

TESI DI LAUREA MAGISTRALE**DISPERSIONI ENERGETICHE DEGLI EDIFICI
SU SCALA URBANA:****Tecniche di rilevamento e condivisione**

RELATORE

Chia.mo Prof. Luigi Di Prinzio

CO-RELATORE

*Dott. Stefano Picchio**Dott. Ing. Carlo Finocchi*

STUDENTE

Pietro Alesi

Matricola: 270440

Sessione di laurea primaverile 2012

A.A. 2010-2011

Al mio piccolo Diego e alla Fedi
ed un ricordo speciale per Fabio

DISPERSIONI ENERGETICHE DEGLI EDIFICI SU SCALA URBANA: TECNICHE DI RILEVAMENTO E CONDIVISIONE

Abstract:

In un ottica di “Smart City”, l'efficienza energetica degli edifici riveste un ruolo fondamentale per l'attuazione di uno sviluppo sostenibile. La gestione ottimizzata delle risorse energetiche accompagnato ad un coinvolgimento diretto dei cittadini alle tematiche di risparmio – contenimento energetico, risultano essere delle priorità e degli elementi trainanti per lo sviluppo di una città intelligente. Il contenimento energetico potrebbe divenire uno strumento (avendo effetti diretti sui cittadini: risparmio economico sulla bolletta e sgravi fiscali, miglioramento della qualità della vita, ecc.) di coinvolgimento della popolazione alla partecipazione ad altri progetti, inglobati all'interno di un progetto più ampio di Smart City, che possa portare benefici comuni ed effetti duraturi nel tempo.

Considerando che mediamente le pareti (compresi di muri, porte e finestre) disperdono circa il 45-55 % di energia dell'intero fabbricato, il presente lavoro si pone l'obiettivo di individuare attraverso il rilevamento termografico terrestre la temperatura delle facciate degli edifici, per poter valutare lo stato di isolamento dell'edificio ed individuarne le dispersioni energetiche. A questo punto accompagnando la termografia ad altre tecniche di rilevamento ad alta definizione (laser scanner terrestre, voli lidar), si vuole creare uno strumento per la pubblicazione dei dati, sia su web che per altre forme partecipative, generando una mappa tematica sulle dispersioni energetiche accompagnandola a delle visualizzazioni 3D, in cui gli edifici risultano “vestiti” di una scansione termica. Tutto questo al fine di raggiungere l'obiettivo di sensibilizzazione dei cittadini e delle aziende alla tematica del contenimento energetico degli edifici.

Sommario

PREMESSA.....	6
1. OBIETTIVO	9
2. DEFINIZIONE DEL TEMA.....	11
2.1. SMART CITY	11
2.2. CONTENIMENTO ENERGETICO OBIETTIVO PER UNA CITTA' INTELLIGENTE	14
<u>2.2.1. FENOMENI AMBIENTALI CONNESSI AL CONSUMEO ENERGETICO DEI FABBRICATI</u>	<u>15</u>
2.2.1.1. CO2 ed innalzamento globale delle temperature	15
2.2.1.2. Particolato - polveri sottili in ambiente urbano	20
2.2.1.3. UHI: Urban Heat Island e misure di mitigazione e adattamento	23
2.3. EFFICIENZA ENERGETICA	27
<u>2.3.1. INTRODUZIONE.....</u>	<u>27</u>
<u>2.3.2. EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI.....</u>	<u>29</u>
2.3.2.1. Dispersioni termiche degli involucri edilizi	30
3. INQUADRAMENTO NORMATIVO.....	44
3.1. INTRODUZIONE.....	44
3.2. EXCURSUS NORMATIVO	44
<u>3.2.1. NORMATIVA COMUNITARIA.....</u>	<u>47</u>
<u>3.2.2. NORMATIVA NAZIONALE.....</u>	<u>48</u>
<u>3.2.3. NORMATIVA REGIONALE VENETO.....</u>	<u>53</u>
<u>3.2.4. P.A.T. COMUNE DI FELTRE.....</u>	<u>54</u>
4. INQUADRAMENTO TERRITORIALE (AREA DI STUDIO).....	56
5. PORTATORI DI INTERESSI E PARTECIPAZIONE	60
5.1. INTRODUZIONE.....	60
5.2. MAPPATURA DEI PORTATORI D'INTERESSI	61
5.3. IL PROCESSO PARTECIPATIVO.....	63
6. FONTI INFORMATIVE	67
6.1. TERMOGRAFIA TERRESTRE.....	68
<u>6.1.1. Introduzione</u>	<u>68</u>
<u>6.1.2. La temperatura.....</u>	<u>68</u>
<u>6.1.3. Lo spettro elettromagnetico e la banda dell'infrarosso</u>	<u>69</u>
<u>6.1.4. Principi fisici nell'infrarosso termico</u>	<u>72</u>

6.1.5.	<u>Termografia all'infrarosso e funzionamento della termocamera</u>	<u>77</u>
6.1.6.	<u>Descrizione dello strumento impiegato</u>	<u>81</u>
6.1.7.	<u>Termografia e valutazione delle dispersioni energetiche degli edifici.....</u>	<u>83</u>
6.2.	<u>SISTEMI A SCANSIONE LASER</u>	<u>87</u>
6.2.1.	<u>Principi del raggio laser e dei sistemi a scansione laser</u>	<u>87</u>
6.2.2.	<u>Rilievi Laser scanner terrestre</u>	<u>93</u>
6.2.3.	<u>Rilievi LIDAR da aereo.....</u>	<u>97</u>
7.	<u>ELABORAZIONE DATI</u>	<u>101</u>
7.1.	<u>SCHEMA DEL PIANO DI ELABORAZIONI</u>	<u>101</u>
7.1.1.	<u>Mosaicatura dei termogrammi.....</u>	<u>103</u>
7.1.2.	<u>Fotoraddrizzamento dell'immagine termografica</u>	<u>105</u>
7.1.3.	<u>Classificazione immagini termografiche.....</u>	<u>109</u>
7.1.4.	<u>Procedure per la classificazione dell'immagine termografica.....</u>	<u>113</u>
7.1.5.	<u>Costruzione della mappa tematica.....</u>	<u>120</u>
7.1.6.	<u>Modellazione 3D.....</u>	<u>125</u>
8.	<u>SVILUPPI FUTURI.....</u>	<u>140</u>
9.	<u>CONCLUSIONI</u>	<u>147</u>
	<u>BIBLIOGRAFIA</u>	<u>148</u>
	<u>SITOGRAFIA</u>	<u>149</u>

PREMESSA

Il presente lavoro nasce da un'idea avuta durante un viaggio di piacere nelle Alpi francesi, un paio di anni fa, nella città di Gap, quando spiegando ad una mia cugina residente nel luogo, di cosa mi stavo occupando nel mio corso di studi universitari, mi parlò di un progetto sviluppato dal Comune di Gap. Si trattava di un lavoro di monitoraggio delle dispersioni termiche delle coperture degli edifici, al fine di sensibilizzare la popolazione alla tematica delle dispersioni energetiche. Nell'inverno tra il 2006, è stata effettuata una campagna di rilevamento termografico nella zona urbana della città, tramite un elicottero con quota di volo compresa tra i 400-500m (thermographie aérienne). Il risultato finale fu la produzione di una mappa tematica a 6 classi, pubblicata su base catastale nel SIT comunale e seguita da incontri e riunioni con i cittadini, per spiegare il lavoro svolto e le tematiche connesse alle dinamiche di economia energetica (emissioni di CO₂, inquinamento atmosferico, risparmio economico, ecc.).

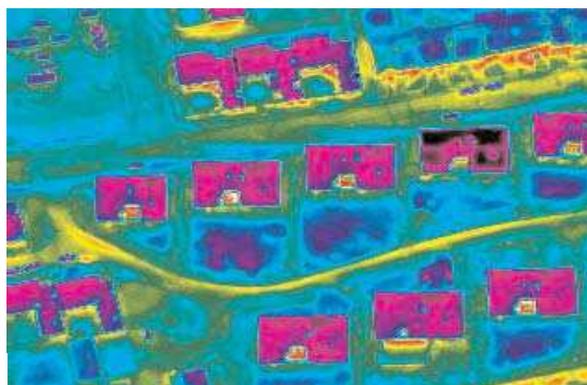


Figura 1: esempio di termografia aerea a colori



Figura 2: sistema informativo territoriale della ville di Gap, con mappa delle dispersioni termiche delle coperture

Anche in Italia, la tematica energetica in ambito residenziale, risulta essere di grande interesse, basti pensare che oltre un terzo dei consumi energetici è destinato all'uso abitativo, soprattutto a causa della climatizzazione invernale ed estiva. Oggi un'abitazione italiana standard consuma annualmente, soltanto per il riscaldamento, circa 20 litri di petrolio a metro quadro all'anno e a titolo di esempio in Lombardia si sono consumati solo nel 2007 oltre 12 milioni di tonnellate di petrolio per usi civili e terziari su un totale di circa 25 milioni annui. Questi consumi gravano decisamente sui bilanci delle famiglie, soprattutto in questo periodo di crisi economica; fortunatamente il contesto delle politiche internazionali sul settore energetico e dei consumi è notevolmente cambiato, costringendo il settore industriale dell'edilizia a profondi mutamenti. Il protocollo di Kyoto, prima, e il quarto rapporto dell'Intergovernmental Panel of Climate Changes (IPCC), presentato nel maggio 2007, hanno individuato nell'edilizia il settore che presenta la maggiore possibilità di risparmio energetico: attraverso investimenti mirati per il perseguimento dell'efficienza energetica nelle costruzioni, entro il 2020 si potrebbero evitare circa il 30% delle emissioni del comparto civile. Anche per la Commissione europea (Piano di Azione per l'Efficienza Energetica) è l'edilizia il settore caratterizzato dalle maggiori potenzialità di risparmio, sia nel comparto abitativo (che presenta margini di riduzione dei consumi al 2020 pari al 27%), che in quello terziario-commerciale (pari al 30%). La revisione 2009 delle Direttiva 2001/91/CE, ha stabilito che tutti gli edifici costruiti dopo il 2020 dovranno essere "nearly zero building" (cioè ad efficienza energetica ed energia rinnovabile prodotta sul posto, in modo tale da portare a consumi quasi a zero). Il settore pubblico dovrà anticipare al 2018 e promuovere l'efficienza degli edifici pubblici esistenti.

