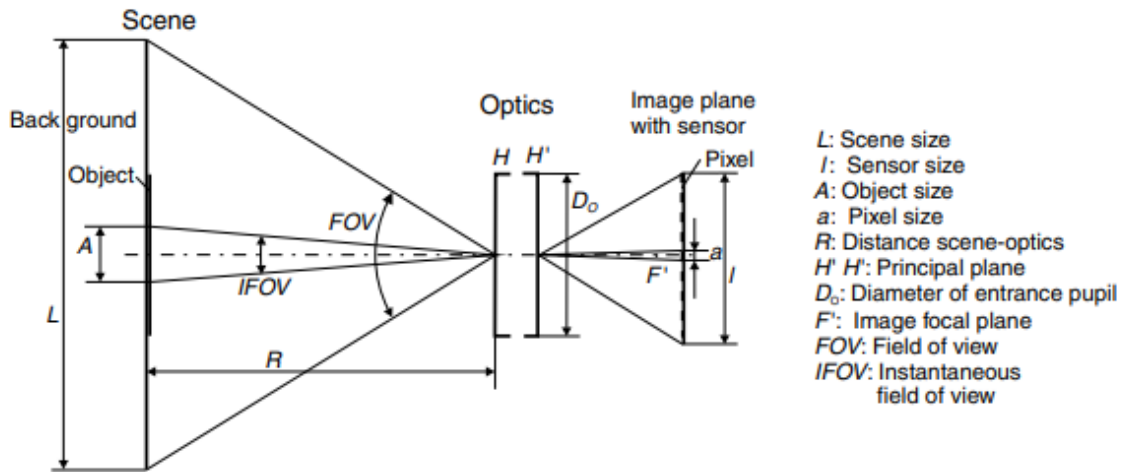


Figura 2-1: grandezze geometriche caratteristiche dell'ottica

$$L = 2R \tan \frac{FOV}{2}$$

$$A = 2R \tan \frac{IFOV}{2}$$

$$FOV = 2 \tan^{-1} \frac{l}{2fl} [rad] = \frac{FOV [deg]}{180^\circ} \times \pi [rad]$$

$$IFOV_{x,y} = 2 \tan^{-1} \frac{a_{x,y}}{2fl} = \frac{FOV_{x,y}}{NPixel_{x,y}} \times \frac{\pi}{180^\circ} \times 1000 [mrad]$$

dove fl = focal length.

Se il sensore non è quadrato, tutti i parametri dell'ottica devono essere specificati per entrambe le dimensioni: quella orizzontale e quella verticale, e le relazioni elencate devono essere applicate su entrambe le dimensioni.

In tali relazioni, le lunghezze sono espresse in metri, m, mentre gli argomenti delle funzioni trigonometriche sono espressi in radianti, rad.

È poi necessario tenere in considerazione un aspetto pratico. La definizione di IFOV prevede che tutta l'area attiva del sensore venga "coperta" dalla radiazione proveniente dall'oggetto osservato. Ciò è sicuramente vero quando quest'ultimo è grande rispetto al sensore; diverso è invece quando il bersaglio ha dimensioni paragonabili al sensore: in questo caso è necessario fare riferimento ad un MIFOV (IFOV Misurabile), grazie al quale è possibile considerare la misura compiuta effettivamente accurata. In particolare, per

considerare la rilevazione corretta, è necessario che la radiazione emessa dall'oggetto osservato copra almeno tre pixel del sensore che la riceve; si ha:

$$MIFOV_{x,y} = 3 \times \theta_{PAS_{x,y}}$$

$$\text{dove: } \theta_{PAS_{x,y}} = \frac{p_{x,y}}{fl} = \text{Pixel Angular Subtense}$$

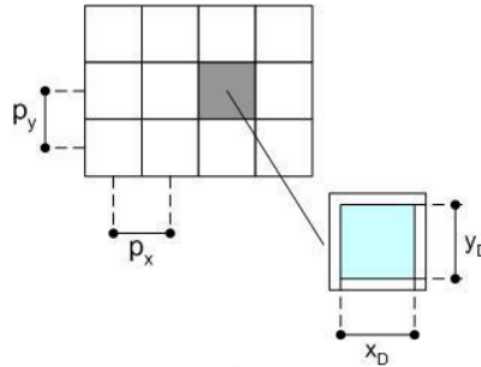


Figura 2-2: dettaglio del FPA

Alla distanza teorica R tra oggetto osservato e ottica, calcolata impiegando l'IFOV, va affiancata quindi la *distanza reale tra oggetto osservato e ottica*, che chiameremo R_r , calcolata con il MIFOV. Di conseguenza, si avranno valori differenti anche per le dimensioni reali $L_{x,y}$ della scena che la termocamera riesce ad inquadrare, dovendo distinguere tra il caso in cui si impiega l'IFOV e quello in cui si impiega il MIFOV.

All'atto pratico della realizzazione dell'analisi, la distanza di volo dall'edificio studiato che va applicata è R_r , valutata tramite il MIFOV, così che le immagini che si ottengono siano effettivamente accurate. Tale distanza R_r indica la massima distanza a cui può essere acquisita un'immagine, data una certa termocamera con certe specifiche, affinché sia possibile rilevare il livello di dettaglio geometrico richiesto. Andare oltre tale distanza R_r significherebbe avere un livello di dettaglio inferiore a quello ricercato, in quanto la risoluzione della termocamera non sarebbe in grado di garantire una misura tanto accurata quanto richiesto dall'operatore. Un allontanamento dall'oggetto oltre R_r va quindi evitato, compatibilmente con lo scenario in cui si svolge l'operazione; un avvicinamento all'oggetto dell'analisi, quindi una riduzione della distanza R_r , è invece possibile. In questo caso il livello di dettaglio geometrico che si riesce ad apprezzare migliora, il che significa che è possibile apprezzare particolari geometrici più piccoli.

Anche in caso di una riduzione della distanza R_r dall'oggetto osservato è necessario considerare le limitazioni imposte dallo scenario in cui si fa volare il drone, in relazione alle norme di volo, che regolano il comportamento che l'operatore deve osservare al fine di riuscire a svolgere l'attività in sicurezza.

Di seguito vengono mostrati i risultati ottenuti dai calcoli svolti relativamente alle termocamere in dotazione del Dipartimento. Le specifiche tecniche dei dispositivi sono già state mostrate nei paragrafi 1.4.1 e 0 e non verranno ripetute. I calcoli sono stati svolti considerando di voler cogliere sulla superficie osservata un dettaglio geometrico di 1x1 cm, quindi di avere una risoluzione geometrica di 1 cm.

- *FLIR A655sc 15°*

$$R = \frac{A}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{IFOV}{2}} = \frac{0.01 \text{ m}}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{0.00041}{2}} = 24.39 \text{ m}$$

$$L_x = 2R \tan \frac{FOV_x}{2} = 2 \times 24.39 \text{ m} \times \tan \frac{0.2618}{2} = 6.42 \text{ m}$$

$$L_y = 2R \tan \frac{FOV_y}{2} = 2 \times 24.39 \text{ m} \times \tan \frac{0.191986}{2} = 4.8 \text{ m}$$

$$\theta_{PAS_x} = \frac{p_x}{fl} = \frac{0.017}{41.3} = 0.00041 \text{ rad}$$

$$MIFOV_x = 3 \times \theta_{PAS_x} = 3 \times 0.00041 = 0.00123 \text{ rad}$$

$$R_r = \frac{A}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{MIFOV_x}{2}} = \frac{0.01 \text{ m}}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{0.00123}{2}} = 8.13 \text{ m}$$

$$L_{x,r} = 2R_r \tan \frac{FOV_x}{2} = 2 \times 8.13 \text{ m} \times \tan \frac{0.2618}{2} = 2.14 \text{ m}$$

$$L_{y,r} = 2R_r \tan \frac{FOV_y}{2} = 2 \times 8.13 \text{ m} \times \tan \frac{0.191986}{2} = 1.6 \text{ m}$$

- *FLIR A655sc 25°*

$$R = \frac{A}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{IFOV}{2}} = \frac{0.01 \text{ m}}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{0.00068}{2}} = 14.7 \text{ m}$$

$$L_x = 2R \tan \frac{FOV_x}{2} = 2 \times 14.7 \text{ m} \times \tan \frac{0.436332}{2} = 6.5 \text{ m}$$

$$L_y = 2R \tan \frac{FOV_y}{2} = 2 \times 14.7 \text{ m} \times \tan \frac{0.331612}{2} = 4.92 \text{ m}$$

$$\theta_{PAS_x} = \frac{p_x}{fl} = \frac{0.017}{24.6} = 0.00069 \text{ rad}$$

$$MIFOV_x = 3 \times \theta_{PAS_x} = 3 \times 0.00069 = 0.00207 \text{ rad}$$

$$R_r = \frac{A}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{MIFOV_x}{2}} = \frac{0.01 \text{ m}}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{0.00207}{2}} = 4.83 \text{ m}$$

$$L_{x,r} = 2R_r \tan \frac{FOV_x}{2} = 2 \times 4.83 \text{ m} \times \tan \frac{0.436332}{2} = 2.14 \text{ m}$$

$$L_{y,r} = 2R_r \tan \frac{FOV_y}{2} = 2 \times 4.83 \text{ m} \times \tan \frac{0.331612}{2} = 1.61 \text{ m}$$

- **OPTRIS PI400**

$$IFOV = \frac{FOV_x}{NPixel_x} \times \frac{\pi}{180^\circ} \times 1000 = \frac{29^\circ}{382} \times \frac{\pi}{180^\circ} \times 1000 = 1.324988$$

$$R = \frac{A}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{IFOV}{2}} = \frac{0.01 \text{ m}}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{0.001324988}{2}} = 7.547 \text{ m}$$

$$L_x = 2R \tan \frac{FOV_x}{2} = 2 \times 7.547 \text{ m} \times \tan \frac{0.506145}{2} = 3.9 \text{ m}$$

$$L_y = 2R \tan \frac{FOV_y}{2} = 2 \times 7.547 \text{ m} \times \tan \frac{0.383974}{2} = 2.93 \text{ m}$$

$$\theta_{PAS_x} = \frac{p_x}{fl} = \frac{0.025}{18.7} = 0.0013368984 \text{ rad}$$

$$MIFOV_x = 3 \times \theta_{PAS_x} = 3 \times 0.0013368984 = 0.0040107 \text{ rad}$$

$$R_r = \frac{A}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{MIFOV_x}{2}} = \frac{0.01 \text{ m}}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{0.0040107}{2}} = 2.49 \text{ m}$$

$$L_{x,r} = 2R_r \tan \frac{FOV_x}{2} = 2 \times 2.49 \text{ m} \times \tan \frac{0.506145}{2} = 1.289 \text{ m}$$

$$L_{y,r} = 2R_r \tan \frac{FOV_y}{2} = 2 \times 2.49 \text{ m} \times \tan \frac{0.383974}{2} = 0.968 \text{ m}$$

I valori ottenuti sono stati confrontati con quelli forniti dai calcolatori che le aziende produttrici delle termocamere, in questo caso *FLIR* e *OPTRIS*, hanno messo a disposizione online. Tale confronto ha mostrato la correttezza dei risultati qui ottenuti.

2.3 Linee guida per l'acquisizione di immagini nel visibile

Il sistema di acquisizione delle immagini, descritto nel paragrafo *Tecnologia impiegata*, vincola tra loro termocamera e fotocamera. Queste macchine sono caratterizzate da prestazioni molto diverse in termini di risoluzione e qualità dell'immagine. Il vincolo tra le due costringe ad adattare il processo di cattura delle immagini al dispositivo più svantaggiato, che in questo caso è la termocamera, la quale introduce limitazioni soprattutto in termini di risoluzione geometrica, che è notevolmente inferiore a quella della fotocamera.

L'interesse nel massimizzare le prestazioni della termocamera sta nel fatto che il dato termico è quello sul quale si basa l'analisi dell'involucro degli edifici e la realizzazione della pelle termica. Il dato in funzione del quale valutare le disposizioni per l'acquisizione delle immagini è, quindi, il livello di dettaglio geometrico che si ritiene necessario ottenere dalla termografia. La grandezza reale dell'oggetto più piccolo misurabile viene posta pari a 1x1 cm e sulla base di questo dato viene valutata la distanza massima dall'edificio a cui la termocamera può catturare l'immagine per poter garantire il livello di dettaglio geometrico richiesto. Tale calcolo è stato trattato nel paragrafo *Linee guida per l'analisi termografica di edifici* ed è stato realizzato per ciascuna delle termocamere in dotazione del Dipartimento sulla base delle loro specifiche tecniche e delle relazioni che determinano i parametri geometrici delle ottiche. La soluzione del calcolo effettuato ha portato, per ciascuna termocamera, alla definizione di due valori, uno teorico, R , e uno reale, R_r , corrispondenti alla massima distanza dall'edificio a cui si possono acquisire i termogrammi per poter ottenere il livello di dettaglio richiesto.

In base al modo in cui è stato realizzato il sistema di acquisizione dell'immagine, tale distanza dall'edificio è quella a cui anche la fotocamera lavora ed è la stessa a cui il drone deve volare.

Il dover imporre al sistema di acquisizione il vincolo in termini di distanza dall'edificio, non limita le prestazioni delle fotocamere, le quali sono caratterizzate da risoluzione elevatissima e dalla possibilità di utilizzare obiettivi. Questi permettono alle fotocamere

di inquadrare scene di dimensioni variabili, a parità di distanza dal soggetto, consentendo la variazione della lunghezza focale. Ciò non può essere realizzato con le termocamere, le quali, avendo lunghezza focale fissa, a parità di distanza dal soggetto non sono in grado di variare le dimensioni della scena osservata. La termocamera risulta essere il componente più svantaggiato, anche dal punto di vista della dimensione della scena ripresa e costituirà, quindi, il riferimento per la realizzazione delle operazioni di post processamento delle immagini.

Le operazioni di post processamento delle immagini sono finalizzate a far sì che le dimensioni della scena inquadrata dalla termocamera siano uguali a quelle della scena inquadrata dalla fotocamera. Ciò si ottiene con un processo di ritaglio delle immagini nel visibile che permetta di ottenere una corrispondenza precisa tra le dimensioni delle scene inquadrate e quindi tra le dimensioni delle immagini nel visibile e nell'infrarosso. La fase di ritaglio è necessaria in quanto, avendo le termocamere e le fotocamere rapporti di visualizzazione diversi, non è possibile osservare scene con entrambe le dimensioni di uguale valore solamente impostando la lunghezza focale nell'obiettivo delle fotocamere. In particolare, si ha:

- termocamere *FLIR A655sc 15°*, *FLIR A655sc 25°*, *OPTRIS PI400*: rapporto di visualizzazione = 4:3;
- fotocamere *SONY α7R III*, *SONY α6000*: rapporto di visualizzazione = 3:2.

Si sceglie di ritagliare le immagini nel visibile, perché non sono queste a contenere il dato termografico, che è quello che conta ai fini della realizzazione della pelle termica.

Prima del ritaglio delle immagini, però, le dimensioni della scena inquadrata dalle fotocamere possono essere avvicinate a quelle della scena inquadrata dalle termocamere impostando l'opportuna lunghezza focale negli obiettivi delle fotocamere. Questa considerazione va fatta prima di compiere il volo con l'APR, in modo che la missione sia compiuta con la corretta impostazione dei parametri sulla fotocamera. Il calcolo della lunghezza focale da impostare per avvicinare maggiormente le dimensioni delle scene osservate da termocamera e da fotocamera viene realizzato considerando che la distanza dall'edificio a cui termocamera e fotocamera lavorano è la stessa. Ciò si deve al fatto che sono vincolate come nel sistema di acquisizione precedentemente

descritto. Le relazioni geometriche impiegate sono quelle caratteristiche delle ottiche, che sono già state mostrate nel paragrafo *Linee guida per l'analisi termografica di edifici*.