Per cui per attuare una diminuzione dei consumi energetici legati al settore civile, risulta fondamentale attuare interventi tipici della cultura della sostenibilità che prevedano scelte progettuali appropriate sulle nuove costruzioni, ma soprattutto che vadano ad intervenire sulla manutenzione del patrimonio edilizio esistente.

Questi interventi non dovranno però limitarsi al singolo edificio, ma occorrerà intervenire a scala urbana prevedendo inoltre la riorganizzazione di tutti i servizi dell'abitare e della città, come il trasporto delle persone e delle merci, il servizio energetico, l'uso e il riciclo dei materiali, l'acqua, gli spazi di aggregazione e socialità, la natura in città e l'agricoltura di prossimità.

In quest'ottica gli effetti sui cittadini dovrebbero concretizzarsi in un miglioramento delle condizioni ambientali, derivanti dalla riduzione delle emissioni di CO₂, riduzione del calore

immesso in ambiente urbano (che risulta essere uno dei fattori che influenzano le isole di calore urbane) e di particolato (PM10), con conseguente miglioramento della qualità della vita e del risparmio economico dei consumatori. Bisogna però tener presente che alcuni studi, hanno portato alla luce una problematica che potrebbe verificarsi come effetto di rimbalzo dell'efficienza energetica, detto anche "Paradosso di Jevons", in cui si afferma che i miglioramenti tecnologici che aumentano l'efficienza con cui una risorsa è usata possono fare aumentare il consumo totale di quella risorsa, invece di diminuirla. Per questo motivo risulta fondamentale la sensibilizzazione della popolazione alla tematica dell'efficienza energetica connessa alla problematica ambientale.

1. OBIETTIVO

Sulla base di tutto ciò, il presente lavoro si concentra sul tema del rilevamento delle dispersioni termiche degli edifici in un contesto urbano, al fine di valutare le condizioni di isolamento su una scala più ampia di quella della singola unità immobiliare. Il motivo deriva dal contesto di Smart City in cui si vuole operare, dove la città diventa intelligente, tramite l'integrazione di nuove tecnologie per il raggiungimento dell'obiettivo di sostenibilità urbana, dove il cittadino diventa attivo nella propria città, partecipando al miglioramento della qualità della vita. Per perseguire questi obiettivi risulta indispensabile sensibilizzare la popolazione alla tematica dell'efficienza energetica, si produrrà perciò una mappa tematica, da pubblicare su web in cui si potrà consultare lo stato di isolamento del proprio edificio, a cui sarà collegata una visualizzazione 3D dell'abitazione "vestita" con l'immagine termografica associata, la quale risulta essere di facile interpretazione e di grande impatto. Per produrre questi dati da pubblicare occorrerà integrare ed elaborare diverse tecnologie e dati quali termografie terrestri, immagini laser scanner, immagini lidar e cartografie di base. Il presente lavoro punta ad analizzare la sola tematica delle dispersioni energetiche dei fabbricati, divenendo uno strumento da poter impiegare all'interno di un progetto di Smart City più ampio, in cui altre tematiche vengono affrontate ed altre tecnologie impiegate, per poter creare una base di conoscenza, aggiornabile in tempo reale, che aiuti i decisori nelle proprie scelte.

Come caso di studio viene preso in considerazione una porzione del centro storico della città di Feltre, nel Bellunese.

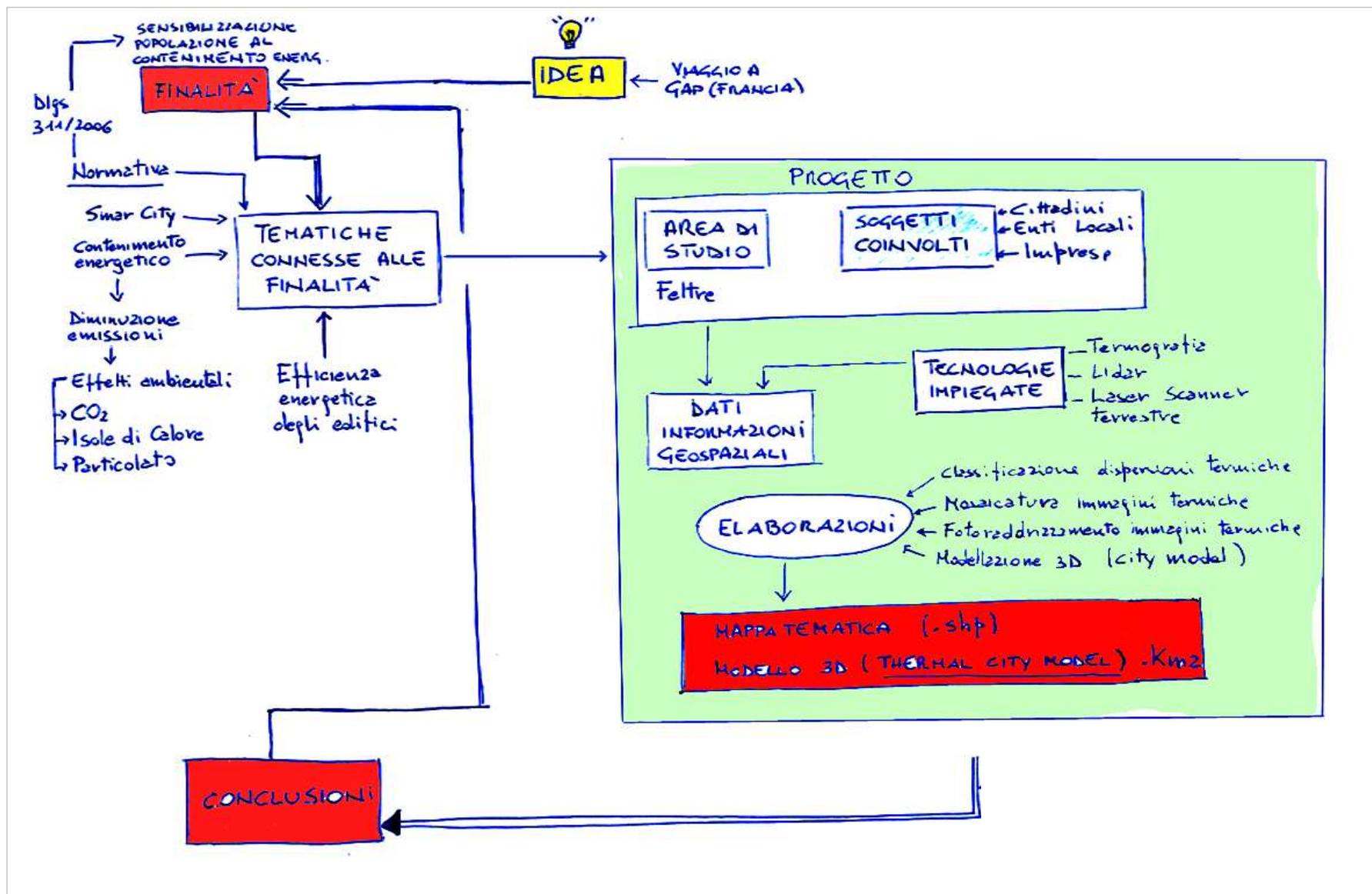


Figura 3: schema del lavoro di tesi

2. DEFINIZIONE DEL TEMA

2.1. SMART CITY

Secondo una recente indagine della Commissione Europea, circa quattro quinti della energia viene consumata nelle città dove si concentra l'attività insediativa, produttiva e di massimo impatto sull'ambiente. Basti pensare che oggi il 50% della popolazione mondiale vive in città e secondo le Nazioni Unite entro il 2050 il 75% della popolazione si sposterà in ambienti urbani, con predilezione per quelle a maggiore dimensione. Questa esponenziale crescita delle città sta trasformando l'intero ecosistema umano e rappresenta quindi uno dei nodi cruciali del nostro prossimo futuro, al punto che vale la pena focalizzare l'attenzione su un approccio che si sta diffondendo e può essere definito come "ecosistema urbano". L'ecosistema urbano si presenta come un addensamento geografico di reti di relazioni strutturali (frazioni, quartieri, strade, aree verdi, aree coltivate), materiali (scambi di merci, mobilità, rete idrica ed energetica) ed immateriali (comunicazione, servizi). In questo contesto la progettazione urbana deve fare molta attenzione, all'intero ciclo di vita dell'insediamento, a partire dall'impatto che tale progettazione genera sull'ambiente. Operare un approccio sistemico significa tenere conto dell'interrelazione di una moltitudine di flussi di materia e di energia che sono messi in moto dalle forze sociali e naturali che intervengono. Questo cambio di paradigma non è soltanto una opportunità, ma una necessità dovuta alla alterazione indotta dalla società dei consumi, che ha come motore il profitto immediato piuttosto che lo sviluppo sostenibile, e vede l'ambiente come un bacino di risorse da predare. In questo contesto di crisi urbana, l'equazione sostenibilità-connettività rappresenterà il terreno di grandi opportunità di trasformazione delle città per i prossimi anni, ma occorre cambiare il rapporto stesso tra tecnologia e società.

Uno degli obiettivi primari è che le tecnologie che si vanno sviluppando siano orientate alla soddisfazione dei reali bisogni dell'uomo ed al miglioramento della qualità della vita nello spazio urbano. La rete di relazioni urbane presenta molti livelli di opportunità per lo sviluppo di una tecnologia a misura d'uomo (human oriented technology). Nello spazio urbano è possibile creare nuovi modelli di interazione persona-ambiente che potrebbero avere la specifica finalità di creare scambio, coesione, informazione in contesti ibridi tra incontro fisico ed incontro nella rete virtuale (hybrid city e social network urbani). Molti oggetti urbani attualmente mono-funzione possono divenire multifunzionali. I lampioni della

illuminazione pubblica possono diventare intelligenti ed ospitare sistemi multisensoriali (traffico, qualità dell'aria, sicurezza, attività) così come chioschi, fermate e paline dell'autobus, panchine, giardini, manifesti, cassonetti, marciapiedi, alberi (interactive city). Perfino gli edifici pubblici possono essere dotati di una "pelle interattiva" per permettere comunicazione a distanza, dare informazioni, creare punti di incontro o di supporto sociale o di creazione collettiva.

Questo cluster di tecnologie e le sue applicazioni sono oggi identificate con il paradigma della Smart City. Con Smart City si intende un insieme coordinato di interventi che mirano a rendere la città più sostenibile da un punto di vista energetico-ambientale, sia nelle nostre case quanto nelle strade. Ma la sostenibilità è intesa anche nella qualità dei servizi urbani e nella qualità stessa della vita. Per realizzare questo "collante" tra tante tematiche si fa ampio utilizzo di tecnologie ICT (informazione e telecomunicazione) e soprattutto di "intelligenza" e di capacità di progettazione sistemica, da cui il nome "Smart". Ciò che differenzia questo approccio rispetto al passato è quello di vedere in una unica cornice tanti aspetti che fino ad oggi erano stati affrontati separatamente. Si pensa alla città come ad un insieme di reti interconnesse, quali la rete dei trasporti, la rete elettrica, la rete degli edifici, la rete della illuminazione, la rete delle relazioni sociali, la rete della pubblica illuminazione, dell'acqua, dei rifiuti e così via molte altre. L'accento è quindi sulla interazione tra rete e rete e tra cittadino e città, con l'obiettivo di fare in modo che la città si adatti sempre più al bisogno del cittadino ed il cittadino si attivi sempre più nella creazione della nuova città sostenibile. In questo senso si parla di *user produced city* o City 2.0, termine mutuato dal "web 2.0", dove un patrimonio collettivo significativo è creato sulla base della accumulazione delle interazioni di tante persone.

L'idea principale è quella di realizzare una infrastruttura di interazione urbana attraverso cui il cittadino possa partecipare direttamente all'adattamento progressivo dei servizi urbani ed in definitiva alla rimodellazione del tessuto relazionale urbano secondo una logica di service on demand, a partire dalle tematiche energetiche (energy on demand) su cui possono generarsi risparmi energetico-ambientali e margini economici per auto-sostenere gli investimenti. Occorre perciò fornire un servizio nel momento in cui davvero qualcuno ne ha bisogno: per questo devono essere monitorate le richieste, i bisogni dei cittadini. L'idea è quella di strutturare una ampia rete sensoristica urbana e di trasmissione, riconducendo tutta la parte di monitoraggio dei dati ad un insieme di contenitori connessi

(smart city server network) in modo che le successive applicazioni possano colloquiare con questo e disporre di un vasto parco di dati real time.

La Smart City nasce quindi dalla convergenza di due spinte molto forti. La prima è quella energetico-ambientale: si tratta di agire sulle città in modo da introdurre efficienza energetica, ma anche funzionalità, quindi un diverso modo di intendere la mobilità, rispetto per l'ambiente, ecc. La seconda è invece la spinta che viene dai settori più umanistici e che riguarda da una parte il contributo che i cittadini stessi possono dare tramite un loro coinvolgimento diretto, e dall'altra il tema dello sviluppo economico.

Questi due mondi finora hanno viaggiato in modo separato anche nella progettazione urbanistica, ma oggi finalmente stanno convergendo. In una Smart City l'approccio a tutti questi elementi è di tipo sistemico. Si propone di considerare aspetti legati all'energia e all'ambiente, efficienza energetica negli edifici (che verrà sviluppata in questo lavoro), introduzione delle rinnovabili, illuminazione pubblica, monitoraggio dell'impatto ambientale sulla qualità dell'aria, mobilità e tematiche relative alla partecipazione sociale sistemi per la comunicazione con l'utente in maniera integrata. Oggi si è capito che è possibile intraprendere un approccio integrato dal punto di vista della progettazione della città, non solo dal punto di vista tecnologico.



Figura 4: logo del progetto europeo Smart City

La realizzazione di progetti Smart City risulta comunque complessa e richiede investimenti significativi; questo risulta essere un problema in questo periodo di crisi economica, o per mancanza di fondi da parte delle amministrazioni o a causa del patto di stabilità che molto spesso blocca fondi esistenti rendendoli effettivamente non utilizzabili. La Comunità Europea interviene sulla realizzazione di questi progetti, tramite

bandi, che possono però coprire solo parzialmente tali spese. Per questi motivi occorre individuare dei progetti che siano in grado di avere un ritorno economico che possano in seguito coprire le spese iniziali.

Volendo infine definire una Smart City si può utilizzare quella impiegata dalla Comunità Europea e cioè come "tentativo di schematizzare un modello di città più intelligente, più

sostenibile”, in cui si associa l’uso razionale delle risorse con l’integrazione delle nuove tecnologie.

2.2. CONTENIMENTO ENERGETICO OBIETTIVO PER UNA CITTA’ INTELLIGENTE

Il concetto di Smart City quindi si concretizza in diversi campi di applicazione che hanno in comune sia il contesto in cui sono inseriti che la finalità di sviluppo sostenibile e intelligente delle città, in particolare ci si riferisce a diversi settori:

- mobilità;
- ambiente – energia;
- turismo e cultura;
- economia della conoscenza e della tolleranza;
- trasformazioni urbane per la qualità della vita.

Con il presente lavoro ci si soffermerà in particolare alla tematica dell’ambiente – energia e del miglioramento della qualità della vita, soprattutto in riferimento alla questione del contenimento energetico dei fabbricati.

La Comunità Europea definisce come obiettivo prioritario per il raggiungimento di una città intelligente, la gestione ottimizzata delle risorse energetiche. Infatti il risparmio energetico rappresenta il principale elemento propulsore dello sforzo innovativo, volto a ridurre i costi della bolletta energetica, riuscendo in questo modo a focalizzare l’attenzione del cittadino in un’ottica di partecipazione, fondamentale alla buona riuscita di un progetto di città Smart. La tematica energetica, andando direttamente ad agire sulle tasche della popolazione risulta essere di grande interesse, questo potrebbe divenire l’elemento trainante per la realizzazione di altri progetti con tematiche diverse.

Il contenimento energetico quindi oltre a produrre una diminuzione di costi per il calo della domanda, produce effetti che risultano di fondamentale importanza per la salute ambientale e umana, ci si riferisce in particolare:

- alla diminuzione di produzione di **CO2**, principale responsabile dell’innalzamento globale delle temperature,
- alla diminuzione di immissione di particolato primario in atmosfera, causa del fenomeno degli **aerosol urbani o PM10**,
- alla diminuzione del fenomeno delle **isole di calore in ambiente urbano** che produce non pochi problemi soprattutto durante i periodi estivi.

Per mostrare l'influenza che il riscaldamento e raffreddamento degli edifici hanno nel campo energetico, si possono riportare alcuni dati:

- in Europa gli edifici consumano il 40% dell'energia e producono il 36% delle emissioni di anidride carbonica (CO₂).
- Secondo L'APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente), in Italia l'influenza residenziale e terziaria ha un impatto dell'11% sulla produzione di PM₁₀ in atmosfera.
- In estate, nelle grandi città delle nostre latitudini (Centro - Nord Italia), l'aggiunta di calore di origine antropica è dell'ordine di 10-20 Watt per metro quadrato, una quantità grosso modo pari al 10% di quella in arrivo dal sole.

2.2.1. FENOMENI AMBIENTALI CONNESSI AL CONSUMEO ENERGETICO DEI FABBRICATI

Di seguito verranno brevemente descritti i tre fenomeni sopra riportati che risultano in parte, chi più chi meno, influenzati dal consumo energetico derivante dai fabbricati, con particolare riferimento al processo di combustione dovuto al riscaldamento domestico, o alla produzione di energia per il raffreddamento estivo.

2.2.1.1. CO₂ ed innalzamento globale delle temperature

Le emissioni di gas serra prodotti dalle attività umane sono in aumento e sono la principale causa delle concentrazioni di questi gas nell'atmosfera. La quasi totalità della comunità scientifica, risulta concorde su questa affermazione.