Di seguito vengono mostrati i calcoli elaborati per i dispositivi in dotazione al Dipartimento, per ciascun accoppiamento termocamera-fotocamera realizzato, considerando come distanza dall'edificio a cui catturare le immagini solamente quella reale R_r , già calcolata per ciascuna termocamera:

- termocamera *FLIR A655sc 15°* - *SONY α7R III* con obiettivo *SONY FE 24-105 MM F4 G OSS*;

$$R_r = 8,13 \text{ m}$$

Con la massima lunghezza focale ottenibile con l'obiettivo impiegato, pari a 105 mm, la scena osservata con la fotocamera avrà le seguenti dimensioni:

$$FOV_{x,fotocamera} = 2 \tan^{-1} \frac{l_x}{2fl} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{35.9 \text{ mm}}{2 \times 105 \text{ mm}} = 0.3386 [\text{rad}]$$

$$FOV_{y,fotocamera} = 2 \tan^{-1} \frac{l_y}{2fl} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{24 \text{ mm}}{2 \times 105 \text{ mm}} = 0.2276 [\text{rad}]$$

$$L_{x,fotocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_{x,fotocamera}}{2} = 2 \times 8.13 \times \tan \frac{0.3386}{2} = 2.77 \text{ m}$$

$$L_{y,fotocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_{y,fotocamera}}{2} = 2 \times 8.13 \times \tan \frac{0.2276}{2} = 1.858 \text{ m}$$

$$L_{x,r,termocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_x}{2} = 2 \times 8.13 \times \tan \frac{0.2618}{2} = 2.14 \text{ m}$$

$$L_{y,r,termocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_y}{2} = 2 \times 8.13 \times \tan \frac{0.191986}{2} = 1.567 \text{ m}$$

Confrontando i risultati ottenuti dalla fotocamera con quelli forniti dalla termocamera, è evidente come la scena inquadrata dalla fotocamera sia più grande, sia nella dimensione x che y , di quella inquadrata dalla termocamera; poiché i due dispositivi sono vincolati a catturare le immagini dalla stessa distanza R_r dall'edificio e poiché il valore di lunghezza focale $fl = 105 \text{ mm}$ è il massimo raggiungibile con l'obiettivo in dotazione, con l'accoppiamento di queste camere si avrà sempre, in ogni situazione, una scena nel visibile di dimensioni maggiori rispetto a quelle della corrispondente scena nell'infrarosso.

Il maggior avvicinamento tra i valori delle dimensioni delle due scene osservate si ottiene imponendo all'obiettivo della fotocamera la massima lunghezza focale possibile.

- termocamera *FLIR A655sc 25°* - *SONY α7R III* con obiettivo *SONY FE 24-105 MM F4 G OSS*;

$$R_r = 4.83 \text{ m}$$

Con la massima lunghezza focale ottenibile con l'obiettivo impiegato, pari a 105 mm, la scena osservata con la fotocamera avrà le seguenti dimensioni:

$$FOV_{x,fotocamera} = 2 \tan^{-1} \frac{l_x}{2fl} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{35.9 \text{ mm}}{2 \times 105 \text{ mm}} = 0.3386 [\text{rad}]$$

$$FOV_{y,fotocamera} = 2 \tan^{-1} \frac{l_y}{2fl} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{24 \text{ mm}}{2 \times 105 \text{ mm}} = 0.2276 [\text{rad}]$$

$$L_{x,fotocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_{x,fotocamera}}{2} = 2 \times 4.83 \times \tan \frac{0.3386}{2} = 1.6514 \text{ m}$$

$$L_{y,fotocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_{y,fotocamera}}{2} = 2 \times 4.83 \times \tan \frac{0.2276}{2} = 1.104 \text{ m}$$

$$L_{x,r,termocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_x}{2} = 2 \times 4.83 \times \tan \frac{0.436332}{2} = 2.14 \text{ m}$$

$$L_{y,r,termocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_y}{2} = 2 \times 4.83 \times \tan \frac{0.331612}{2} = 1.6165 \text{ m}$$

Confrontando i risultati ottenuti, vediamo come la scena inquadrata dalla fotocamera sia più piccola, sia in x che in y , di quella inquadrata dalla termocamera. Questa situazione si è ottenuta avendo impostato la massima lunghezza focale raggiungibile con l'obiettivo: $fl = 105 \text{ mm}$. Riducendo il valore della lunghezza focale, la scena osservata dalla fotocamera diventa più ampia ed è quindi possibile avvicinare le dimensioni della scena vista dalla fotocamera a quelle della scena vista dalla termocamera. Tenendo in considerazione i diversi rapporti di visualizzazione delle due camere, la condizione ottimale che si può raggiungere variando la lunghezza focale è quella in cui scena nel visibile e corrispondente scena nell'infrarosso si trovino ad avere una delle due dimensioni di pari valore. Poiché la termocamera ha lunghezza focale costante, quindi dimensioni della scena inquadrata costanti a parità di distanza dall'oggetto

osservato, sono queste ultime che vengono imposte come dimensioni di riferimento cui la fotocamera può adeguarsi variando la lunghezza focale dell'obiettivo.

Ponendo $L_{y,r,termocamera} = 1.6165 \text{ m}$ come riferimento, la lunghezza focale che permette alla fotocamera di osservare una scena con dimensione y di pari valore è:

$$FOV_{y,fotocamera} = 2 \tan^{-1} \frac{L_y}{2R_r} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{1.6165 \text{ m}}{2 \times 4.83 \text{ m}} = 0.331612 [\text{rad}]$$

$$fl = \frac{l_{y,fotocamera}}{2 \tan \frac{FOV_{y,fotocamera}}{2}} = \frac{24 \text{ mm}}{2 \tan \frac{0.331612}{2}} = 71.709 \text{ mm}$$

Con questa lunghezza focale avremmo:

$$FOV_{x,fotocamera} = 2 \tan^{-1} \frac{l_x}{2fl} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{35.9 \text{ mm}}{2 \times 71.709 \text{ mm}} = 0.49055 [\text{rad}]$$

$$L_{x,fotocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_{x,fotocamera}}{2} = 2 \times 4.83 \times \tan \frac{0.49055}{2} = 2.418 \text{ m}$$

Vediamo come la $L_{x,fotocamera}$ che si ottiene con una $fl = 71.709 \text{ mm}$ sia maggiore della $L_{x,r,termocamera}$.

Ponendo $L_{x,r,termocamera} = 2.14 \text{ m}$ come riferimento, la lunghezza focale che permette alla fotocamera di osservare una scena con dimensione x di pari valore è:

$$FOV_{x,fotocamera} = 2 \tan^{-1} \frac{L_x}{2R_r} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{2.14 \text{ m}}{2 \times 4.83 \text{ m}} = 0.436 [\text{rad}]$$

$$fl = \frac{l_{x,fotocamera}}{2 \tan \frac{FOV_{x,fotocamera}}{2}} = \frac{35.9 \text{ mm}}{2 \tan \frac{0.436}{2}} = 81 \text{ mm}$$

Con questa lunghezza focale avremmo:

$$FOV_{y,fotocamera} = 2 \tan^{-1} \frac{l_y}{2fl} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{24 \text{ mm}}{2 \times 81 \text{ mm}} = 0.2942 [\text{rad}]$$

$$L_{y,fotocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_{y,fotocamera}}{2} = 2 \times 4.83 \times \tan \frac{0.2942}{2} = 1.43 \text{ m}$$

Vediamo come la $L_{y,fotocamera}$ che si ottiene con una $fl = 81 \text{ mm}$ sia minore della $L_{y,r,termocamera}$.

- termocamera *OPTRIS PI400 - SONY α6000* con obiettivo *SONY E PZ 18-105 MM F4 G OSS*;

$$R_r = 2.49 \text{ m}$$

Con la massima lunghezza focale ottenibile con l'obiettivo impiegato, pari a 157.5 mm, la scena osservata con la fotocamera avrà le seguenti dimensioni:

$$FOV_{x,fotocam} = 2 \tan^{-1} \frac{l_x}{2fl} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{23.5 \text{ mm}}{2 \times 157.5 \text{ mm}} = 0.14893 [\text{rad}]$$

$$FOV_{y,fotocam} = 2 \tan^{-1} \frac{l_y}{2fl} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{15.6 \text{ mm}}{2 \times 157.5 \text{ mm}} = 0.09897 [\text{rad}]$$

$$L_{x,fotocam} = 2R_r \tan \frac{FOV_{x,fotocamera}}{2} = 2 \times 2.49 \times \tan \frac{0.14893}{2} = 0.3715 \text{ m}$$

$$L_{y,fotocam} = 2R_r \tan \frac{FOV_{y,fotocamera}}{2} = 2 \times 2.49 \times \tan \frac{0.09897}{2} = 0.2466 \text{ m}$$

$$L_{x,r,termocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_x}{2} = 2 \times 2.49 \text{ m} \times \tan \frac{0.506145}{2} = 1.289 \text{ m}$$

$$L_{y,r,termocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_y}{2} = 2 \times 2.49 \text{ m} \times \tan \frac{0.383974}{2} = 0.968 \text{ m}$$

Confrontando i risultati ottenuti, vediamo come la scena inquadrata dalla fotocamera sia più piccola, sia in x che in y , di quella inquadrata dalla termocamera. Questa situazione si è ottenuta avendo imposto la massima lunghezza focale raggiungibile con l'obiettivo: $fl = 157.5 \text{ mm}$. Riducendo il valore della lunghezza focale, la scena osservata diventa più ampia ed è quindi possibile avvicinare le dimensioni della scena vista dalla fotocamera a quelle della scena vista dalla termocamera. Tenendo in considerazione i diversi rapporti di visualizzazione delle due camere, la condizione ottimale che si può raggiungere variando la lunghezza focale è quella in cui scena nel visibile e corrispondente scena nell'infrarosso si trovino ad avere una delle due dimensioni di pari valore. Poiché la termocamera ha lunghezza focale costante, quindi dimensioni della scena inquadrata costanti, sono queste ultime che vengono

imposte come dimensioni di riferimento cui la fotocamera può adeguarsi variando la lunghezza focale dell'obiettivo.

Ponendo $L_{y,r,termocamera} = 0.968 \text{ m}$ come riferimento, la lunghezza focale che permette alla fotocamera di osservare una scena con dimensione y di pari valore è:

$$FOV_{y,fotocamera} = 2 \tan^{-1} \frac{L_y}{2R_r} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{0.968 \text{ m}}{2 \times 2.49 \text{ m}} = 0.38397 [\text{rad}]$$

$$fl = \frac{l_{y,fotocamera}}{2 \tan \frac{FOV_{y,fotocamera}}{2}} = \frac{15.6 \text{ mm}}{2 \tan \frac{0.38397}{2}} = 40.13 \text{ mm}$$

Con questa lunghezza focale avremmo:

$$FOV_{x,fotocam} = 2 \tan^{-1} \frac{l_x}{2fl} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{23.5 \text{ mm}}{2 \times 40.21 \text{ mm}} = 0.5686 [\text{rad}]$$

$$L_{x,fotocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_{x,fotocamera}}{2} = 2 \times 2.49 \times \tan \frac{0.5686}{2} = 1.455 \text{ m}$$

Vediamo come la $L_{x,fotocamera}$ che si ottiene con una $fl = 40.13 \text{ mm}$ sia maggiore della $L_{x,r,termocamera}$.

Ponendo $L_{x,r,termocamera} = 1.289 \text{ m}$ come riferimento, la lunghezza focale che permette alla fotocamera di osservare una scena con dimensione x di pari valore è:

$$FOV_{x,fotocamera} = 2 \tan^{-1} \frac{L_x}{2R_r} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{1.289 \text{ m}}{2 \times 2.49 \text{ m}} = 0.506 [\text{rad}]$$

$$fl = \frac{l_{x,fotocamera}}{2 \tan \frac{FOV_{x,fotocamera}}{2}} = \frac{23.5 \text{ mm}}{2 \tan \frac{0.506}{2}} = 45.45 \text{ mm}$$

Con questa lunghezza focale avremmo:

$$FOV_{y,fotocamera} = 2 \tan^{-1} \frac{l_y}{2fl} [\text{rad}] = 2 \tan^{-1} \frac{15.6 \text{ mm}}{2 \times 45.45 \text{ mm}} = 0.34 [\text{rad}]$$

$$L_{y,fotocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_{y,fotocamera}}{2} = 2 \times 2.49 \times \tan \frac{0.34}{2} = 0.85 \text{ m}$$

Vediamo come la $L_{y,fotocamera}$ che si ottiene con una $fl = 45.45 \text{ mm}$ sia minore della $L_{y,r,termocamera}$.

Tali calcoli hanno permesso, per i tre possibili sistemi di acquisizione delle immagini, di definire la lunghezza focale che la fotocamera deve avere per far sì che le dimensioni della scena da essa inquadrata siano quanto più vicine possibile a quelle della scena inquadrata dalla termocamera. Alla luce dei risultati ottenuti, queste sono le considerazioni che ne derivano:

- per l'accoppiamento termocamera *FLIR A655sc 15°* - *SONY α7R III* con obiettivo *SONY FE 24-105 MM F4 G OSS*, imponendo la massima lunghezza focale raggiungibile dall'obiettivo, la scena inquadrata dalla fotocamera risulta più ampia, in entrambe le dimensioni, di quella inquadrata dalla termocamera. Quindi le dimensioni delle due scene si possono avvicinare in valore, ma non arriveremo mai ad averne una uguale per entrambe le scene; il ritaglio dell'immagine nel visibile coinvolgerà quindi entrambe le dimensioni x e y. La lunghezza focale da impostare nella fotocamera è quindi pari a: $fl = 105 \text{ mm}$.
- per l'accoppiamento termocamera *FLIR A655sc 25°* - *SONY α7R III* con obiettivo *SONY FE 24-105 MM F4 G OSS*, è possibile impostare una lunghezza focale della fotocamera per far sì che le scene inquadrature abbiano una delle due dimensioni di pari valore. Si è scelto di porre la dimensione y della scena inquadrata dalla termocamera come dimensione da far corrispondere. In questo modo, la dimensione x nell'immagine nel visibile risulta maggiore della dimensione x dell'immagine nell'infrarosso. Il motivo di questa scelta risiede nel fatto che a dover essere ritagliata per far poi corrispondere esattamente le dimensioni delle due immagini sia l'immagine nel visibile. Poiché è la termocamera a fornire il dato necessario per l'analisi termica dell'edificio, si sceglie di non intervenire sulle immagini infrarosse, ma di modificare quelle nel visibile. La lunghezza focale da impostare nella fotocamera è quindi pari a: $fl = 71.709 \text{ mm}$.
- per l'accoppiamento termocamera *OPTRIS PI400* - *SONY α6000* con obiettivo *SONY E PZ 18-105 MM F4 G OSS* vanno fatte le stesse considerazioni valide per l'accoppiamento *FLIR A655sc 25°* - *SONY α7R III*, in quanto è possibile impostare una lunghezza focale nella fotocamera che consenta di inquadrare una scena con la

dimensione y di pari valore di quella della scena nell'immagine termica. La lunghezza focale da impostare nella fotocamera è quindi pari a: $fl = 40.13 \text{ mm}$.

Le lunghezze focali definite sono state valutate, a seconda dell'accoppiamento termocamera-fotocamera considerato, in funzione di una certa distanza di acquisizione dell'immagine dal soggetto osservato. Tale distanza, a sua volta, è stata definita in base al grado di dettaglio termico ricercato. Se però la distanza da cui vengono acquisite le immagini cambiasse, la lunghezza focale della fotocamera che va impostata rimane costante e pari a quelle calcolate, a parità di accoppiamento termocamera-fotocamera, in quanto le caratteristiche geometriche delle ottiche, che definiscono le dimensioni delle scene osservate, non cambiano, ma cambia solo la distanza da cui le immagini vengono acquisite. Ovviamente le dimensioni della scena osservata cambieranno in termini assoluti, ma non in termini relativi tra scena inquadrata dalla termocamera e quella inquadrata dalla fotocamera.

3 Analisi termica dell'involucro di edifici

L'argomento motore della attività di studio è la definizione di una metodologia per l'analisi termica dell'involucro di edifici. L'obiettivo finale è quello di realizzare una pelle termica 3D dell'edificio oggetto d'esame. Tale pelle termica, elaborata sfruttando la termografia infrarossa, rappresenta lo stato dell'involucro edilizio dal punto di vista termico e ne caratterizza le prestazioni energetiche in termini di flusso termico attraverso l'involucro stesso.

Conducendo indagini termografiche intervallate nel tempo, realizzando per ogni indagine una pelle termica 3D e confrontando tra loro le pelli termiche risultanti da ciascuna indagine, è possibile vedere se e come è cambiata nel tempo la pelle termica originaria e studiare, così, l'evoluzione dello stato dell'involucro edilizio. Se dopo un certo periodo di tempo la pelle termica, e quindi l'involucro edilizio, risulta variata rispetto alla prima indagine, le differenze che si riscontrano sono da imputare alla manifestazione di difetti all'interno dell'involucro stesso. Tali difetti inficiano le prestazioni in termini di dispersioni termiche e sono quindi causa di inefficienza energetica. Nel momento in cui, dopo un certo numero di anni, si riscontrano difetti, è necessario intervenire per correggerli e ripristinare così le prestazioni energetiche originarie dell'involucro edilizio.

Questa metodologia, che nasce dalla sinergia tra il settore degli UAVs, quello della termografia infrarossa e quello della fotogrammetria aerea, si inserisce perfettamente nell'ambito del processo di efficientamento energetico degli edifici intrapreso in questi ultimi anni. Questo processo è un punto cardine della strategia energetica che molti paesi, compresa l'Italia, stanno applicando al fine di contrastare la crisi climatica in corso. In quest'ottica, il meccanismo di incentivazione promosso dallo Stato ha dato una spinta decisa alla realizzazione di interventi. L'intervento che maggiormente viene realizzato al fine di incrementare le prestazioni energetiche degli edifici è l'isolamento delle pareti perimetrali mediante cappotto termico.

Il metodo di indagine che sfrutta la realizzazione della pelle termica 3D consente di valutare lo stato dell'involucro edilizio nel corso del tempo e di verificare l'andamento

delle prestazioni nel tempo dopo interventi di ristrutturazione, come, per esempio, l'installazione del cappotto termico. In questo modo si può evitare di intervenire in maniera distruttiva, risparmiando in termini economici ed evitando danni alla struttura.

Entriamo ora nel dettaglio dell'analisi termica.

L'indagine sull'edificio viene compiuta impiegando la termografia infrarossa. Le immagini termografiche indicano un dato in temperatura, che la termocamera fornisce elaborando la radiazione elettromagnetica nello spettro dell'infrarosso che incide sul suo sensore. Per la realizzazione della pelle termica si è deciso, però, di impiegare immagini che riportino non più il valore di temperatura elaborato dalla camera, ma il valore di un parametro adimensionale, definito appositamente per tale applicazione, indicato come:

$$\beta = \frac{Q_{rif} - Q_i}{K \cdot (T_i - T_{atm})}$$

Le immagini fornite dalla termocamera vengono, quindi, elaborate in modo tale che il dato che ciascun pixel riporta non sia più un valore di temperatura, ma sia un valore di β , così che la pelle termica che si realizza risulti essere una mappa di valori di β . Tale scelta è dettata dalla necessità di eliminare dalle immagini termiche gli errori e le incertezze che la pratica termografica inevitabilmente introduce, in modo tale da poter associare in maniera univoca le variazioni del fattore β al manifestarsi di un difetto all'interno dell'involucro edilizio.

3.1 Fonti di incertezza nella termografia infrarossa

La termografia infrarossa è caratterizzata da diverse fonti di incertezza che inducono in errori di misurazione, con conseguente possibilità di mal interpretare i dati a disposizione.

Una prima fonte di incertezza è legata al processo interno che la termocamera realizza per convertire in temperatura la radiazione elettromagnetica infrarossa che incide sul sensore. La radiazione che incide sul sensore è la somma di diversi contributi, che sono:

- la radiazione emessa dalla superficie osservata, in virtù del fatto che si trova ad una determinata temperatura ed è caratterizzata da una certa emissività. Quest'ultima è nota una volta noto il materiale della superficie;
- la radiazione riflessa dalla superficie osservata. L'ambiente che circonda l'oggetto osservato viene considerato come un corpo nero che si trova ad una certa temperatura T_{refl} ; tale corpo nero assorbe tutte le radiazioni che gli arrivano, ed emette a sua volta una radiazione. Questa radiazione, nel momento che va ad incidere sulla superficie osservata, in parte viene assorbita dalla superficie stessa e contribuisce ad innalzarne la temperatura, ma in parte viene riflessa. Non si ha trasmissione, in quanto la superficie è considerata un corpo opaco. La componente di radiazione riflessa costituisce uno dei contributi rilevati dalla termocamera. Quindi, dalla superficie che osservo arrivano due contributi sulla termocamera: uno è l'intensità della radiazione emessa dalla superficie e l'altro è l'intensità della radiazione riflessa dalla superficie, la quale necessita di conoscere T_{refl} per essere quantificata. La T_{refl} viene solitamente presa pari alla temperatura ambiente, se intorno all'oggetto osservato non sono presenti fonti di calore importanti; se, invece, si hanno elementi a temperatura elevata nelle vicinanze, T_{refl} va stimata. I due contributi di radiazione arrivano attenuati sulla termocamera, in quanto una quota parte ne viene assorbita dallo strato di atmosfera presente tra oggetto e termocamera; a tal proposito è necessario conoscere il coefficiente di trasmissione dell'atmosfera $\tau_{atm}(d, U.R.)$, che è funzione della distanza tra oggetto e termocamera, d , e dell'umidità relativa, $U.R.$.

Nella pratica, la componente riflessa può essere trascurata. Infatti, l'involucro edilizio è un corpo opaco, quindi ha coefficiente di trasmissione nullo; inoltre, per la legge di Kirchhoff si ha $\varepsilon_{obj} = \alpha_{obj}$, dove:

ε_{obj} = emissività dell'oggetto osservato

α_{obj} = coefficiente di assorbimento dell'oggetto osservato;

quindi vale la:

$$\rho_{obj} = 1 - \alpha_{obj} = 1 - \varepsilon_{obj}$$

dove ρ_{obj} = coefficiente di riflessione dell'oggetto osservato; poiché i materiali edili hanno generalmente emissività molto elevata, il coefficiente di riflessione è molto piccolo, e quindi la componente di radiazione riflessa dalla superficie può essere trascurata.

Nella pratica, a poter essere trascurato è anche l'assorbimento della atmosfera, in quanto la distanza tra oggetto osservato e termocamera, nella analisi termica di edifici, è contenuta: siamo nell'ordine di metri o, al limite, decine di metri;

- la radiazione emessa dall'atmosfera; l'atmosfera è caratterizzata da una propria emissività ed una propria temperatura; quindi, emette anch'essa una radiazione che viene intercettata dalla termocamera e contribuisce alla radiazione complessiva rilevata dal sensore. Per determinare questo contributo è necessario conoscere la T_{atm} e l'emissività dell'atmosfera, ε_{atm} . Poiché per le lunghezze d'onda di nostro interesse l'atmosfera ha coefficiente di riflessione ρ_{atm} nullo, perché o trasmette la radiazione o la assorbe, dalla legge di Kirchhoff avremo: $\varepsilon_{atm} = \alpha_{atm}$, e quindi $\varepsilon_{atm} = \alpha_{atm} = 1 - \tau_{atm}$.

La situazione è quindi la seguente:

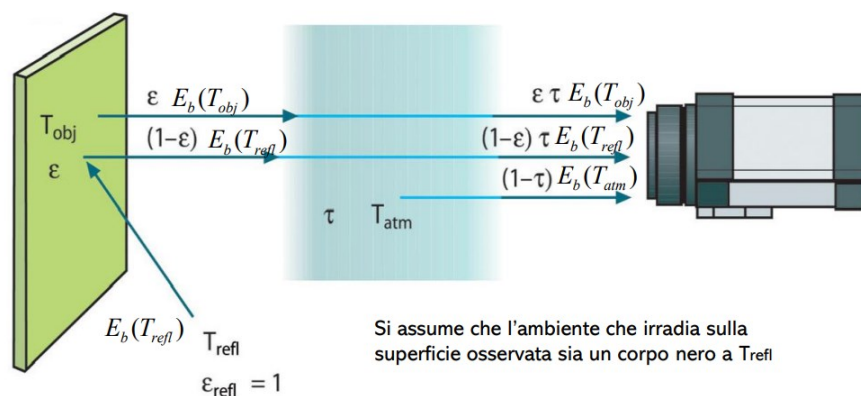


Figura 3-1: radiazioni incidenti sulla termocamera

Ciò che noi vorremmo conoscere con la termografia è la T_{obj} , ma non è ciò che misuriamo. Quello che noi misuriamo è la somma dei tre contributi di radiazione che arrivano sulla macchina termografica. La termocamera, nel convertire la radiazione rilevata dal sensore in dato di temperatura si porta dietro una incertezza, legata alla conoscenza dei parametri che caratterizzano ciascun contributo di radiazione. Tale incertezza porta la termografia a compiere un errore che mediamente è intorno a 1°C, 1.5°C. Per eliminare questa incertezza, o almeno attenuarla, è necessario fare riferimento a valori relativi di temperatura e non assoluti. Infatti, andando a misurare la differenza di temperatura tra due punti, nella differenza posso eliminare gli errori, così come posso eliminare alcune incertezze, in modo tale da arrivare realisticamente a fare una misura con una precisione che potrebbe raggiungere, in casi eccezionali, i centesimi di grado.

Un secondo elemento che introduce errori nella pratica termografica è legato ad aspetti geometrici. La termografia infrarossa fornisce immagini 2D e la termocamera non è in grado di percepire la profondità; quindi, il sensore vede tutte le superfici come se fossero disposte su un piano parallelo al piano del sensore stesso. Nella realtà però le superfici inquadrare possono risultare inclinate rispetto alla termocamera, come nel caso in cui si inquadri uno spigolo, o possono avere forme variabili, come cilindriche o sferiche. In tutti questi casi, il sensore riceve solo una parte della radiazione che tali superfici emettono, quindi, nell'immagine che ne risulta, queste superfici vengono mostrate più fredde, caratterizzate da una temperatura più bassa, rispetto a come vengono mostrate, invece, le superfici che sono poste parallelamente al piano del sensore. Nella realtà, però, le superfici orientate di un certo angolo, o aventi geometria variabile, non sono più fredde e l'errore in cui incorre la termografia è dovuto al fatto che il sensore riceve meno radiazione a causa della inclinazione o della particolare forma che caratterizza queste superfici. Per correggere questo tipo di errore è necessario considerare il fattore di vista. Il fattore di vista $F_{i,j}$ è un parametro di efficienza che dipende solo da grandezze geometriche ed indica la frazione di radiazione che lascia la superficie i-esima ed incide sulla superficie j-esima. La relazione che definisce tale fattore è la seguente:

$$F_{i,j} = \frac{1}{A_i} \iint \frac{\cos\vartheta_i \cos\vartheta_j}{\pi R^2} \cdot dA_i \cdot dA_j = \frac{q_{i,j}}{q_{i,j,max}}$$

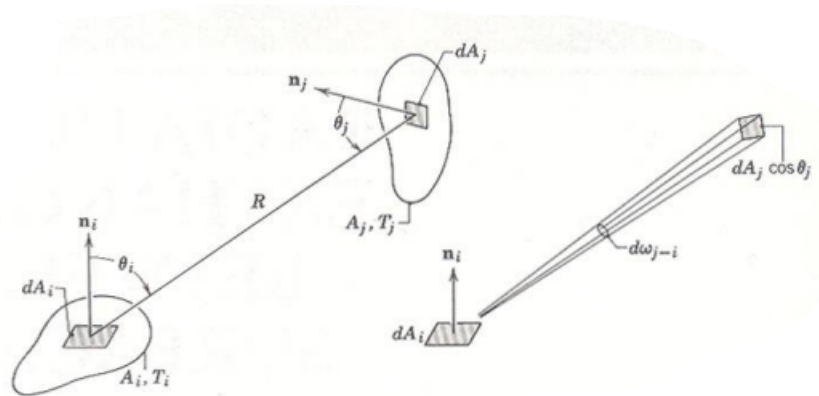


Figura 3-2: caratterizzazione geometriche di due superfici che irradiano

Il fattore di vista permette di valutare la quota parte di radiazione elettromagnetica infrarossa che lascia la superficie osservata ed incide sul sensore. Grazie a questa grandezza è possibile correggere le immagini termiche nell'infrarosso dall'errore legato alla geometria all'orientamento delle superfici rispetto alla termocamera e.

3.2 Fattore β

L'introduzione del fattore adimensionale β consente di eliminare le incertezze e gli errori che caratterizzano la rilevazione termografica. Riprendendone la definizione, andiamo a descrivere tale parametro.

$$\beta = \frac{Q_{rif} - Q_i}{K \cdot (T_i - T_{atm})}$$

dove:

- Q_{rif} = *potere emissivo di riferimento;*
- Q_i = *potere emissivo del pixel i – esimo;*
- K = *trasmittanza termica della parete;*
- T_i = *temperatura interna dell'edificio;*
- T_{atm} = *temperatura atmosferica.*

Il parametro β viene calcolato per ciascun pixel di ciascuna immagine termica che viene acquisita nella rilevazione. Al fine di ottenere un dato che sia relativo e non assoluto, in modo da poter eliminare gli errori che la termografia introduce con il meccanismo di conversione della radiazione in temperatura, a numeratore si ha una differenza tra due valori di potere emissivo. Tale differenza è tra il potere emissivo di riferimento e quello del pixel i-esimo.