La teoria scientifica, collega le emissioni di alcuni gas, con le variazioni climatiche, con conseguenti danni per l'umanità e gli ecosistemi. Di seguito verrà schematizzata brevemente questa teoria in nove punti:

- *Emissioni di gas serra e loro accumulo in atmosfera.* Le attività umane emettono ingenti quantità di anidride carbonica e altri gas serra. Le emissioni di origine antropica sono in grado di sbilanciare i cicli naturali di questi gas; il risultato è il loro accumulo in atmosfera.
- *Aumento di concentrazione di gas serra.* L'aumento delle concentrazioni di gas serra in atmosfera negli ultimi 150 anni è di origine antropica. I livelli raggiunti dai gas serra, in particolare CO₂, sono i più elevati da centinaia di migliaia di anni, da quando l'uomo esiste sulla Terra

-
- *Legame aumento gas serra – aumento di temperatura.* Un aumento dei livelli di gas serra in atmosfera, genera un aumento della temperatura media del pianeta. Direttamente o per effetto di “retroazioni” (ad esempio l’aumento di vapore d’acqua conseguente un aumento della temperatura). La variazione di temperatura non è distribuita omogeneamente sul pianeta, ma il risultato finale è un innalzamento della temperatura media degli strati superficiali dell’atmosfera e degli oceani. Elevati aumenti di gas serra in atmosfera porteranno a consistenti aumenti di temperatura.
 - *Aumento di temperatura già registrata.* La temperatura media della superficie del pianeta è aumentata in modo anomalo negli ultimi decenni. Tale aumento di temperatura è il più elevato da migliaia di anni. Una parte importante di questo aumento di temperatura è di origine antropica.
 - *Variazioni climatiche e impatti già registrati.* Gli aumenti di temperatura registrati nell’ultimo secolo, hanno già portato a variazioni climatiche e a impatti sull’ambiente, sulle attività umane e sugli ecosistemi.
 - *Variazioni climatiche per aumenti futuri di gas serra.* Rilevanti aumenti di temperatura possono portare a importanti cambiamenti climatici, con conseguenze potenzialmente molto pericolose per l’uomo e per le altre specie viventi. In particolare l’esame degli scorsi cicli dei periodi glaciali e interglaciali, mostra che incrementi di temperatura di pochi gradi rispetto ai livelli odierni, sono stati accompagnati dalla deglaciazione di parti importanti delle calotte polari, con importanti aumenti del livello medio del mare.
 - *Rilevanza dei danni futuri per l’uomo e la natura.* Le variazioni climatiche possono portare importanti impatti sull’ambiente e danni per le attività umane e in generale per gli ecosistemi. Questi danni sono maggiori dei costi per **l’adattamento** ai cambiamenti climatici. Le azioni di adattamento per ridurre gli impatti, sono comunque necessarie perché non sarà possibile evitare completamente altri cambiamenti climatici.
 - *Necessità di interventi urgenti per ridurre le emissioni.* Sono necessari interventi urgenti di **mitigazione** per ridurre il più possibile le emissioni di gas serra.
 - *Utilità del protocollo di Kyoto.* Il protocollo di Kyoto è un primo passo e i suoi costi sono ampiamente sopportabili dal sistema economico mondiale.

I principali gas ritenuti responsabili dei cambiamenti climatici sono sei, secondo quanto affermato dal IPCC¹ nel 2006 (Intergovernmental Panel on Climate Change):

- CO₂: anidride carbonica
- CH₄: metano
- N₂O: protossido di azoto
- SF₆: esafluoruro di zolfo
- HFCs: idrofluoruri carburi
- PFCs: perfluorocarburi

La CO₂ risulta essere il principale dei gas serra. Per capire la quantità di questo gas emesso in atmosfera, si può fare una stima, delle emissioni. Conoscendo la quantità e la tipologia di combustibili bruciati o di alcune produzioni industriali, è possibile eseguire il calcolo impiegando alcuni coefficienti chiamati fattori di emissione. È possibile stimare anche la variazione degli assorbenti o dei rilasci di CO₂ per effetto della variazione di utilizzo di uso del suolo (es. un'area forestata che diviene agricola o un area agricola che diviene edificata). Tramite misurazioni da satellite e tramite la gestione dei dati con sistemi informativi geografici, è possibile stimare i flussi di CO₂ derivanti da diversi ecosistemi.

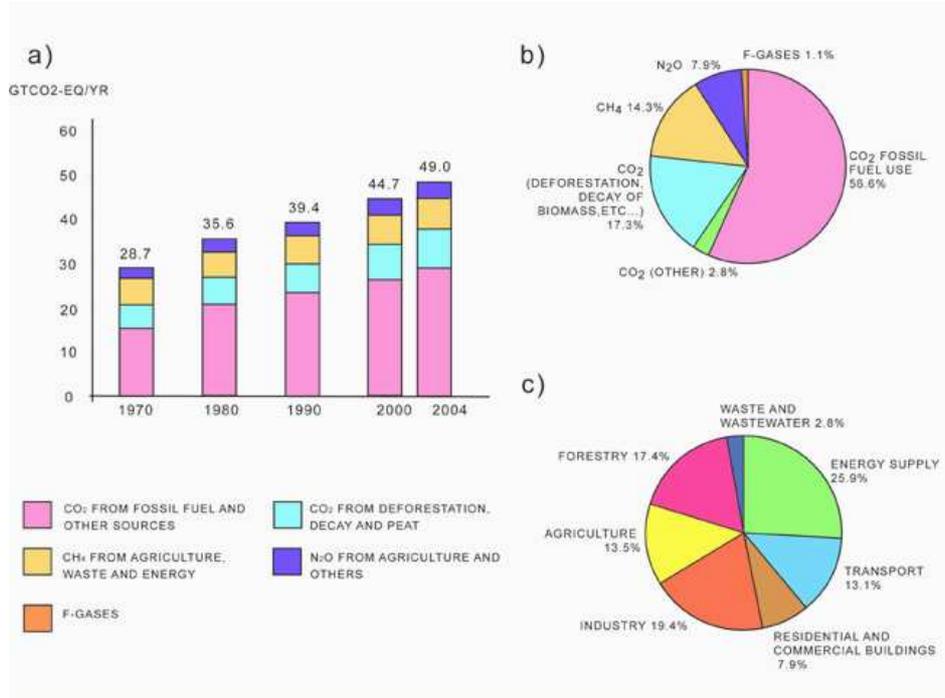


Figura 5: Emissioni mondiali di gas serra di origine antropica espresse in GtCO₂ eq. (a) Variazione delle emissioni annue dal 1970 al 2004; (b) Emissioni del 2004 divise per gas; (c) Emissioni del 2004 divise per fonte. Si nota il ruolo preponderante dovuto all'utilizzo dei combustibili fossili; le emissioni dovute all'allevamento sono comprese in quelle dovute all'agricoltura. (fonte: IPCC WGIII, 2007)

Per gli altri gas serra sopra elencati, le stime risultano più difficili, i coefficienti che servono per stimare le emissioni (fattori di emissione), sono molto variabili a seconda delle

¹ L'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), organismo scientifico dell'ONU sui cambiamenti climatici. Svolge un ruolo per valutare lo stato delle conoscenze sui cambiamenti climatici e sulle politiche di mitigazione.

tecnologie e dei combustibili. In questo caso le stime sono più elaborate, le incertezze sono maggiori, ma è comunque possibile quantificare le emissioni a livello globale. Il metano in particolare risulta tra i più difficili da stimare a causa sia delle emissioni in atmosfera che derivano da sorgenti naturali indirettamente collegate all'attività umana, come le emissioni di metano derivanti dalla fusione del permafrost², o dalle emissioni derivanti dalle zone umide. Per questo motivo non è del tutto chiaro il contributo del metano sui cambiamenti climatici, ma decisamente risulta minore di quello della CO₂.

Oltre a questi sei gas, comunque, esistono altri gas in grado di comportarsi come gas serra (es. azoto O₃), ma i sei gas sopra citati risultano essere i più importanti, infatti ad essi si fa riferimento nel protocollo di Kyoto.

Occorre fare comunque una precisazione riguardo all'emissione di CO₂ in atmosfera. I fattori antropogenici non sono le uniche fonti di emissioni di anidride carbonica, anzi le sorgenti principali di CO₂ in atmosfera sono di origine naturale, come la fotosintesi, o la respirazione degli esseri viventi terrestri e oceanici. Le fonti di emissione di origine naturale sono però in uno stato di equilibrio. Il problema principale deriva dalle perturbazioni esterne che, anche se di modeste dimensioni rispetto ai valori totali di emissione di CO₂, tendono ad alterare lo stato di equilibrio che si è mantenuto costante all'incirca negli ultimi diecimila anni. Per questo motivo quando si parla di cambiamenti climatici e di CO₂ in atmosfera, si fa riferimento alle perturbazioni antropogeniche che modificano lo stato di equilibrio naturale e non alla totalità di CO₂ emessa.

Le principali fonti antropiche di emissione di gas serra risultano:

- la produzione di energia per usi civili e industriali
- i trasporti
- l'allevamento
- l'agricoltura
- lo smaltimento dei rifiuti

Mediamente in Europa ogni cittadino in un anno produce circa 11 tonnellate di emissioni di gas serra, di cui quasi 9 tonnellate sono di CO₂.

² Con Permafrost sono definiti quei terreni, che costituiscono il 2% delle terre emerse, caratterizzati da uno strato superficiale ghiacciato, che si estende da pochi centimetri a diversi metri di profondità e che si scioglie durante l'estate per ricongelare d'inverno

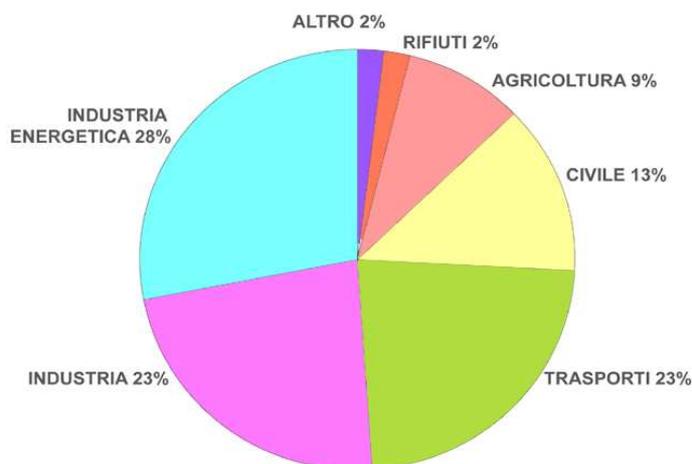


Figura 6: Emissioni percentuali di gas serra in Italia per fonte nell'anno 2000. Nella fonte "civile" sono inclusi gli usi domestici, il terziario e la pubblica amministrazione (Ministero dell'Ambiente, 2003). Le percentuali italiane sono allineate con quelle complessive dell'Unione Europea.

Ciascuna di queste fonti ha un peso diverso. In Italia, ad esempio, quasi i tre quarti delle emissioni di gas serra sono dovute alla produzione di energia, alle attività industriali e ai trasporti. Le emissioni di gas serra di origine umana non sono distribuite omogeneamente nel mondo: vi sono molte differenze tra i diversi continenti e anche da stato a stato. In particolare per quel che riguarda l'ambito energetico, il consumo di energia è decisamente aumentato nel corso degli anni, con valori pro-capite molto vari nelle diverse parti della Terra (in particolare risultano consumi molto elevati nella zona dell'America settentrionale e nel continente oceanico).

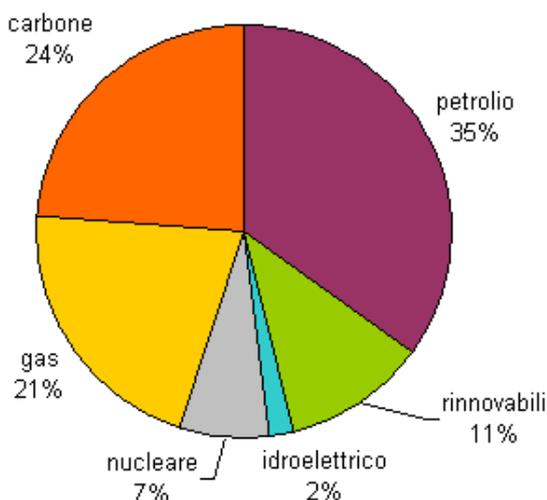


Figura 7: Produzione mondiale di energia distinta per fonte (International Energy Agency, 2004). L'energia da fonti rinnovabili include energia eolica, solare (fotovoltaica), da biomasse e geotermica. L'energia idroelettrica è considerata a parte.

Per quel che riguarda invece le fonti di produzione energetica, bisogna ricordare che l'80% di energia viene prodotta da combustibile fossile (carbone, gas, petrolio).

Di quest'energia prodotta, i principali consumatori, in Europa e in Italia, risultano essere il sistema produttivo, il sistema dei trasporti e il sistema domestico (di cui ci si occuperà in particolare nel presente lavoro), il quale consuma da solo oltre un terzo del consumo di energia dell'UE, con considerevoli quantità di emissione di CO₂. La maggior parte di questi consumi domestici nei paesi dell'Unione Europea serve per il funzionamento degli impianti di riscaldamento e di condizionamento degli edifici. Il resto dei consumi serve per l'illuminazione, il funzionamento degli apparecchi elettrici (frigorifero, lavatrice, lavastoviglie, televisione, etc.), la produzione di acqua calda e gli usi cucina.

2.2.1.2. Particolato - polveri sottili in ambiente urbano

Il particolato, o polveri sottili è sostanzialmente l'insieme delle sostanze sospese in aria (fibre, particelle carboniose, metalli, silice, inquinanti liquidi o solidi).

Il particolato è l'inquinante che oggi è considerato di maggiore impatto nelle aree urbane, ed è composto da tutte quelle particelle solide e liquide disperse nell'atmosfera, con un diametro che va da pochi nanometri fino ai 500 micron e oltre (cioè da miliardesimi di metro a mezzo millimetro).

Fra i fattori naturali vi sono ad esempio:

- polvere, terra, sale marino alzati dal vento (il cosiddetto "aerosol marino"),
- incendi,
- microrganismi,
- pollini e spore,
- erosione di rocce,
- eruzioni vulcaniche,
- polvere cosmica.

Fra i fattori antropici si include gran parte degli inquinanti atmosferici:

- emissioni della combustione dei motori a combustione interna (autocarri, automobili, aeroplani);
- emissioni del riscaldamento domestico (in particolare gasolio, carbone e legna);
- residui dell'usura del manto stradale, dei freni e delle gomme delle vetture;
- emissioni di lavorazioni meccaniche, dei cementifici, dei cantieri;
- lavorazioni agricole;
- inceneritori e centrali elettriche;
- fumo di tabacco.

Il rapporto fra fattori naturali ed antropici è molto differente a seconda dei luoghi. È stato stimato che in generale le sorgenti naturali contribuiscono per il 94% del totale lasciando al fattore umano meno del 10%. Tuttavia queste proporzioni cambiano notevolmente nelle aree urbane dove sono senza dubbio il traffico stradale e il riscaldamento (ma molto poco se a gas), nonché eventuali impianti industriali (raffinerie, cementifici, centrali termoelettriche, inceneritori ecc.) a costituire l'apporto preponderante.

Altro aspetto riguarda la composizione di queste polveri. In genere il particolato prodotto da processi di combustione, siano essi di origine naturale (incendi) o antropica (motori, riscaldamento, industrie, centrali elettriche, ecc.), è caratterizzato dalla presenza preponderante di carbonio e sottoprodotti della combustione; si definisce pertanto "particolato carbonioso". Esso è considerato in linea di massima e con le dovute eccezioni più nocivo nel caso in cui sia prodotto dalla combustione di materiali organici particolari quali ad esempio le plastiche, perché può trasportare facilmente sostanze tossiche residue di tale genere di combustione (composti organici volatili, diossine, ecc.). Per quanto riguarda i particolati "naturali", molto dipende dalla loro natura, in quanto si va da particolati aggressivi per le infrastrutture quale l'aerosol marino (fenomeni di corrosione e danni a strutture cementizie), a particolati nocivi come terra o pollini, per finire con particolati estremamente nocivi come l'asbesto³.

Facendo riferimento in particolare alle fonti antropiche occorre precisare che negli impianti non dotati di tecnologie specifiche atte all'emissione delle sostanze, la dimensione del particolato è tanto minore quanto è maggiore la temperatura di esercizio. Quindi in qualunque impianto di combustione (dalle caldaie, agli inceneritori, fino ai motori delle automobili e dei camion) un innalzamento della temperatura (al di sotto comunque di un limite massimo) migliora l'efficienza della combustione e dovrebbe perciò diminuire la quantità complessiva di materiali parzialmente incombusti (dunque di particolato).

Per quanto riguarda l'influenza delle sorgenti antropiche sull'emissione delle polveri, si fa riferimento ad alcuni dati pubblicati da comitati e istituti, ad esempio lo SCHER⁴, il quale afferma che le maggiori emissioni di polveri fini (questa la dicitura esatta usata, intendendo

³ L'asbesto (o amianto) è un insieme di minerali del gruppo dei silicati, appartenente alle serie mineralogiche del serpentino e degli anfiboli. È stata ormai accertata la sua nocività per la salute, che ha portato a vietarne l'uso in molti Paesi. Le polveri di amianto, respirate, provocano infatti l'asbestosi, nonché tumori della pleura, ovvero il mesotelioma pleurico e dei bronchi, ed il carcinoma polmonare

⁴ Scientific Committee on Health and Environmental Risks, Comitato UE per i rischi per la salute e ambientali

PM_{2,5}) è data dagli scarichi dei veicoli, dalla combustione di carbone o legna, processi industriali ed altre combustioni di biomasse. Secondo i dati dell'APAT (Agenzia per la protezione dell'ambiente) riferiti al 2003, la produzione di PM₁₀ in Italia deriverebbe: per il 49% dai trasporti; per il 27% dall'industria; per l'11% dal settore residenziale e terziario; per il 9% dal settore agricoltura e foreste; per il 4% dalla produzione di energia. Secondo uno studio del CSST su incarico dell'Automobile Club Italia, sul totale delle emissioni di PM₁₀ in Italia il 29% deriverebbe dagli autoveicoli a gasolio, e in particolare l'8% dalle automobili in generale e l'1-2% dalle auto Euro3 ed Euro4.

Il particolato può essere classificato sia in modo qualitativo che quantitativo. In base alle dimensioni e alla natura delle particelle sospese, la classificazione qualitativa prevede:

- Aerosol: particelle liquide o solide sospese di diametro minore di 1 μm ; sono dispersioni di tipo colloidale, che causano, ad esempio, all'alba e al tramonto, l'effetto Tyndall, facendo virare il colore della luce solare verso l'arancione.
- Esalazioni: particelle solide di diametro < 1 μm , in genere prodotte da processi industriali.
- Foschie: goccioline di liquido di diametro < 2 μm .
- Fumi: particelle solide disperse di diametro < 2 μm , trasportate da prodotti della combustione.
- Polveri: particelle solide di diametro variabile tra 0,25 e 500 μm .
- Sabbie: particelle solide di diametro > 500 μm .

Per quanto attiene invece alla classificazione quantitativa si fa riferimento alle dimensioni, tramite il Particulate Model, abbreviato con la sigla PM seguita dal diametro aerodinamico massimo delle particelle espresso in micron (μm):

- Particolato grossolano; particolato sedimentabile di dimensioni superiori ai 10 μm , non in grado di penetrare nel tratto respiratorio superando la laringe, se non in piccola parte
- PM₁₀; particolato formato da particelle inferiori a 10 micron (μm), è una polvere inalabile, ovvero in grado di penetrare nel tratto respiratorio superiore (naso e laringe).
- PM_{2,5}; particolato fine con diametro inferiore a 2,5 μm (un quarto di centesimo di millimetro), è una polvere toracica, cioè in grado di penetrare profondamente nei polmoni, specie durante la respirazione dalla bocca.