La relazione con cui i singoli poteri emissivi vengono calcolati è la seguente:

$$Q = \frac{\varepsilon_{obj} \cdot \sigma \cdot T_{obj,i}^4 \cdot F_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2}}{F_{s,t}} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

dove:

- ε_{obj} = *emissività della superficie osservata;*
- $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$ = *costante di Stefan – Boltzmann;*
- T_{obj} = *temperatura della superficie osservata;*
- $F_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2}$ = *fattore di banda;*
- $F_{s,t}$ = *fattore di vista tra superficie osservata e termocamera.*

La scelta di introdurre il potere emissivo nella definizione del parametro β è frutto di diverse considerazioni. Come emerge dalla relazione sopra indicata, il potere emissivo viene calcolato tenendo conto del fattore di vista, il che significa poter epurare la rilevazione dall'errore introdotto dall'orientamento relativo tra termocamera e superficie. Inoltre, poiché le termocamere, a seconda della tipologia di sensore che montano, possono operare in diversi intervalli di lunghezze d'onda all'interno dello spettro dell'infrarosso, l'introduzione del fattore di banda $F_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2}$ consente di valutare questo aspetto, cioè permette di selezionare le radiazioni elettromagnetiche aventi lunghezze d'onda dell'intervallo in cui la termocamera opera.

Nella relazione di β , a denominatore si trova il seguente prodotto:

$$K \cdot (T_i - T_{atm}) \left[\frac{W}{m^2} \right].$$

Questo termine rappresenta il flusso termico totale attraverso l'involucro edilizio e rende adimensionale il parametro β in quanto è una potenza per unità di superficie. La presenza della temperatura atmosferica elimina l'influenza che tale grandezza ha sulla rilevazione. Infatti, se tra una rilevazione e la successiva si ha una variazione di T_{atm} , questa influisce sui valori del potere emissivo che si trovano a numeratore, ma poiché il termine T_{atm} è presente anche a denominatore, l'influenza viene eliminata, quindi, anche l'incertezza che ne deriva. Il valore della temperatura atmosferica ci viene fornito dal drone, in quanto rileva i parametri ambientali durante il volo.

La temperatura interna T_i è un parametro che viene impostato dall'operatore, in quanto può essere regolata. Va definita considerando che la differenza di temperatura tra ambiente interno ed ambiente esterno deve essere di almeno 15 K per far sì che i dati forniti dall'analisi siano attendibili e va poi mantenuta costante nelle rilevazioni successive in modo da riprodurre le stesse condizioni della prima indagine ed ottenere così dati confrontabili. È, quindi, importante che anche le condizioni ambientali esterne in cui si realizzano le indagini siano quanto più vicine possibile alle condizioni presenti nella prima rilevazione eseguita, così che l'analisi metta a confronto dati acquisiti in condizioni molto simili e quindi affidabili.

È poi presente la trasmittanza termica K della parete. Questa grandezza rimane costante per il calcolo del fattore β in ogni rilevazione e deve assumere il valore della trasmittanza

termica K di progetto della parete indagata. La trasmittanza termica di progetto può essere ritrovata nella documentazione relativa alla progettazione dell'edificio, o in quella che riporta l'eventuale realizzazione di un intervento sull'involucro, come l'applicazione del cappotto termico.

Il fattore β così valutato consente di eliminare le incertezze e gli errori che la pratica termografica introduce nella rilevazione.

3.3 Pelle termica

La realizzazione della pelle termica avviene nel modo di seguito descritto. Una volta compiuto il volo con l'APR, attenendosi alle linee guida descritte nel capitolo *Protocolli e linee guida*, e acquisite le immagini nell'infrarosso e nel visibile, si passa alla fase di post processamento. Considereremo qui solamente le immagini nell'infrarosso.

3.3.1 Elaborazione mediante il software della termocamera

Il primo passaggio da affrontare nel percorso verso la realizzazione della pelle termica è il post processamento delle immagini termiche. Questo viene realizzato tramite il software che le case produttrici di termocamere forniscono insieme al dispositivo. Tali software permettono la visualizzazione in tempo reale della scena inquadrata; quindi, consentono di interagire attivamente durante la fase di svolgimento dell'indagine, ma permettono anche di elaborare, in una fase successiva all'indagine, i dati acquisiti. Inserendo nel software, in maniera appropriata, i parametri richiesti è possibile tenere in considerazione e correggere alcuni aspetti che influenzano la termografia infrarossa, in modo tale da poter lavorare, in seguito, su immagini che rispecchino le condizioni in cui si è svolta l'indagine e che forniscano, quindi, dati affidabili. I parametri che è possibile inserire nel software sono:

- l'emissività della superficie osservata: permette di considerare quanto l'oggetto è in grado di emettere rispetto al riferimento ideale di corpo nero.

Generalmente i materiali edilizi da costruzione sono caratterizzati da valori di emissività molto elevati. Di seguito si riporta una tabella che elenca i valori di emissività dei materiali più comuni.

EMISSIVITÀ DI ALCUNI MATERIALI NELL'INFRAROSSO

Metals and Other Oxides	Emissivity	Nonmetallic Materials	Emissivity
Aluminum: Polished sheet	0.05	Brick: Red common	0.93
Sheet as received	0.09	Carbon: Candle soot	0.95
Anodized sheet, chromatic-acid process	0.55	Graphite, filed surface	0.98
Vacuum deposited	0.04	Concrete	0.92
Brass: highly polished	0.03	Glass: Polished plate	0.94
Rubbed with 80-grit emery	0.20	Lacquer: White	0.92
Oxidized	0.61	Matte black	0.97
Copper: Highly polished	0.02	Oil, lubricant (Thin film of Nickel base):	
Heavily oxidized	0.78	Nickel base alone	0.05
Gold: Highly polished	0.21	Oil film: 1, 2, 5 × 10 ⁻³ in	0.27, 0.46, 0.72
Iron: Cast polished	0.21	Thick coating	0.82
Cast, oxidized	0.64	Paint, oil: Average of 16 colors	0.94
Sheet, heavily rusted	0.69	Paper: White bond	0.93
Nickel: Electroplated, polished	0.05	Plaster: Rough coat	0.91
Electroplated, not polished	0.11	Sand	0.90
Oxidized	0.37	Human skin	0.98
Silver: polished	0.03	Soil: Dry	0.92
Stainless Steel: type 18-8 buffed	0.16	Saturated with water	0.95
Type 18-8, oxidized	0.85	Water: Distilled	0.96
Steel: Polished	0.07	Ice, smooth	0.96
Oxidized	0.79	Frost crystals	0.98
Tin: Commercial tin-plated sheet iron	0.07	Snow	0.90
		Wood: Planed oak	0.9

Tabella 3: emissività di alcuni materiali nell'infrarosso

- distanza tra la termocamera e l'oggetto di misura;
- parametri ambientali: temperatura dell'aria e umidità relativa, che insieme alla distanza tra termocamera e oggetto osservato permettono di tenere conto della quota parte di radiazione assorbita dall'atmosfera. I parametri ambientali vengono misurati dal drone durante il volo;
- parametri dell'ottica esterna: temperatura dell'ottica e coefficiente di trasmissione dell'ottica, che permettono di tenere conto della presenza di una eventuale ottica esterna interposta tra termocamera e oggetto di misura;
- reflected temperature: è la temperatura di ciò che si riflette sull'oggetto di misura; solitamente viene presa pari alla temperatura ambiente se intorno all'oggetto osservato non sono presenti fonti di calore importanti. Se, invece, si hanno elementi a temperatura elevata è necessario stimare tale temperatura e considerare questa come reflected temperature.

Le termocamere della *FLIR* vengono gestite mediante il software *ResearchIR*, mentre la termocamera della *OPTRIS* mediante il software *PI connect*. A titolo di esempio viene mostrato il software *ResearchIR* in dotazione con le termocamere *FLIR*.

3.3.2 Mappa di β

Una volta che le immagini termiche sono state elaborate nel software in dotazione con la termocamera, vengono salvate in formato .mat (Matlab) per poterle impiegare nella realizzazione, proprio in ambiente Matlab, della mappa di β . In ogni immagine catturata, ciascun pixel riporta un valore di temperatura. Una volta che l'immagine viene caricata in Matlab, assume la forma di una matrice, nella quale ciascun elemento coincide con un pixel dell'immagine e il valore numerico che lo caratterizza corrisponde al dato in temperatura rilevato. Vediamo gli step che vengono affrontati per la realizzazione della mappa di β :

- caricata l'immagine da elaborare, il primo passo da compiere è il calcolo del fattore di vista. Si realizza una matrice, diversa da quella che rappresenta l'immagine, in cui ciascun pixel contiene il valore del fattore di vista calcolato. Tale matrice è di dimensioni variabili e il numero di righe e colonne che la costituiscono dipende da quanti pixel della immagine elaborata vanno corretti. Infatti, se la superficie che va corretta con il fattore di vista occupa solo una parte dell'immagine infrarossa che si sta elaborando, la correzione va applicata solamente ai pixel interessati, altrimenti va estesa a tutta l'immagine, se la superficie inquadrata e affetta da errore occupa l'intera scena;
- il secondo step è quello di calcolare il fattore di banda, in modo tale da considerare l'intervallo di lunghezze d'onda in cui la termocamera opera. La matrice del fattore di banda avrà le stesse dimensioni della matrice che rappresenta l'immagine termica elaborata, in quanto è un parametro caratteristico del funzionamento della termocamera e, quindi, va corretto in ogni pixel delle immagini acquisite;
- a questo punto si valuta il potere emissivo mediante la relazione:

$$Q = \frac{\varepsilon_{obj} \cdot \sigma \cdot T_{obj,i}^4 \cdot F_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2}}{F_{s,t}} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Tale grandezza viene calcolata per ogni elemento della matrice dell'immagine termografica. Poiché, come detto, ciascun elemento della matrice coincide con un pixel dell'immagine nell'infrarosso, quello che si ottiene a questo punto

dell'elaborazione è una immagine infrarossa caratterizzata non più dal valore di temperatura rilevato, ma dal valore di potere emissivo calcolato;

- si passa poi alla realizzazione della mappa di β , calcolando tale parametro per ogni pixel della matrice termica. La relazione che permette il calcolo di β è la seguente:

$$\beta = \frac{Q_{rif} - Q_i}{K \cdot (T_i - T_{atm})}$$

Come vediamo dalla formula, a numeratore è presente una differenza tra due valori di potere emissivo. L'introduzione di una differenza, quindi di una valutazione relativa e non assoluta, consente di ridurre l'errore e le incertezze introdotte dalla termografia. Tale differenza viene valutata sempre rispetto ad un valore di riferimento: Q_{rif} . Quando si compie la prima rilevazione di un edificio, nel momento in cui si elabora la prima immagine termica, in essa viene fissato il punto di riferimento: una volta definito, questo verrà preso come riferimento per ogni altra immagine da elaborare e per ogni rilevazione successiva. Il punto di riferimento che viene scelto è quello che riporta il *massimo valore di potere emissivo*, indicato appunto con Q_{rif} . Le varie mappe di β che vengono determinate sono, quindi, tutte riferite allo stesso valore di riferimento Q_{rif} . Il termine Q_i rappresenta, invece, il potere emissivo del pixel i -esimo e può variare, quindi, da pixel a pixel e da immagine a immagine. Poiché il parametro β viene valutato per ogni pixel, è chiaro che quelli che sono caratterizzati da un potere emissivo pari a Q_{rif} avranno $\beta = 0$. Nel momento in cui si andrà a compiere una seconda rilevazione a distanza di tempo, il valore di Q_{rif} sarà pari al valore di potere emissivo che caratterizza sempre lo stesso punto di riferimento, anche se nella seconda rilevazione potrebbe non corrispondere più con il valore massimo di quell'immagine in cui si trova. Il punto di riferimento in cui valutare Q_{rif} viene mantenuto sempre costante in modo tale che i dati ottenuti dalle rilevazioni successive a distanza di tempo siano confrontabili con quelli ottenuti dalla prima rilevazione. Una volta definito, il punto di riferimento

in cui si trova il valore di Q_{rif} può essere identificato grazie al modello 3D nel visibile, così da poterlo individuare in tutte le rilevazioni successive;

- l'ultimo passo da compiere dopo aver realizzato la mappa di β è quello di ridimensionarla, in modo tale che le sue dimensioni coincidano con quelle della immagine nel visibile corrispondente. In questo modo a ciascun pixel della mappa di β corrisponde un pixel dell'immagine nel visibile. Il ridimensionamento va fatto in funzione della risoluzione di fotocamera e termocamera impiegate e considerando i diversi rapporti di visualizzazione. Considerando, per esempio, l'accoppiamento *FLIR A655sc 25° - SONY α 7R III*, sappiamo che la prima ha una risoluzione di 640x480 pixel, mentre la seconda ha una risoluzione di 7952x5304 pixel e quindi si ha un rapporto pixel fotocamera/pixel termocamera pari a 11,05. Per far coincidere le dimensioni delle immagini infrarossa e dell'immagine nel visibile, l'immagine fornita dalla termocamera va ridimensionata, considerando che la dimensione in y deve essere la stessa dell'immagine nel visibile e che il rapporto di visualizzazione deve essere mantenuto pari a 4:3. Una volta ridimensionata avremo una immagine nell'infrarosso da 5304 pixel in y e 7072 pixel in x, che costituisce la mappa di β definitiva con cui lavorare;
- a questo punto, la pelle termica per la creazione del modello 3D termico si ricava estraendo la matrice di β dall'ambiente Matlab e salvandola in un formato immagine, come .jpg o .png, che sia supportato dal software con cui si elabora il modello 3D. L'immagine ottenuta dopo l'elaborazione in ambiente Matlab rappresenta ancora la scena osservata, quindi la superficie studiata, caratterizzata però da una palette di colori la cui intensità in ciascun pixel è proporzionale non al valore di temperatura rilevato dalla termocamera, ma al valore di β che caratterizza il pixel stesso.

Il codice Matlab sviluppato per la creazione della mappa di β viene riportato in Appendice.

3.4 Interpretazione della variazione di β in rilevazioni successive

Come già descritto in precedenza, la metodologia di analisi termica dell'involucro edilizio che si intende definire consiste nel confrontare lo stato della pelle termica dell'edificio in rilevazioni successive compiute a distanza di tempo. Variazioni dello stato della pelle termica sono sintomo della manifestazione di difetti nell'involucro edilizio. Il parametro che caratterizza la pelle termica e di cui si studia la variazione è il parametro adimensionale β :

$$\beta = \frac{Q_{rif} - Q_i}{K \cdot (T_i - T_{atm})}$$

Delle grandezze che compaiono nella formula, la trasmittanza termica K di progetto e T_i sono costanti in tutte le rilevazioni. La trasmittanza termica che va considerata è quella di progetto, la quale può essere ritrovata nella documentazione relativa alla progettazione dell'edificio, o in quella che riporta l'eventuale realizzazione di un intervento sull'involucro, come l'applicazione del cappotto termico. La temperatura interna T_i è un parametro che viene impostato dall'operatore, in quanto può essere regolata a piacimento e va poi mantenuta costante nelle rilevazioni successive in modo da riprodurre le stesse condizioni della prima indagine ed ottenere così dati confrontabili.

Il termine presente a numeratore, come detto, elimina l'influenza della T_{atm} e le incertezze introdotte dalla termografia infrarossa; quindi, una variazione di β in due rilevazioni successive può essere ricondotta solamente ad una variazione di Q_i o ad una variazione di Q_{rif} . A loro volta, tali grandezze subiscono una variazione solamente se varia la trasmittanza termica della parete, la quale si modifica esclusivamente in seguito al manifestarsi di difetti nell'involucro edilizio che alterano le proprietà termofisiche dei materiali presenti.