Per dimensioni ancora inferiori (particolato ultrafine, UFP o UP) si parla di polvere respirabile, cioè in grado di penetrare profondamente nei polmoni fino agli alveoli;

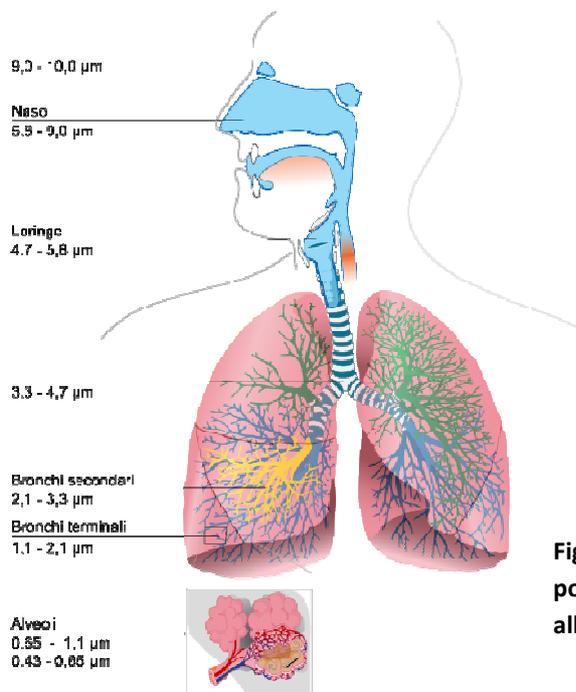


Figura 8:schema delle penetrazioni delle polveri nell'apparato respiratorio in case alla loro dimensione

- PM1, con diametro inferiore a 1 µm
- PM0,1, con diametro inferiore a 0,1 µm
- nanopolveri, con diametro dell'ordine di grandezza dei nanometri (un nanometro sarebbe PM 0,001).

2.2.1.3. UHI: Urban Heat Island e misure di mitigazione e adattamento

Una particolarità climatica dell'ambiente urbano è la frequente presenza di un'anomalia di temperatura che prende il nome di "isola di calore urbano" ("Urban Heat Island": Geiger, 1961). Questo fenomeno determina un microclima più caldo delle aree urbane cittadine, rispetto alle circostanti zone periferiche e rurali. Queste differenze di temperatura possono essere molto marcate, specialmente nella stagione invernale, in presenza di condizioni di alta pressione e calma di vento. Nel ciclo diurno la differenza è particolarmente apprezzabile a partire da qualche ora dopo il tramonto, in quanto l'ambiente urbano comincia a raffreddarsi con notevole ritardo, rispetto a quello rurale circostante, e più lentamente, a causa del calore accumulato principalmente dagli edifici.

Le possibili cause che portano alla formazione dell'isola di calore sono state investigate da Oke (1987) e più recentemente da Christen & Vogt (2004), e possono essere riassunte nei seguenti processi:

- raffreddamento radiativo minore a causa della riduzione del fattore di vista del cielo (sky view factor) causato dalla presenza di edifici elevati;

- aumento dell'assorbimento della radiazione solare a causa di un differente albedo, unito a riflessioni multiple nei canyon urbani;
- grande accumulo diurno di calore negli edifici e successiva cessione notturna;
- aumento del rapporto di Bowen¹⁸ (Bowen Ratio, B0) fra flusso di calore latente e sensibile, a causa della scarsa presenza di vegetazione e dell'elevata impermeabilità dei materiali;
- immissione diretta o indiretta di calore nei canyon urbani;
- riduzione del mescolamento atmosferico a causa della scarsa ventilazione provocata dalla presenza di edifici alti che aumentano la scabrezza.

L'isola di calore risulta essere un'altra forma di cambiamento climatico, di origine prettamente antropica, in cui avviene il riscaldamento dovuto all'urbanizzazione dello strato limite atmosferico (Boundary Layer)⁵. In ambito urbano il Boundary Layer è condizionato dalla presenza dell'Urban Canopy Layer, lo strato climatico che va dalla linea di terra (0 metri) fino all'altezza degli edifici, che presenta caratteristiche intrinseche differenti tra città e città (altezza degli edifici, materiali da costruzione di facciate e tetti, tessuto urbano, rapporto tra aree verdi, aree libere e aree edificate). Il risultato dell'interazione tra il Boundary Layer, il Canopy Layer e la superficie urbana (Surface Layer) è la presenza sopra la città di un'Isola di Calore. All'interno del Canopy Layer la temperatura cresce durante la giornata, con un massimo nelle ore notturne, effetto del rilascio di calore assorbito durante le ore diurne dai materiali che compongono la città.

In altri termini la superficie urbana assorbe più energia solare rispetto alle aree rurali. La questione è in realtà più complessa, perché differenze di colore, rugosità, umidità e capacità di intrappolare la radiazione a onda lunga (effetto di canyoning stradale) possono assumere un'importanza pari o superiore rispetto alla natura delle superfici. Inoltre, la città stessa è fonte di produzione di energia, che si va a sommare a quella della radiazione solare incidente, a causa delle attività antropiche principalmente legate al riscaldamento, o più in generale al condizionamento della temperatura indoor, e dai trasporti. In complesso dunque la città è più ricca d'energia rispetto alla campagna e tale squilibrio aumenta a causa delle fonti di calore immesse direttamente.

⁵ Boundary Layer: strato limite atmosferico più vicino al suolo la cui altezza varia da poche decine di metri a circa 1000-2000 metri

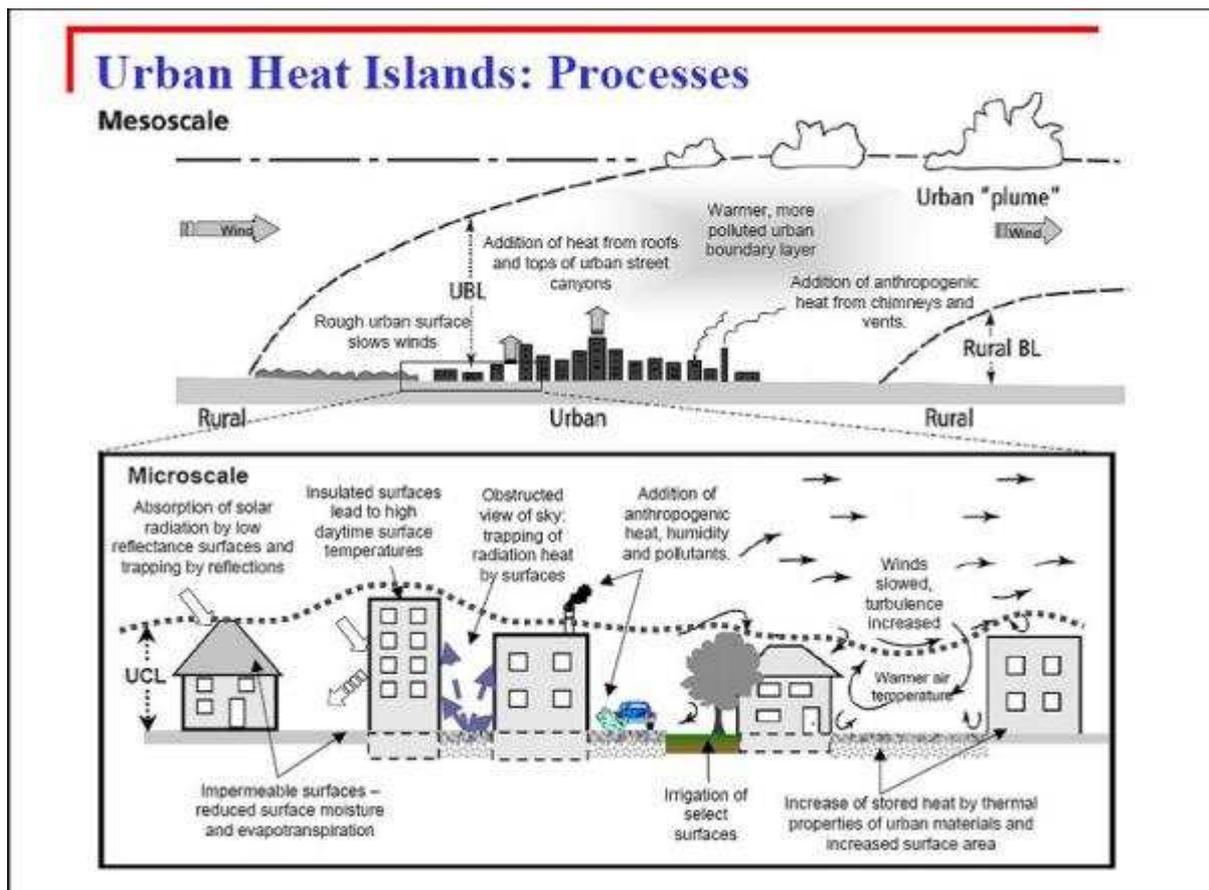


Figura 9: strati climatici che costituiscono le Urban Heat Island e schematizzazione dei processi che generano le isole di calore urbane (UHI)

Occorre precisare comunque che le isole di calore non hanno effetti diretti sul riscaldamento globale, l'isola di calore ha un effetto locale e non è rappresentativo di aree più vaste. Le medie di temperatura effettuate a livello globale non risentono in modo apprezzabile dell'influenza delle isole di calore.

Questo fenomeno ha già avuto ed avrà in futuro ripercussioni dirette sui cittadini, in particolare sui gruppi più vulnerabili, come anziani residenti in città, in edifici che risultano essere di scarsa qualità. Per questo motivo occorrono misure di adattamento al fenomeno e misure di mitigazione, le quali varieranno a seconda della scala in cui si andrà ad operare.

A livello di scala urbana, occorre puntare sull'integrazione di infrastrutture all'aperto, specchi d'acqua con spazi verdi:

- alta qualità dei greenspace, costituire una maglia di spazi aperti irrigati che possono essere utilizzati sia da una molteplicità di persone, che da sistemi ecologici. Infrastrutture verdi in aree urbane che comprendono, spazi aperti,

boschi, alberature stradali, campi, parchi, impianti sportivi all'aperto, orti comunitari, villaggi verdi, giardini privati, ecc;

- Bluespace, come corpi d'acqua all'aperto, fiumi, laghi, canali urbani;
- Studio dell'orientamento degli edifici per produrre effetti di ombreggiatura, per minimizzare gli effetti dell'irraggiamento solare. Occorrerà però tener presente della necessità di luce durante il periodo invernale.
- Ventilazione passiva catturata tramite l'orientamento e la morfologia degli edifici e delle strade.

Alla scala di edificio, occorrerà impiegare scelte progettuali, dove le misure di efficienza energetica (per esempio aumentare il guadagno solare e ridurre la perdita di calore d'inverno), hanno l'obiettivo di abbassare i rischi di calura estiva. La scelta più ovvia soprattutto negli edifici datati, come il condizionamento meccanico dell'aria condizionata, se da un lato garantisce un adeguato confort termico durante le estati più calde, dall'altro contribuisce all'aumento della domanda di energia, compromettendo gli obiettivi di riduzione dei gas serra. Quindi la miglior prassi è quella di ridurre il carico di raffreddamento, per quanto possibile utilizzando soluzioni passive (soprattutto per i nuovi edifici) e materiali che garantiscano l'isolamento termico, che impediscano la penetrazione di calore.

Efficaci azioni e mezzi di gestione dei rischi di calore, che siano in grado di ridurre il disagio termico risultano essere:

- Ombreggiatura tramite piantumazione o sistemi di aree vetrate che riducano il guadagno di calore solare;
- Materiali che siano in grado di impedire la penetrazione del calore, come materiali da costruzione, tetti verdi, o sistemi di isolamento per pareti;
- Utilizzo innovativo di acqua per il raffreddamento, ad esempio impiegando "acqua fresca terrestre, falde acquifere o acque superficiali;
- Aumentare la ventilazione per la rimozione di calore proveniente dall'esterno solo se questa risulta fresca;
- Raffreddamento meccanico, come travi fredde e sistemi convenzionali di condizionamento dell'aria.
- Impegno di accumulatori termici o di massa, in grado di assorbire calore durante i periodi più caldi in modo che possano dissipare calore nei periodi più freddi.

2.3. EFFICIENZA ENERGETICA

2.3.1. INTRODUZIONE

Un insediamento urbano è un sistema estremamente complesso che può essere analizzato da molteplici punti di vista.

Dal punto di vista della fisica tecnica questo sistema è sede di trasformazioni che hanno lo scopo di convertire risorse di vario genere in prestazioni connesse alle funzioni urbane: abitare, spostarsi, lavorare, ricrearsi. Le risorse in questione sono: sostanze, materiali, semilavorati e varie forme di energia, mentre le trasformazioni sono ad esempio la conversione dell'energia chimica di un combustibile in un flusso termico da somministrare ad un ambiente confinato, per mantenere la temperatura interna desiderata.

Attualmente è diventato di vitale importanza massimizzare l'efficienza con cui queste trasformazioni avvengono, in particolare le conversioni di una forma di energia in un'altra, dal momento che la crisi dell'ecosistema globale impone limiti al consumo di fonti energetiche non rinnovabili, alle emissioni in atmosfera (vedi sopra) ed alla produzione di rifiuti.

Gli edifici, i loro impianti di climatizzazione e molti dei manufatti che costituiscono l'insediamento possono essere considerati dal punto di vista termodinamico dei sistemi aperti e non isolati, attraversati da flussi di materia ed energia. Relativamente ad essi è possibile redigere dei bilanci, di materia ed energia, e valutare l'efficienza con cui avvengono le conversioni da una forma di energia ad un'altra.

Sembrerebbe intuitivo affermare che una conversione di energia sia efficiente, quando tutta l'energia disponibile all'inizio si ritrovi in altra forma a conversione avvenuta, e venga così utilizzata.

Tuttavia, in base al primo principio della termodinamica, l'energia, come ogni altra cosa in natura, non si crea e non si distrugge, ma si conserva. Pertanto è difficile dire quando una quantità di energia viene sprecata, a meno che essa non venga direttamente dispersa nell'ambiente.

Detto ciò volendo dare una definizione di **efficienza energetica** si può dire che rappresenta la capacità di un sistema⁶ di sfruttare l'energia che gli viene fornita per soddisfare un fabbisogno, per ottenere cioè il risultato voluto. Minori risultano i consumi

⁶ Per sistema, in riferimento all'efficienza energetica, ci si può riferire a motori, fabbricati, ad un intero paese, ecc.

relativi al soddisfacimento di un determinato fabbisogno, migliore è l'efficienza energetica del sistema in questione.

L'efficienza energetica è dunque un rapporto che viene espresso da un numero da 0 a 1 (o in percentuale da 0 a 100). Lo 0 corrisponde allo spreco totale di un sistema che consuma energia senza produrre alcun risultato, mentre 1 o 100% rappresentano l'efficienza ottimale, dove ogni parte di energia immessa si trasforma in risultato. Logicamente per quanto già detto preliminarmente queste risultano essere situazioni teoriche, in quanto qualunque processo produce almeno qualche soddisfacimento, mentre nessuno processo fisico è in grado di trasformare l'energia senza sprechi e perdite.

Per il calcolo dell'efficienza energetica, se tutti i dati sono disponibili esistono formule matematiche in grado di dimensionarla. Man mano che il sistema si allarga e diventa più complesso, occorre allontanarsi dalla stretta rappresentazione matematica dei dati per ricorrere a indicatori e statistiche che consentono di valutare con buona approssimazione il livello di prestazione energetica del sistema analizzato.

Più in generale dunque, per efficienza energetica si intende, la capacità di utilizzare l'energia nel modo migliore; ancora più generalmente con questa formula si indica un obiettivo tendenziale, quello del risparmio energetico negli "usi finali": l'industria, i trasporti, l'agricoltura, le infrastrutture e le case in cui viviamo, con tutti i consumi energetici che comportano.

Dunque, sempre più spesso la definizione "efficienza energetica" indica quella serie di azioni di programmazione, pianificazione, progettazione e realizzazione che permettono, a parità di servizi offerti, di consumare meno energia. Quando ci si riferisce ad un sistema energetico nel suo complesso, indica la capacità di garantire un determinato processo produttivo o l'erogazione di un servizio (ad esempio il riscaldamento) attraverso l'utilizzo della minor quantità di energia possibile.

Quando il sistema in questione è un edificio (contesto del presente lavoro), l'efficienza energetica riguarda sostanzialmente l'involucro, gli impianti di riscaldamento o refrigerazione e gli elettrodomestici. In particolare l'efficienza energetica per gli edifici riguarda quattro aspetti:

- 1) Riduzione dei consumi
- 2) Aumento di efficienza nella produzione energetica
- 3) Impiego di fonti rinnovabili
- 4) Riutilizzo delle acque di scarico

Nel presente lavoro ci si soffermerà in particolare sull'involucro, sulle sue dispersioni termiche e sulle tecniche di rilevamento delle dispersioni.

2.3.2. EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI

In ambito residenziale, i consumi energetici derivano sostanzialmente da due tipologie di fabbisogni:

- Quello termico dato dalla necessità di riscaldare gli ambienti abitativi e produrre acqua calda sanitaria
- Quello elettrico legato principalmente all'illuminazione e all'alimentazione di utenze termiche e di condizionamento estivo

L'alto grado di domanda energetica residenziale, considerando che in Europa oltre un terzo di quella globale è usata nell'ambito dei fabbricati civili, è frutto nella maggior parte dei casi dall'alto grado di inefficienza energetica delle utenze, sia per il fabbisogno termico che per quello elettrico e dell'alto grado di dispersione termica invernale ed estiva, derivata dalla forma dell'edificio, dai materiali, dalle tecniche di monitoraggio e manutenzione, dall'uso degli spazi.

Per questi motivi l'Unione Europea e lo stato italiano, si sono prefissati di raggiungere determinati obiettivi per il sostegno dell'efficienza energetica tramite interventi normativi e finanziari (di cui si parlerà più dettagliatamente in seguito), i quali prevedono:

- realizzare edifici energeticamente sostenibili e rendere riconoscibile al mercato la qualità ed il comfort dell'ambiente costruito;
- standardizzare l'uso di tecniche e tecnologie nuove di produzione e costruzione, ed adottare parametri energetici nelle costruzioni civili ed industriali;
- sostenere l'innovazione tecnologica nei materiali per l'edilizia, verso soluzioni ad elevata prestazione energetica;
- organizzare gli strumenti di governance della domanda e dell'offerta di energia nel settore residenziale ed edilizio in genere;
- realizzare nel settore residenziale un mix energetico compatibile con la salvaguardia ambientale (limitazione dell'impiego delle fonti fossili ed incremento dell'impiego di fonti rinnovabili).