La trasmittanza termica K è data da:

$$K = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{s,i} + \sum R_k + R_{s,e}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

dove:

- $R_{s,i} = \frac{1}{\alpha_i} = \text{resistenza termica superficiale interna}; \alpha_i = \text{adduttanza interna};$
- $R_{s,e} = \frac{1}{\alpha_e} = \text{resistenza termica superficiale esterna}; \alpha_e = \text{adduttanza esterna};$
- $\sum R_k = \sum \frac{l_i}{\lambda_i} = \text{sommatoria delle resistenze termiche di conduzione};$
 $l_i = \text{spessore strato } i - \text{esimo}; \lambda_i = \text{conducibilità termica del materiale } i - \text{esimo}.$

La resistenza superficiale interna $R_{s,i}$ è costante, in quanto la temperatura interna viene mantenuta costante durante la rilevazione; la resistenza superficiale esterna $R_{s,e}$ può essere considerata costante per variazioni di temperatura atmosferica contenute; la T_{atm} non è un parametro che possiamo controllare ma possiamo fare in modo di compiere le rilevazioni successive in condizioni quanto più simili possibile a quelle della prima rilevazione effettuata, in modo tale da poter avere variazioni di T_{atm} contenute e poter considerare $R_{s,e}$ costante; la resistenza termica di conduzione può variare nel momento in cui i materiali presenti nell'involucro edilizio subiscono alterazioni delle loro proprietà termofisiche, in particolare della conducibilità termica: questo è ciò che si verifica quando si manifesta un difetto all'interno dell'involucro, che quindi modifica il valore di trasmittanza termica K e di conseguenza i flussi termici attraverso la parete e il parametro β . Infatti, variando i flussi termici attraverso la parete varia la temperatura superficiale e quindi il dato fornito dalla termocamera; di conseguenza varia anche β .

Vediamo ora come va condotto il confronto tra due rilevazioni successive e come vanno interpretate le variazioni di β che si riscontrano.

Caso 1: mappa di β si ripresenta uguale

Nel caso in cui la mappa di β fornita dalla seconda rilevazione si ripresentasse uguale a quella ottenuta dalla prima rilevazione, ciò significherebbe che nel tempo trascorso tra le due rilevazioni non si è manifestato alcun difetto all'interno dell'involucro edilizio studiato. Lo stato della parete è rimasto invariato nell'intervallo di tempo trascorso tra le due analisi e le prestazioni energetiche dell'involucro non si sono alterate.

Caso 2: cambia il punto in cui si ha il potere emissivo massimo

Nel realizzare la mappa di β relativa alla prima indagine che si compie, si impone come riferimento il punto in cui, nella prima immagine elaborata, il potere emissivo calcolato è massimo. La mappa di β risultante sarà costituita da valori calcolati relativamente a tale punto. Nelle indagini successive, la realizzazione della mappa di β avviene sempre rispetto a tale punto di riferimento, che non cambia, anche se potrebbe verificarsi che non corrisponda più con il valore di potere emissivo massimo della immagine. Se si verifica questo scenario, ovvero che nella seconda rilevazione il punto con potere emissivo massimo non coincide più con il punto di riferimento definito nella prima rilevazione, allora si può evincere che nel nuovo punto in cui si ha il potere emissivo massimo si sia presentato un difetto. Infatti, essendo aumentato il potere emissivo calcolato, deve essere aumentato il flusso termico attraverso la parete, quindi deve essersi presentato un difetto che abbia aumentato la trasmittanza termica K.

Se si verifica questo caso, il manifestarsi di un difetto può essere individuato senza il bisogno di calcolare β , ma solo visivamente, verificando lo spostamento del punto con potere emissivo massimo.

Caso 3: il valore di β diminuisce

Ricordiamo che:

$$\beta = \frac{Q_{rif} - Q_i}{K \cdot (T_i - T_{atm})}$$

Se tra due rilevazioni successive il β nel punto i-esimo diminuisce, significa che Q_i è aumentato; un aumento di Q_i indica un aumento di trasmittanza termica K, il che significa che si è presentato un difetto all'interno dell'involucro edilizio in corrispondenza del punto i-esimo.

Quindi, se β diminuisce so per certo che nel punto i-esimo si è presentato un difetto.

Caso 4: il valore di β aumenta

Se tra due rilevazioni successive il β aumenta, significa che è aumentato il potere emissivo nel punto di riferimento, cioè il termine Q_{rif} ; quindi significa che è aumentata la trasmittanza termica in quel punto, in seguito al manifestarsi di un difetto. Se il difetto

si verifica nel punto di riferimento, l'aumento di β viene riscontrato in tutti i punti della mappa termica ed è dello stesso valore per ciascuno di essi. Questo perché la mappa di β viene realizzata calcolando tale parametro per ogni pixel in relazione al pixel di riferimento. Quindi se si verifica un difetto nel punto di riferimento, la variazione di β rispetto alla rilevazione precedente si ha su tutta la mappa termica.

Nel processo interpretativo delle variazioni del parametro β va tenuto in considerazione un aspetto: nella realtà i difetti che provocano un aumento della trasmittanza termica K della parete sono estesi, non puntuali. Qui si sta ragionando in termini di pixel, ma è chiaro che se in un generico punto i -esimo è presente un difetto, questo è esteso a tanti pixel nell'intorno del punto i -esimo stesso.

3.5 Realizzazione del modello 3D nel visibile

3.5.1 Ritaglio delle immagini nel visibile

Il post processamento delle immagini nel visibile consiste in una fase di ritaglio al fine di conferire loro le stesse dimensioni, in x e y, delle immagini termiche. Per realizzare il ritaglio è stato sviluppato un codice in Matlab. Poiché in Matlab si ragiona in termini matriciali, è necessario calcolare il numero di righe e colonne che vanno tagliate nella matrice che rappresenta l'immagine nel visibile. Se si considera l'accoppiamento *FLIR A655sc 15° - SONY α7R III*, nel quale l'immagine nel visibile ha entrambe le dimensioni x e y maggiori dell'immagine termica, si dovranno tagliare sia righe che colonne, mentre negli accoppiamenti *FLIR A655sc 25° - SONY α7R III* e *OPTRIS PI400 - SONY α6000*, nei quali la lunghezza focale della fotocamera consente di ottenere immagini nel visibile e immagini termiche con stessa dimensione y, andranno tagliate solamente colonne. Di seguito viene descritto lo sviluppo del codice di ritaglio delle immagini nel visibile solamente per l'accoppiamento *FLIR A655sc 25° - SONY α7R III* con obiettivo *SONY FE 24-105 MM F4 G OSS*, ma il ragionamento è lo stesso anche per gli altri due accoppiamenti possibili.

Il primo aspetto da considerare è che termocamera e fotocamera hanno risoluzioni molto differenti. In questo caso abbiamo la *FLIR A655sc 25°* che monta un sensore 640x480 pixel, mentre la *SONY α7R III* ha un sensore da 7952x5304 pixel. Per poter rendere confrontabili le due immagini, nel visibile e infrarossa, è necessario ridimensionare la seconda, considerando che la dimensione in y deve essere la stessa dell'immagine nel visibile e mantenendo il rapporto di visualizzazione di 4:3. Quindi, una volta ridimensionata, avremo una immagine infrarossa da 5304 pixel in y e 7072 pixel in x. Partendo da quest'ultimo dato va fatto il calcolo su quante colonne tagliare ai due lati dell'immagine nel visibile:

- se termocamera e fotocamera fossero poste una sopra l'altra, avremmo i due assi ottici coincidenti lungo x, quindi avremmo lo stesso numero di colonne da eliminare sia a destra che a sinistra dell'immagine, pari a:

$$\frac{7952 - 7072}{2} = 440 \text{ colonne}$$

- nel sistema di acquisizione delle immagini, però, termocamera e fotocamera sono montate una di fianco all'altra, la prima a sinistra e l'altra a destra, con gli obiettivi posti ad una distanza di 10 cm l'uno dall'altro. In questo caso il numero di colonne da tagliare a destra dell'immagine differisce dal numero di colonne da tagliare a sinistra. Riprendendo i calcoli svolti nel paragrafo "Linee guida per l'acquisizione di immagini nel visibile", abbiamo:

$$R_r = 4.83 \text{ m};$$

$$L_{y,termocamera} = L_{y,fotocamera} = 1.6165 \text{ m};$$

$$L_{x,termocamera} = 2.14 \text{ m};$$

allora, la dimensione inquadrata da un pixel è data da:

$$\frac{2.14 \text{ m}}{7072 \text{ pixel}} \cdot 100 = 0.03 \text{ cm/pixel};$$

la distanza tra gli obiettivi di termocamera e fotocamera corrisponde a:

$$\frac{10 \text{ cm}}{0.03 \text{ cm/pixel}} = 330 \text{ pixel};$$

essendo poste la termocamera a sinistra e fotocamera a destra, avremo che:

- ❖ *colonne da tagliare a partire dal margine sinistro: $440 - 330 = 110$;*
- ❖ *colonne da tagliare a partire dal margine destro: $440 + 330 = 770$.*

A questo punto, noto il numero di colonne da tagliare, lo si inserisce nel codice Matlab e si realizza il ritaglio delle immagini.

Il codice Matlab sviluppato per il ritaglio delle immagini esegue le operazioni automaticamente su tutte le immagini che si intende elaborare. Per fare ciò, nel momento in cui si scaricano dalla fotocamera, le immagini vanno salvate in una cartella contenente solamente quelle immagini e vanno rinominate con il nome di "ImmagineNumero", dove "Numero" va da 1 al numero di immagini acquisite. Il codice salva le immagini a mano a mano che le elabora con un nome differente ("ImmNumero") per non confonderle.

Il codice Matlab sviluppato per il ritaglio delle immagini nel visibile viene riportato in Appendice.

3.5.2 Creazione modello 3D

Una volta ritagliate tutte le fotografie che sono state acquisite, queste vengono utilizzate per la realizzazione del modello 3D dell'edificio nel visibile. A tal fine si sfrutta un software di fotogrammetria: *3DF Zephyr Aerial*. Per permettere al software di ricreare il modello dell'edificio è necessario acquisire un elevato numero di immagini, in modo tale che le discontinuità presenti, come spigoli, parti in rilievo, variazione della forma delle pareti, vengano individuate in maniera accurata e riprodotte fedelmente. Le immagini catturate devono essere caratterizzate da un grado di sovrapposizione almeno dell'80%, in modo da rendere riconoscibile per il software la composizione della struttura, e tenendo in considerazione anche il fatto che in fase di post processamento una certa porzione di ciascun'immagine, per quanto minima, viene tagliata.

La realizzazione di un modello 3D nel visibile consente di identificare in maniera più precisa i difetti evidenziati dall'indagine termografica, in quanto permette di collocarli sulla struttura e di evitare errori di interpretazione, dovuti, per esempio, a discontinuità di materiale presente sulla parete che, avendo emissività diversa, possono trarre in inganno.

4 Caso studio: la centrale termica dell'Università

La metodologia di analisi descritta fin qui è stata applicata nell'indagine dell'edificio che ospita la centrale termica dell'Università Politecnica delle Marche.

La scelta è ricaduta su tale struttura in quanto possiede caratteristiche ottimali per una analisi termografica. Le due canne fumarie, anche se coibentate, forniscono un modello termico ideale su cui svolgere l'analisi, in quanto sono riscaldate dai fumi ad elevata temperatura che fluiscono al suo interno. Inoltre, la forma cilindrica che le caratterizza si presta bene per la valutazione del fattore di vista. L'analisi è stata, quindi, realizzata con la centrale termica in funzione.

4.1 Realizzazione del volo

Le operazioni sono state condotte nel rispetto del protocollo stilato. Sono state richieste le autorizzazioni necessarie agli organi competenti al fine di ottenere il permesso per lo svolgimento dell'attività. Si è provveduto a delimitare l'area interessata dalle operazioni, in modo tale da evitare il transito di autovetture e di soggetti terzi non coinvolti, così da poter garantire il sufficiente livello di sicurezza.

Per eseguire le rilevazioni è stato sfruttato il quadricottero disponibile in Dipartimento, equipaggiato con la termocamera *FLIR A655sc 25°* e con la fotocamera *SONY α7R III* con montato l'obiettivo *SONY FE 24-105 MM F4 G OS*. Per poter ottenere scene di dimensioni paragonabili, requisito necessario poi per l'elaborazione delle immagini, sia di quelle termiche che di quelle nel visibile, e per la realizzazione della pelle termica, si è posta la lunghezza focale della fotocamera pari $fl = 71.709 \text{ mm}$. Il drone è stato fatto volare ad una distanza di 8 m dalle pareti, a causa di ostacoli che ne impedivano l'avvicinamento. Di seguito si riportano i calcoli con i quali si valutano le dimensioni della scena inquadrata dalla termocamera e dalla fotocamera, considerando la distanza a cui si vengono acquisite le immagini.

$$L_{x,termocamera} = 2R \tan \frac{FOV_x}{2} = 2 \times 8 \text{ m} \times \tan \frac{0.436332}{2} = 3.54 \text{ m}$$

$$L_{y,termocamera} = 2R \tan \frac{FOV_y}{2} = 2 \times 8 \text{ m} \times \tan \frac{0.331612}{2} = 2.67 \text{ m}$$

La dimensione y della scena osservata è la stessa sia per termocamera che per fotocamera, grazie all'imposizione della lunghezza focale. La dimensione x della scena inquadrata dalla fotocamera risulta essere:

$$L_{x,fotocamera} = 2R_r \tan \frac{FOV_{x,fotocam}}{2} = 2 \times 8 \times \tan \frac{0.49055}{2} = 4 \text{ m}$$

L'indagine è stata svolta realizzando con il quadricottero due spazzate per ciascuna parete. In questo modo è stato possibile acquisire un elevato numero di immagini e garantire il grado di sovrapposizione richiesto per la realizzazione del modello 3D.

Le operazioni si sono compiute di prima mattina, in modo da evitare che le pareti e la termocamera fossero irraggiate dal Sole in maniera diretta. I parametri ambientali rilevati sono i seguenti:

- cielo sereno;
- vento: assente;
- temperatura atmosferica: $T_{atm} = 8^{\circ}\text{C}$;
- umidità relativa: 70%;

4.2 Elaborazione delle immagini nel visibile e realizzazione del modello 3D

Una volta compiuto il volo, si è passati alla fase di elaborazione delle immagini nel visibile.

Dopo averle scaricate dalla fotocamera si è realizzata la fase di ritaglio. Ricordando quanto detto nel paragrafo *Ritaglio delle immagini nel visibile*, per la coppia *FLIR A655sc 25° - SONY α 7R III* con obiettivo *SONY FE 24-105 MM F4 G OSS*, il numero di colonne da tagliare nella immagine visibile per poterla paragonare all'immagine termica ridimensionata è: 110 colonne a partire dal margine sinistro e 770 a partire dal margine destro. Di seguito si riporta, a titolo di esempio, il ritaglio di un'immagine: la prima immagine è la fotografia originale, caratterizzata da 5304x7952 pixel, mentre nella seconda immagine si ha la stessa fotografia, ma ritagliata, costituita da 5304x7072 pixel.



Figura 4-1: immagine della centrale termica originale



Figura 4-2: immagine della centrale termica ritagliata

Nel margine sinistro il ritaglio è appena percettibile, in quanto viene rimosso un numero contenuto di colonne. Nel margine destro, invece, il ritaglio risulta evidente, in quanto il numero delle colonne rimosse è considerevole. Si nota, infatti, come la scala presente sulla destra venga tagliata.

A questo punto, dopo aver ritagliato tutte le immagini, si è effettuata una selezione, la quale ha permesso di tenere in considerazione solamente le immagini più significative, tralasciando quelle in ombra, quelle che non rappresentavano in maniera chiara gli elementi da ricostruire e quelle che in cui erano presenti ostacoli tra la fotocamera e l'edificio osservato. Si è poi ricostruito il modello 3D in *3DF Zephyr Aerial*, che viene di seguito mostrato.



Figura 4-3: ricostruzione 3D nel visibile della centrale termica

4.3 Elaborazione delle immagini termografiche e realizzazione del modello 3D termico

Si è passati poi all'elaborazione delle immagini nell'infrarosso. La casa produttrice *FLIR* mette a disposizione il software *Research IR* per la visualizzazione e il post processamento delle immagini termiche. Il software permette di correggere le immagini termiche inserendo i valori di alcuni parametri che influenzano la termografia; di questi, alcuni sono relativi all'oggetto osservato, altri relativi all'ambiente in cui viene posta la termocamera. In particolare, sono stati assegnati i seguenti valori.

Parametri relativi all'oggetto osservato:

- emissività = 0.95
- distanza (m) = 8
- reflected temperature (°C) = 8

Parametri relativi all'ambiente in cui si opera:

- temperatura atmosferica (°C) = 8
- umidità relativa (%) = 70
- trasmissione dell'atmosfera: valutata automaticamente dal software in funzione dei valori di temperatura atmosferica e umidità relativa inseriti.

Oltre all'inserimento dei valori dei parametri, è necessario definire correttamente la palette di colori che caratterizzano l'immagine termica. Il sensore della termocamera converte in segnale elettrico la radiazione che incide su di esso, per fornire in output una immagine. L'immagine termografica che otteniamo riporta un dato in temperatura, elaborato grazie al processo di conversione della radiazione che la termocamera esegue internamente. In funzione del valore di temperatura, ciascun pixel dell'immagine è caratterizzato da un colore di un certo tono e di una certa intensità. Le palette di colori con cui l'immagine termica può essere visualizzata sono diverse, ma in ogni caso l'intensità del colore è funzione del valore di temperatura. Nella realizzazione del modello 3D termico è importante impostare, per tutte le immagini, lo stesso range di temperatura all'interno del quale la palette di colori si deve distribuire. Se il range di temperatura variasse tra un'immagine e l'altra, lo stesso valore di temperatura verrebbe

mostrato con toni di intensità diversa, introducendo così una fonte di incertezza nella interpretazione dei dati e impedendo la realizzazione del modello 3D, in quanto il software *3DF Zephyr Aerial*, oltre che sul riconoscimento di elementi geometrici comuni, basa l'algoritmo di ricostruzione anche sui colori degli oggetti presenti nella scena.

Di seguito si mostra il confronto tra due immagini termiche: una che precede l'inserimento dei parametri e della corretta impostazione della palette di colori, l'altra che lo segue.

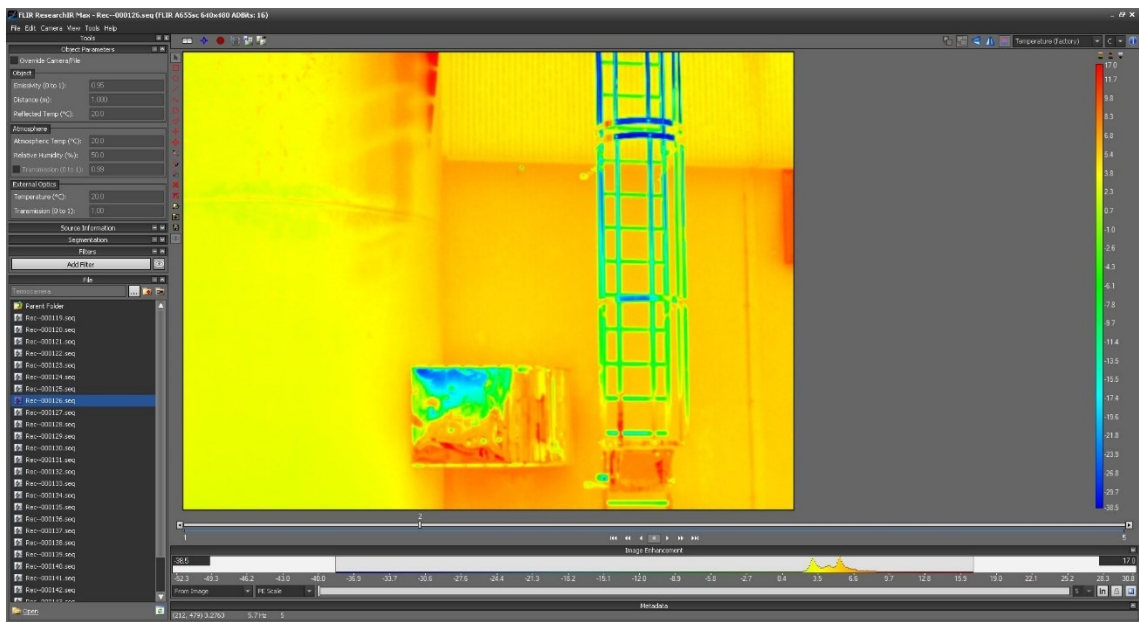


Figura 4-4: immagine termica in Research IR non elaborata

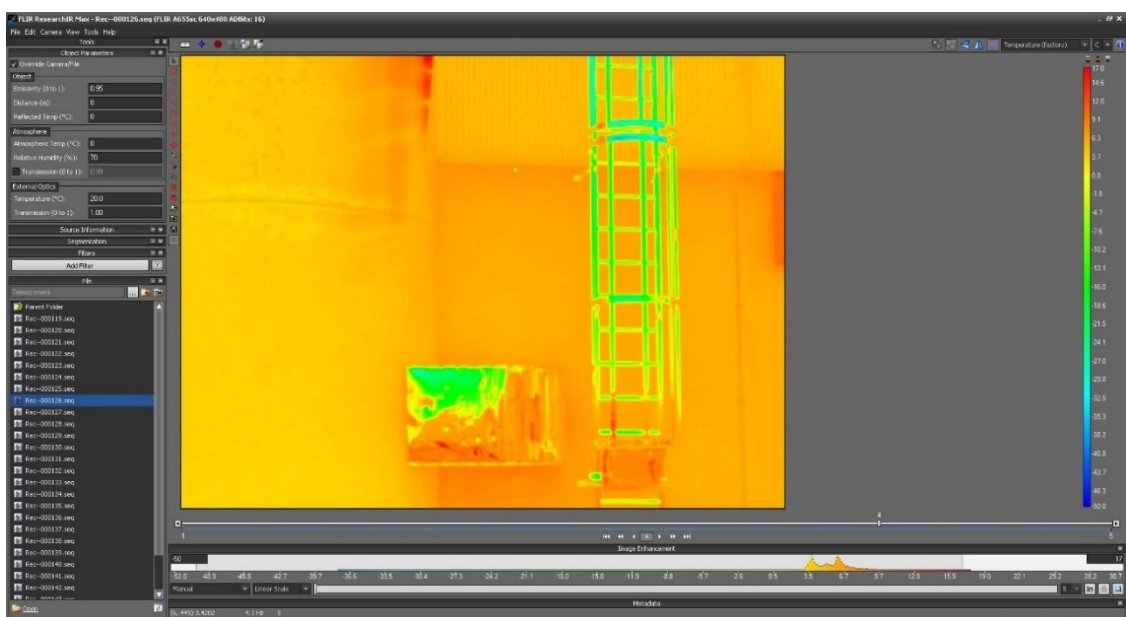


Figura 4-5: immagine termica in Research IR elaborata

Di seguito si riporta anche un confronto tra le figure: Figura 4-1, Figura 4-2 e la corrispondente immagine nell'infrarosso. In questo modo si evidenzia come l'immagine nel visibile, una volta ritagliata, sia caratterizzata da una più accurata corrispondenza con la rispettiva immagine termica.



Figura 4-6: immagine della centrale termica originale



Figura 4-7: immagine della centrale termica ritagliata

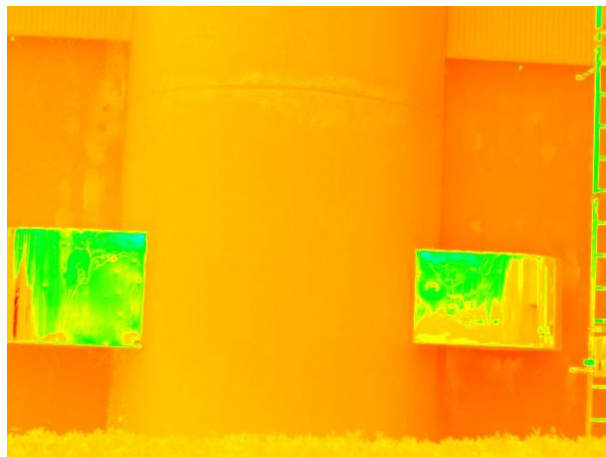


Figura 4-8: immagine termica corrispondente alla fotografia di Figura 4-6

Le immagini termiche vanno poi elaborate in ambiente Matlab, in modo tale che il dato che le caratterizza non sia più un valore di temperatura, ma sia il valore del parametro β . Di seguito viene mostrata la stessa immagine, prima e dopo l'elaborazione in Matlab. Ciò che mostra questo confronto è che, una volta elaborata, l'immagine rimane una immagine termica, continua a mostrare la stessa scena osservata nell'immagine originale, con la differenza che ora i pixel dell'immagine elaborata mostrano un dato che indica il valore assunto dal parametro β in ciascuno di essi. Nella prima immagine che segue vediamo che il dato, denominato *Index*, indica il valore di temperatura, espresso in Kelvin; nella seconda immagine si vede, invece, come il dato abbia un diverso ordine di grandezza: questo perché, una volta elaborata, i pixel dell'immagine contengono il valore di β . L'immagine termografica è stata così convertita in una mappa di β . L'elaborazione dell'immagine fa sì che l'intensità del colore cambi rispetto a quella dell'immagine non elaborata: ciò è dovuto al diverso valore che i pixel assumono e alla variazione del range di colori all'interno del quale tali valori si distribuiscono.

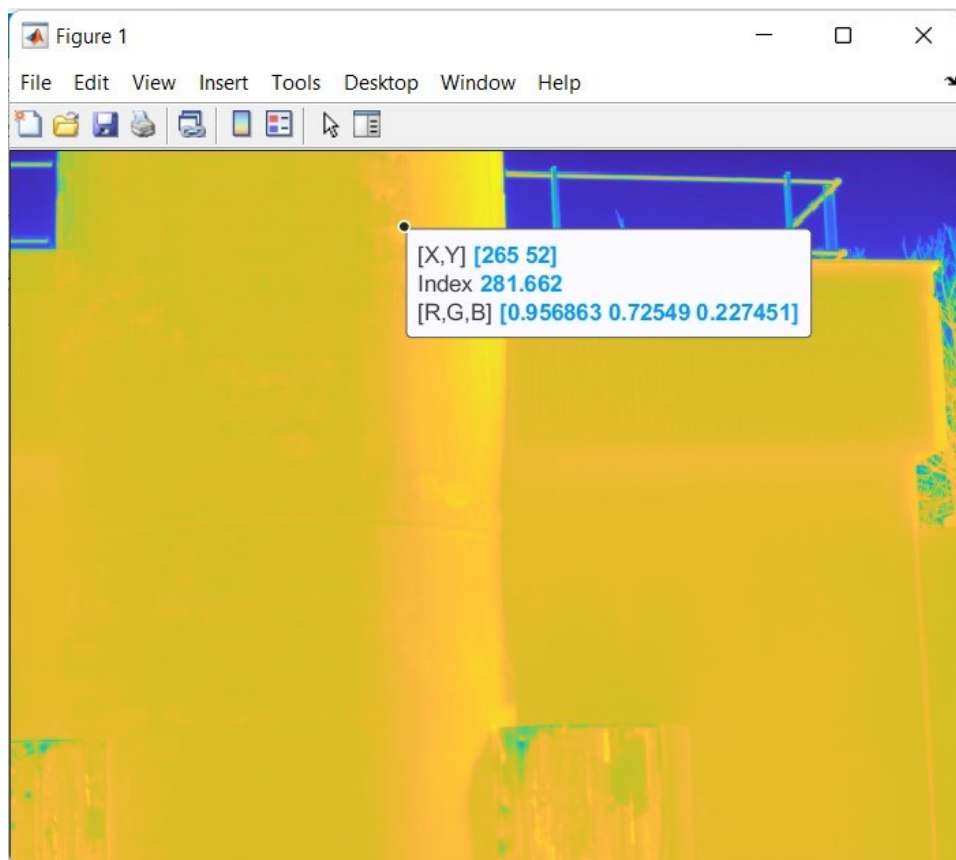


Figura 4-9: immagine termica con dato in temperatura

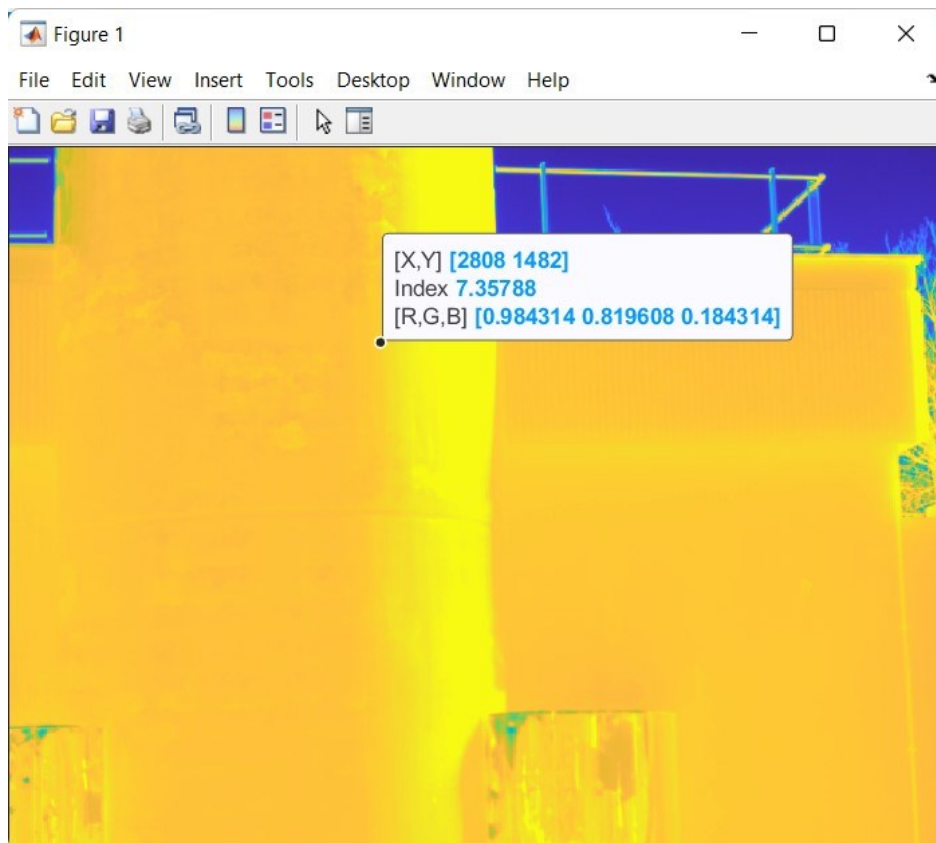


Figura 4-10: immagine termica con mappa di β .

La totalità delle immagini termografiche acquisite, una volta elaborate e convertite in mappe di β verranno impiegate per la ricostruzione 3D della struttura: questa costituirà la pelle termica cercata. Variazioni del valore di β nel tempo, sinonimo di manifestazione di difetti all'interno dell'involucro edilizio, si mostreranno come variazioni di colore della ricostruzione 3D della struttura. Le evidenze di una variazione del parametro β sono, dunque, duplici: la prima è visiva, quindi qualitativa, e si riscontra nella variazione del colore del modello termico tridimensionale; la seconda è, invece, quantitativa, individuata nella variazione numerica del parametro β .

Terminata l'elaborazione delle immagini termografiche, si passa alla realizzazione del modello 3D termico, sempre in ambiente *3DF Zephyr Aerial*. La minor qualità delle immagini termiche, dovute alla scarsa risoluzione geometrica del sensore della termocamera, rispetto a quella del sensore della fotocamera, si ripercuote inevitabilmente sulla qualità del modello ricostruito.

Confrontando i due modelli 3D ottenuti, la differenza di qualità è evidente.

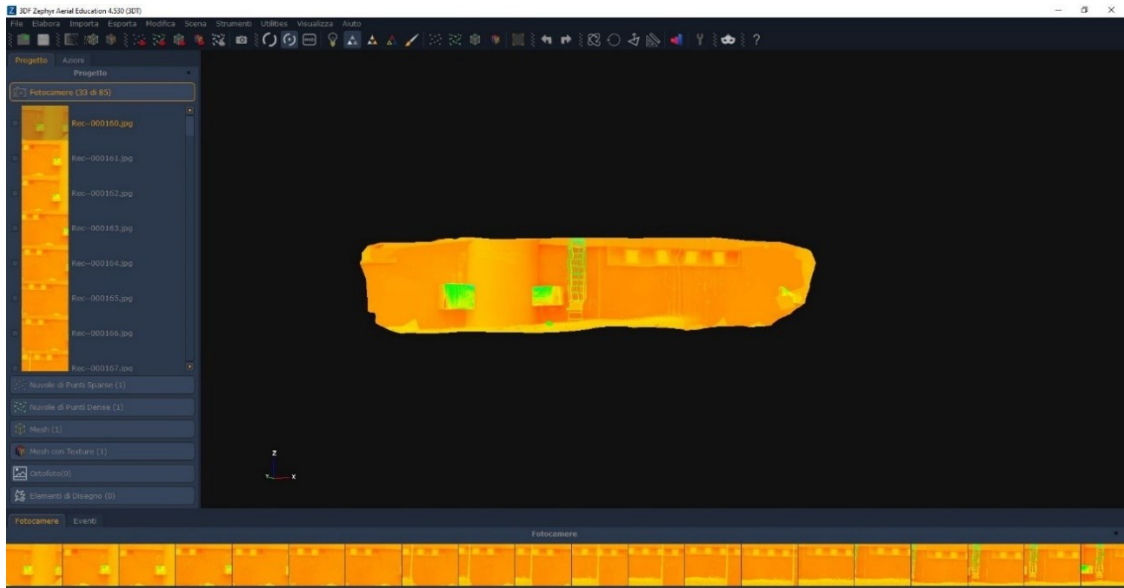


Figura 4-11: ricostruzione 3D termica della struttura

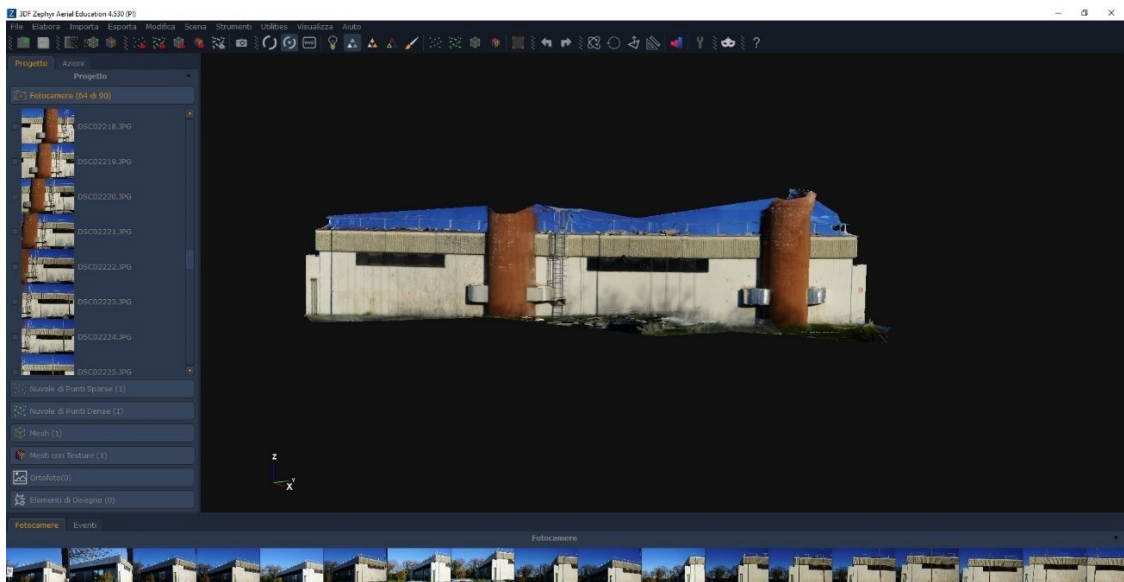


Figura 4-12: ricostruzione 3D nel visibile della struttura

Ciò mette in luce la necessità di associare al 3D termico la ricostruzione nel visibile. Un riscontro visivo con il modello reale consente di evitare errori di interpretazione nell'analisi termica, dovuti a possibili discontinuità di materiale o ad elementi architettonici non significativi dal punto di vista termico. La peggior risoluzione delle immagini termiche ha prodotto anche lo scarto, da parte del software, di un notevole numero di immagini. Come è possibile notare dalla Figura 4-11, infatti, su 85 immagini catturate con la termocamera, solo 33 sono state impiegate da *3DF Zephyr Aerial* per la costruzione del modello 3D. Ciò ha contribuito alla scarsa qualità della ricostruzione ottenuta.

5 Conclusioni

Tale elaborato ha lo scopo di gettare le basi per lo sviluppo di una metodologia innovativa per l'indagine termica di un involucro edilizio e di mostrarne le sue potenzialità.

Innanzitutto, è necessario evidenziare che la possibilità di coinvolgere gli UAVs nel processo di indagine consente di aumentare la velocità con cui viene realizzata la rilevazione: il perimetro di un edificio può essere coperto con un volo di pochi secondi, al limite qualche minuto, riducendo in maniera drastica i tempi rispetto ad una rilevazione condotta a piedi. Insieme alla velocità di esecuzione, un aspetto che viene notevolmente migliorato con l'impiego dei droni è quello dell'accessibilità. Volando, si ha la possibilità di raggiungere luoghi altrimenti inaccessibili e di evitare ostacoli che renderebbero discontinua la rilevazione. Un progresso si ottiene anche nella completezza dell'analisi. L'UAV consente, infatti, di comprendere nella rilevazione la totalità dell'edificio studiato: diventa più agevole includere i tetti nell'indagine e si rende possibile l'analisi di strutture di altezza elevata.

A contribuire alla riduzione dei tempi richiesti dall'analisi termica degli edifici non è solamente l'impiego degli UAV, ma anche la definizione di una metodologia che consente di standardizzare il processo interpretativo dei risultati forniti dall'indagine. La definizione del parametro adimensionale β permette, infatti, di eliminare le fonti di incertezza che influenzano la pratica termografica e di rendere univoca l'interpretazione delle variazioni che tale parametro subisce nel tempo.

Tra i fattori che influenzano la termografia infrarossa, quello che necessita di ulteriore approfondimento è il fattore di vista. Anche se il parametro adimensionale β , grazie al modo in cui è stato definito, permette di eliminare gli errori dovuti alla temperatura atmosferica e ai vari contributi radiativi che incidono sulla termocamera, nulla può per la correzione dell'errore introdotto dal modo in cui termocamera e oggetto inquadrato sono orientati uno relativamente all'altro. Per tenere in considerazione questo aspetto ed ottenere risultati attendibili dalle indagini termografiche, i dati di potere emissivo con cui si calcola il parametro β vanno corretti con il fattore di vista. Questo è un parametro geometrico che dipende dalla posizione relativa tra termocamera ed oggetto

osservato. Nel caso studio realizzato, il parametro β è stato calcolato senza apportare la correzione del fattore di vista. Un codice, che viene riportato in Appendice, si propone di calcolare il fattore di vista per due diverse geometrie: un cilindro e una lastra piana, e di applicare la correzione al parametro β , ma i risultati che si ottengono inducono a condurre uno studio più approfondito. Per uno sviluppo futuro della metodologia di analisi termica, il primo passo va fatto, quindi, verso il calcolo del fattore di vista e la correzione dell'errore associato. Una riflessione può essere fatta anche nell'ottica di automatizzare la correzione, associando al calcolo del fattore di vista i dati elaborati dal software *3DF Zephyr Aerial*, il quale fornisce indicazioni sia sulla posizione della termocamera, che sulla retta normale ad ogni superficie della mesh e potrebbe consentire, quindi, di automatizzare il calcolo degli angoli che intervengono nel fattore di vista.

Un secondo spunto di riflessione nasce dalla ricostruzione dei modelli 3D. Chiarita l'importanza di associare un modello 3D nel visibile a quello termico, un ulteriore sviluppo potrebbe essere rappresentato dal sovrapporre al modello 3D nel visibile, la pelle termica elaborata in ambiente Matlab. L'idea è quella di ricostruire solamente il modello 3D nel visibile e sovrapporre ad esso le immagini nell'infrarosso, elaborate e definite in termini di β , in modo che la mappa di β vada a coincidere esattamente con la corrispondente parte del modello 3D. Potrebbe essere questa la strada verso un ulteriore incremento del dettaglio geometrico dell'analisi e verso la creazione di una vera e propria pelle termica da applicare al modello 3D nel visibile.

In conclusione, la metodologia di analisi sviluppata, sfruttando il coinvolgimento di UAVs, termografia infrarossa e fotogrammetria, consente di realizzare indagini termiche in maniera più veloce, più efficace e più dettagliata dal punto di vista geometrico; è una metodologia che permette di correggere gli errori e le incertezze che caratterizzano l'indagine termografica. Inoltre, permette di standardizzare l'interpretazione dei risultati, in modo da evitare errori legati all'inesperienza degli operatori.

Va approfondito lo studio sulla correzione del fattore di vista, in quanto costituisce una delle principali fonti di errore nella pratica termografica e vanno valutate tutte le potenzialità che il software *3DF Zephyr Aerial* può offrire per migliorare la metodologia.

Inoltre, va incrementata la qualità delle immagini termiche che vengono elaborate in Matlab e che costituiscono la mappa di β , in modo da disporre di una qualità maggiore.

Appendice

Di seguito, vengono riportati i codici Matlab sviluppati.

Calcolo del fattore di vista

```
%-----Calcolo fattore di vista per termocamera FLIR A655sc-----%

% 1: carica l'immagine da elaborare in formato .mat

Yt=8;           %[m]           %distanza termocamera-superficie
x_pix=640;      %numero pixel asse x
y_pix=480;      %numero pixel asse y
H_FOVg=25;     %[°]           %campo di vista della macchina lungo x
V_FOVg=19;     %[°]           %campo di vista della macchina lungo y
imagesc(Frame),title('Individuazione fine apertura'),grid on
[x,y]=ginput;
A=round(x);
B=round(y);
lungVettore=A(2,1)-A(1,1)+1; %vettore di pixel interessati dal FV

%----- Calcolo dimensioni di un pixel -----%

H_FOVm=(tan(deg2rad(H_FOVg/2)))*Yt*2; % [m]
V_FOVm=(tan(deg2rad(V_FOVg/2)))*Yt*2; % [m]
dx=H_FOVm/x_pix; % [m/pixel]
dy=V_FOVm/y_pix; % [m/pixel]

%----- Discretizzazione secondo dimensione Vettore Temperature -----%

c=dx*lungVettore;
Xs(1)=0;
Xs(lungVettore+1)=c;
for p=2:lungVettore
    Xs(1,p)=Xs(p-1)+dx;
end
Xs_adm = Xs./c;

%----- Calcolo coordinate Y da polinomiale -----%
lungXs=length(Xs);
for p=2:lungXs
    Ys_adm(1,p)=((Xs_adm(1,p))-(Xs_adm(1,p))^2)^0.5;
end

Ys=Ys_adm.*c;

%----- Calcolo Fattore di vista cilindro -----%

Xc=320; %pixel centrale dell'immagine lungo X
L=(Xc-A(1,1))*dx;

for p=1:lungXs-1
    deltaXs(1,p)=Xs(1,p+1)-Xs(1,p);
    deltaYs(1,p)=Ys(1,p+1)-Ys(1,p);
    Xp(1,p)=Xs(1,p)+deltaXs(1,p)/2;
    Yp(1,p)=Ys(1,p)+deltaYs(1,p)/2;
```

```

        d(1,p)=Yp(1,p);
        X(1,p)=L-Xp(1,p);
        Y(1,p)=Yt-d(1,p);
        R(1,p)=((X(1,p)^2)+(Y(1,p)^2))^0.5;
        theta1(1,p)=pi/2-acos(X(1,p)/R(1,p));
        theta2(1,p)=acos(Y(1,p)/R(1,p))+atan(deltaYs(1,p)/deltaXs(1,p));
        F12(1,p)=(cos(theta1(1,p))*cos(theta2(1,p)))/(pi*(R(1,p)^2));
    end
    for z=1:p
        if F12(1,z)<0
            F12(1,z)=1;
        end
    end
    F12_cil=ones(480,lungVettore);
    for q=1:480
        for p=1:lungVettore
            F12_cil(q,p)=F12(1,p);
        end
    end
    F12_cil_adim=F12_cil.*(dx*dy);

%----- Calcolo Fattore di vista lastra piana -----%

r=c/2;
for j=1:lungXs-1
    deltaXs(1,j)=Xs(1,j+1)-Xs(1,j);
    deltaYs(1,j)=Ys(1,j+1)-Ys(1,j);
    Xp(1,j)=Xs(1,j)+deltaXs(1,j)/2;
    Yp(1,j)=Ys(1,j)+deltaYs(1,j)/2;
    X(1,j)=L-Xp(1,j);
    Y(1,j)=Yt-r;
    R(1,j)=((X(1,j)^2)+(Y(1,j)^2))^0.5;
    theta1(1,j)=pi/2-acos(X(1,j)/R(1,j));
    theta2(1,j)=theta1(1,j);
    F12_lp(1,j)=(cos(theta1(1,j))*cos(theta2(1,j)))/(pi*(R(1,j)^2));
end

F12_lpm=ones(480,lungVettore);
for i=1:480
    for j=1:lungVettore
        F12_lpm(i,j)=F12(1,j);
    end
end
end

```

Creazione della matrice di β – caso studio

```

load("Immagine_temp_Kelvin.mat");

%----- Estensione matrice Frame -----%

T=imresize(Frame, [5304 7072]);
r=11.05;
m=1;
n=1;
for i=1:5304
    for j=1:7072
        if i<=r*n && j<=r*m
            T(i,j)=Frame(fix((i-1)/r)+1, fix((j-1)/r)+1);
        elseif i<=r*n && j>r*m
            w1=j-r*m;
            w2=1-w1;
            T(i,j)=Frame(fix((i-1)/r)+1, fix((j-1)/r)+1)*w2+Frame(fix((i-
1)/r)+1,fix((j-1)/r)+2)*w1;
            m=m+1;
        elseif i>r*n && j<=r*m
            w3=i-r*n;
            w4=1-w3;
            T(i,j)=Frame(fix((i-1)/r)+1,fix((j-1)/r)+1)*w4+Frame(fix((i-
1)/r)+2,fix((j-1)/r)+1)*w3;
        else
            w5=(1-(j-r*m))*(1-(i-r*n));
            w6=(j-r*m)*(1-(i-r*n));
            w7=(i-r*n)*(1-(j-r*m));
            w8=(j-r*m)*(i-r*n);
            T(i,j)= Frame(fix((i-1)/r)+1,fix((j-1)/r)+1)*w5+Frame(fix((i-
1)/r)+1,fix((j-1)/r)+2)*w6+Frame(fix((i-1)/r)+2,fix((j-
1)/r)+1)*w7+Frame(fix((i-1)/r)+2,fix((j-1)/r)+2)*w8;
            m=m+1;
        end
    end
    m=1;
    if i>r*n
        n=n+1;
    end
end

%----- Calcolo matrice del fattore di banda -----%

emissivity=0.95;
Lambd1=7.5;
Lambd2=14;
S_B=5.67*10^(-8);
C1=3.7417749*10^8;
C2=1.438769*10^4;
Potere_emissivo_spettrale_1=ones(480,640);
Potere_emissivo_spettrale_2=ones(480,640);
F_lambda1=ones(480,640);
F_lambda2=ones(480,640);
F_lambda12=ones(480,640);
for i=1:480
    for j=1:640

```

```

        fun1 = @(Lambda1) (C1/((Lambda1^5)*((exp(C2/(Lambda1*Frame(i,j)))-
1)))));
        fun2 = @(Lambda2) (C1/((Lambda2^5)*((exp(C2/(Lambda2*Frame(i,j)))-
1)))));

Potere_emissivo_spettrale_1(i,j)=integral(fun1,0,Lambd1,'ArrayValued',true);

Potere_emissivo_spettrale_2(i,j)=integral(fun2,0,Lambd2,'ArrayValued',true);
F_lambda1(i,j)=Potere_emissivo_spettrale_1(i,j)/(S_B*(Frame(i,j)^4));
F_lambda2(i,j)=Potere_emissivo_spettrale_2(i,j)/(S_B*(Frame(i,j)^4));
F_lambda12(i,j)=F_lambda2(i,j)-F_lambda1(i,j);
    end
end

%----- Estensione matrice del fattore di banda -----%

Fattore_banda_1_2=imresize(F_lambda12, [5304 7072]);
r=11.05;
m=1;
n=1;
for i=1:5304
    for j=1:7072
        if i<=r*n && j<=r*m
            Fattore_banda_1_2(i,j)=F_lambda12(fix((i-1)/r)+1, fix((j-1)/r)+1);
        elseif i<=r*n && j>r*m
            w1=j-r*m;
            w2=1-w1;
            Fattore_banda_1_2(i,j)=F_lambda12(fix((i-1)/r)+1, fix((j-
1)/r)+1)*w2+F_lambda12(fix((i-1)/r)+1,fix((j-1)/r)+2)*w1;
            m=m+1;
        elseif i>r*n && j<=r*m
            w3=i-r*n;
            w4=1-w3;
            Fattore_banda_1_2(i,j)=F_lambda12(fix((i-1)/r)+1,fix((j-
1)/r)+1)*w4+F_lambda12(fix((i-1)/r)+2,fix((j-1)/r)+1)*w3;
        else
            w5=(1-(j-r*m))*(1-(i-r*n));
            w6=(j-r*m)*(1-(i-r*n));
            w7=(i-r*n)*(1-(j-r*m));
            w8=(j-r*m)*(i-r*n);
            Fattore_banda_1_2(i,j)=F_lambda12(fix((i-1)/r)+1,fix((j-
1)/r)+1)*w5+F_lambda12(fix((i-1)/r)+1,fix((j-1)/r)+2)*w6+F_lambda12(fix((i-
1)/r)+2,fix((j-1)/r)+1)*w7+F_lambda12(fix((i-1)/r)+2,fix((j-1)/r)+2)*w8;
            m=m+1;
        end
    end
    m=1;
    if i>r*n
        n=n+1;
    end
end

%----- Calcolo del potere emissivo -----%

Q=ones(5304,7072);
for i=1:5304
    for j=1:7072
        Q(i,j)=emissivity*S_B*Fattore_banda_1_2(i,j)*(T(i,j)^4);
    end
end

```

```

end

%----- Calcolo della matrice di "beta" -----%

K=0.3809;
Ti=293.15;
Te=281.15;
Qmax=max(Q,[],"all");
beta=ones(5304,7072);
for i=1:5304
    for j=1:7072
        beta(i,j)=(Qmax-Q(i,j))/(K*(Ti-Te));
    end
end

%---- Estrazione immagine della matrice di "beta" -----%

A=imagesc(beta);
set(gca,'Xtick',[]);
set(gca,'YTick',[]);
set(gca,'Position',[0 0 1 1]);
saveas(A,"Imm.jpg",'jpg');

```

Creazione della matrice di β – correzione con il fattore di vista

```

%Prima di eseguire questo codice, esegui il codice di calcolo per il
%fattore di vista; poi esegui questo senza cancellare il workspace.

%----- Calcolo della matrice di "beta" -----%

%----- Calcolo matrice del fattore di banda -----%

emissivity=0.95;
Lambd1=7.5;
Lambd2=14;
S_B=5.67*10^(-8);
C1=3.7417749*10^8;
C2=1.438769*10^4;
Potere_emissivo_spettrale_1=ones(480,640);
Potere_emissivo_spettrale_2=ones(480,640);
F_lambda1=ones(480,640);
F_lambda2=ones(480,640);
F_lambda12=ones(480,640);
for i=1:480
    for j=1:640
        fun1 = @(Lambd1) (C1/((Lambd1^5)*((exp(C2/(Lambd1*Frame(i,j)))-
1))));
        fun2 = @(Lambd2) (C1/((Lambd2^5)*((exp(C2/(Lambd2*Frame(i,j)))-
1))));
Potere_emissivo_spettrale_1(i,j)=integral(fun1,0,Lambd1,'ArrayValued',true);
Potere_emissivo_spettrale_2(i,j)=integral(fun2,0,Lambd2,'ArrayValued',true);
        F_lambda1(i,j)=Potere_emissivo_spettrale_1(i,j)/(S_B*(Frame(i,j)^4));
        F_lambda2(i,j)=Potere_emissivo_spettrale_2(i,j)/(S_B*(Frame(i,j)^4));
        F_lambda12(i,j)=F_lambda2(i,j)-F_lambda1(i,j);
    end
end

%----- Calcolo radiazione termica -----%

Q=ones(480,640);
for i=1:480
    for j=1:640
        Q(i,j)=emissivity*S_B*F_lambda12(i,j)*(Frame(i,j)^4);
    end
end

%----- Correzione del fattore di vista -----%

Q_corr=Q;
p=1;
for j=A(1,1):A(2,1)
    for i=1:480
        Q_corr(i,j)=Q(i,j)/F12_cil(i,p);
    end
    p=p+1;
end

```

```

%----- Calcolo matrice "beta" -----%

K=0.3809;
Ti=293.15;
Te=278.15;
Q_max_corr=max(Q_corr,[],"all");
beta=ones(480,640);
for i=1:480
    for j=1:640
        beta(i,j)=(Q_max_corr-Q_corr(i,j))/(K*(Ti-Te));
    end
end

%----- Estensione matrice beta -----%

BETA=imresize(beta, [5304 7072]);
r=11.05;
m=1;
n=1;
for i=1:5304
    for j=1:7072
        if i<=r*n && j<=r*m
            BETA(i,j)=beta(fix((i-1)/r)+1, fix((j-1)/r)+1);
        elseif i<=r*n && j>r*m
            w1=j-r*m;
            w2=1-w1;
            BETA(i,j)=beta(fix((i-1)/r)+1, fix((j-1)/r)+1)*w2+beta(fix((i-1)/r)+1,fix((j-1)/r)+2)*w1;
            m=m+1;
        elseif i>r*n && j<=r*m
            w3=i-r*n;
            w4=1-w3;
            BETA(i,j)=beta(fix((i-1)/r)+1,fix((j-1)/r)+1)*w4+beta(fix((i-1)/r)+2,fix((j-1)/r)+1)*w3;
        else
            w5=(1-(j-r*m))*(1-(i-r*n));
            w6=(j-r*m)*(1-(i-r*n));
            w7=(i-r*n)*(1-(j-r*m));
            w8=(j-r*m)*(i-r*n);
            BETA(i,j)= beta(fix((i-1)/r)+1,fix((j-1)/r)+1)*w5+beta(fix((i-1)/r)+1,fix((j-1)/r)+2)*w6+beta(fix((i-1)/r)+2,fix((j-1)/r)+1)*w7+beta(fix((i-1)/r)+2,fix((j-1)/r)+2)*w8;
            m=m+1;
        end
    end
    m=1;
    if i>r*n
        n=n+1;
    end
end

```

Ritaglio delle immagini nel visibile

```
%----- Codice Ritaglio Immagini -----%
%----- Upload delle immagini -----%

[fname,pname] = uigetfile('C:\Users\feder\Desktop\JPG','Immagine1');
%Attenzione a selezionare correttamente il path e l'estensione del file da
caricare
percorso_file=strcat(pname,fname);
nome_file_senza_estensione_corto=strtok(fname,'agine1');
D = dir('*.jpg');

%----- Ritaglio delle immagini e salvataggio -----%

imcell = cell(1,numel(D));
for i = 1:numel(D)
    imcell{i} = imread(D(i).name);
    Imm=imcrop(imcell{i}, [110 1 7071 5303]);
    numero_file=num2str(i);
    estensione='.jpg';

    nome_file_estensione=strcat(nome_file_senza_estensione_corto,numero_file,estensione);
    imwrite(Imm,nome_file_estensione,"jpg");
end
```

Bibliografia

- Gerald C. Holst: *Common Sense Approach To Thermal Imaging*. JCD Publishing, SPIE OPTICAL ENGINEERING PRESS.
- Arnold Daniels: *Infrared Systems*. SPIE Field Guide Volume FG09
- M. Vollmer, K.-P. Möllmann: *Infrared Thermal Imaging, Fundamentals, Research and Applications*.
- Jose Ignacio Priego Quesada: *Application of Infrared Thermography in Sports Science*. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering. Springer
- John David Vincent, Steven E. Hodges, John Vampola, Mark Stegall, Greg Pierce: *Fundamentals of Infrared and Visible Detector Operation and Testing*.
- Antoni Rogalski: *Infrared Detectors*. CRC Press.
- Otwin Breitenstein, Wilhelm Warta, Martin C. Schubert: *Lock-in Thermography, Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials*. Springer Series in Advanced Microelectronics.
- Helmut Budzier, Gerald Gerlach: *Thermal Infrared Sensors, Theory Optimisation and Practice*.
- S. Lagüela, J. Martínez, J. Armesto, P. Arias: *Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies*. Energy and Buildings 43 (2011) 1216–1221.
- Yong K. Cho, Youngjib Ham, Mani Golpavar-Fard: *3D as-is building energy modeling and diagnostics: A review of the state-of-the-art*. Advanced Engineering Informatics 29 (2015) 184–195.
- Ivo Campione, Francesca Lucchi, Nicola Santopuoli and Leonardo Seccia: *3D Thermal Imaging System with Decoupled Acquisition for Industrial and Cultural Heritage Applications*.
- Marie-Marthe Groz, Emmanuelle Abisset-Chavanne, Anissa Meziane, Alain Sommier and Christophe Pradère: *Three-Dimensional Reconstruction of Thermal Volumetric Sources from Surface Temperature Fields Measured by Infrared Thermography*.
- Emanuele Mandanici, Luca Tavasci, Francesco Corsini, Stefano Gandolfi: *A multi-image super-resolution algorithm applied to thermal imagery*.

- Dong Lina, Malgorzata Jarzabek-Rychardb, Xiaochong Tongc, Hans-Gerd Maasa: *Fusion of thermal imagery with point clouds for building façade thermal attribute mapping.*
- S. Lagüela, J. Armesto, P. Arias, J. Herráez b: *Automation of thermographic 3D modelling through image fusion and image matching techniques.*
- José L. Lerma, Santiago Navarro, Miriam Cabrelles, Ana E. Seguí: *CAMERA CALIBRATION WITH BASELINE DISTANCE CONSTRAINTS.* The Photogrammetric Record 25(130): 140–158 (June 2010).
- Gennaro Cardone, Andrea Ianiro, Gennaro dello Ioio, Andrea Passaro: *Temperature maps measurements on 3D surfaces with infrared thermography.*
- D.M. Bulanona, T.F. Burksa, V. Alchanatisb: *Image fusion of visible and thermal images for fruit detection.* Research Paper: AEdAutomation and Emerging Technologies.
- Mario Ivan Alba, Luigi Barazzetti, Marco Scaioni, Elisabetta Rosina and Mattia Previtali: *Mapping Infrared Data on Terrestrial Laser Scanning 3D Models of Buildings.* Remote Sens. 2011, 3, 1847-1870.
- S Laguela, H Gonzalez-Jorge, J Armesto and J Herraез: *High performance grid for the metric calibration of thermographic cameras.* MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY.
- Dorota Iwaszczuk, Ludwig Hoegner and Uwe Stilla: *Matching of 3D building models with IR images for texture extraction.*
- D. González-Aguileraa. Rodríguez-Gonzálvez , J. Armesto , S. Lagüela: *Novel approach to 3D thermography and energy efficiency evaluation.* Energy and Buildings 54 (2012) 436–443
- S. Lagüela, L. Díaz-Vilariño, J. Armesto and P. Arias: *Thermographic 3D models as the foundation for Building Information Models.* 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography
- by P. Bison, A. Bortolin, G. Cadelano, G. Ferrarini, K. Furlan, E. Grinzato: *Geometrical correction and photogrammetric approach in thermographic inspection of buildings.* 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography

- E. Grinzato, V. Vavilov, T. Kauppinen: *Quantitative infrared thermography in buildings*. Energy and Buildings 29 (1998) 1-9
- Dong Lin, Lutz Bannehr, Christoph Ulrich and Hans-Gerd Maas: *Evaluating Thermal Attribute Mapping Strategies for Oblique Airborne Photogrammetric System AOS-Tx8*
- Iole Nardia, Elena Lucchib, Tullio de Rubeisa, Dario Ambrosinia: *Quantification of heat energy losses through the building envelope: A state-of-the-art analysis with critical and comprehensive review on infrared thermography*.
- M. Hassanalian, A. Abdelkefi: *Classifications, applications, and design challenges of drones: A review*.
- *Manuale di termografia ad infrarossi per il mercato delle costruzioni e delle energie rinnovabili*. FLIR.
- *REGOLAMENTO DI ESECUZIONE (UE) 2019/947 DELLA COMMISSIONE del 24 maggio 2019 relativo a norme e procedure per l'esercizio di aeromobili senza equipaggio;*
- *Regolamento UAS-IT;*
- *Regolamento ENAC: "Regole dell'aria Italia";*
- *Corso di Trasmissione del Calore, Scambio termico per Irraggiamento*. Professore Renato Ricci.
- *Corso di Trasmissione del Calore, Termografia Infrarossa*. Professore Renato Ricci.