Per raggiungere tali obiettivi di mantenimento del comfort e di riduzione drastica dei consumi termici, gli interventi che risultano decisamente idonei al perseguimento di tali finalità, sono quelli che rendono efficiente l'involucro dei fabbricati. Oltre a questi ,altri

interventi per la diminuzione della domanda energetica, risultano essere quelli che vanno ad agire sull'impiantistica, come la sostituzione delle utenze termiche con sistemi a fonte rinnovabile (solare termico), impegno di pompe di calore, caldaie a condensazione o la sostituzione con impianti più efficienti. Oppure interventi sull'illuminazione che indirizzino verso una migliore tecnologia per i corpi illuminanti (lampade ad alta efficienza).

2.3.2.1. Dispersioni termiche degli involucri edilizi

Per "involucro edilizio", si intende quella parte di edificio che separa un ambiente interno (caratterizzato da condizioni "climatico/ambientali" stabili) da un ambiente esterno (variabile per natura). Le prestazioni dell'involucro devono garantire il comfort termico e igrometrico degli spazi confinati e il contenimento dei consumi energetici.

Le problematiche connesse alle dispersioni termiche degli involucri edilizi, derivano semplicemente dalla natura dell'energia termica, la quale migra in modo spontaneo dall'elemento a temperatura superiore verso quello a temperatura inferiore. In inverno il calore fornito negli ambienti si disperde verso l'esterno; in estate invece il calore dall'esterno entra nell'interno degli edifici. La funzione dell'involucro edilizio è quindi quella di contrastare questo fenomeno. I fattori che condizionano l'evento di scambio di calore tra interno ed esterno e a cui occorre perciò tener conto, sono diversi e con diversa influenza e sono: l'esposizione geografica dell'edificio, la localizzazione climatica, i venti dominanti, le dimensioni dei locali, spessori e qualità dei materiali utilizzati per la realizzazione di tutte le pareti, il tipo di funzionamento dell'impianto: periodico occasionale, con intermittenza notturna o diurna; calcolo della quantità di energia termica per riscaldare l'aria di ricambio e di infiltrazione, per evaporare l'acqua per la eventuale umidificazione dell'aria, calore endogeno, irraggiamento solare attraverso superfici vetrate, pareti, ed altro.

Le componenti dell'involucro che influenzano le dispersioni di calore (schematizzate in figura 7) risultano essere:

- le pareti
- i ponti termici
- le superfici finestrate e serramenti
- copertura
- suolo
- rinnovamento dell'aria

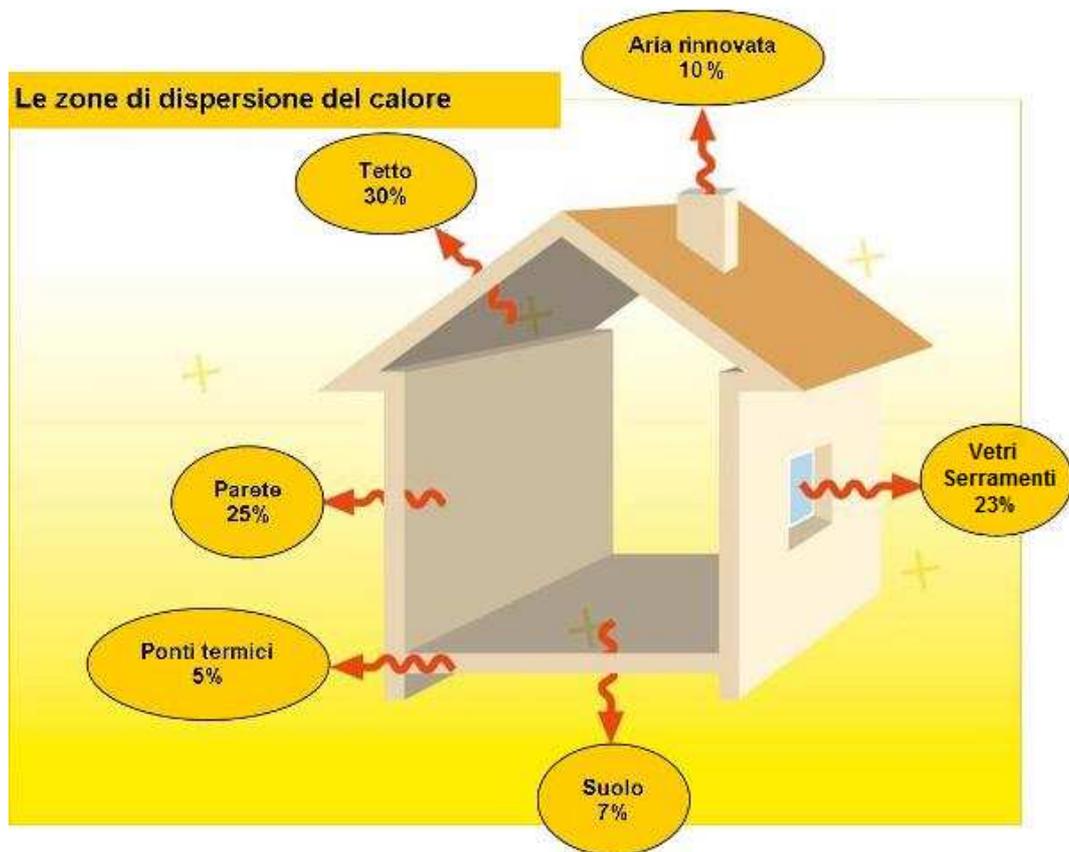


Figura 10: schema delle dispersioni termiche dell'involucro edilizio

A questo punto verrà descritta una metodologia di calcolo delle dispersioni termiche degli involucri edilizi e verrà fatta una breve descrizione delle sue componenti soggette a dispersione.

CALCOLO DELLE DISPERSIONI TERMICHE E INFLUENZA DELLE PARETI

Per prima cosa occorre individuare le temperature interne da assumere per il calcolo. Queste dipendono dalla tipologia di locale e dalla attività umana che in essa si svolge. Di norma per i locali residenziali al di fuori di quelli speciali come ad esempio gli ospedali, la temperatura⁷ interna del locale non dovrebbe superare i 20°C, con $\pm 1^\circ\text{C}$ di tolleranza.

Quindi nel caso di edificio riscaldato, come già detto in precedenza il calore si sposta verso le fonti più fredde, propagandosi attraverso le pareti, tetti, muri, ecc. in quantità variabile a seconda dello spessore del muro e della natura dei materiali e dalla differenza di temperatura Δt (salto termico) tra la parete interna e quella esterna.

⁷ Le temperature interne si intendono misurate al centro della stanza ad un'altezza di 1,50 m dal pavimento con un termometro a bulbo asciutto (b.a.) o altro strumento di rilievo idoneo purché sia schermato da ogni tipo di radiazione termica, positiva e negativa, che ne possa influenzare in qualche modo l'esatto rilievo.

Se chiamiamo **Cd**, la quantità di calore che attraversa una parete qualsiasi (muro, pavimento, solaio, soffitto, finestra, ecc.) in regime stazionario, e indichiamo con:

- **S** la superficie in m² della parete, muro, soffitto, vetrata, ecc.;
 - **Sp** lo spessore della parete, muro, solaio, pavimento, ecc.;
 - **U** il coefficiente globale di trasmissione termica relativo ai materiali ed allo spessore della parete considerata, tetto, tramezzo, ecc. (W/h m² °C);
 - **T** la temperatura più elevata del lato della parete
 - **t** la temperatura più bassa del lato della parete;
 - **h** il tempo riferito ad una ora (1/h);
 - **T - t** la differenza di temperatura tra la superficie interna più calda e la superficie esterna più fredda della parete (**Δt**);
- avremo che:

$$Cd = \frac{U \cdot S \cdot h}{Sp} (T - t)$$

Il coefficiente “**U**” è anche detto coefficiente di trasmissione unitaria o conducibilità termica e definisce la capacità isolante di un elemento. Dato un fenomeno di trasmissione di calore in condizioni di regime stazionario (in cui il flusso di calore e le temperature non variano nel tempo), la trasmittanza misura la quantità di calore che nell'unità di tempo attraversa un elemento strutturale della superficie di 1 m², in presenza di una differenza di temperatura **Δt** di 1°C tra l'interno e l'esterno.

Per la valutazione del carico termico, si fa riferimento alla quantità energetica dispersa in regime stazionario dalle pareti disperdenti degli ambienti in esame, ed alla quantità di energia termica necessaria per il riscaldamento dell'aria esterna per i ricambi forzati e accidentali. Il calore da fornire all'aria di ricambio si calcola con la seguente espressione:

$$Cr = 0,35 \cdot R \cdot (ta - te)$$

La formula algebrica che regola lo scambio termico per trasmissione in regime stazionario attraverso una parete omogenea a facce parallele è la seguente:

$$Cd = U \cdot S \cdot (ta - te)$$

Il fabbisogno termico totale Ct , è il risultato del calore trasmesso per conduzione e convezione dalle pareti disperdenti, più l'energia necessaria per il riscaldamento dell'aria di ricambio; meno il calore endogeno fornito nei locali:

$$Ct = Cd + Cr - Ci$$

La formula fondamentale " $Cd = U \cdot S \cdot (ta - te)$ " è sempre valida quando le strutture sono omogenee e le facce delle pareti sono parallele tra di loro, però nell'edilizia moderna questo si verifica difficilmente in quanto le pareti spesso sono composte da strati di materiali diversi, come mattoni, intercapedini, strati isolanti, coibentazione, ecc.

Ogni singolo materiale ha delle caratteristiche differenti di conducibilità termica, che prende il nome di "conduttanza" e viene di norma indicato con la lettera "lambda" [λ].

La conduttanza o conducibilità termica è una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore (vale a dire maggiore è il valore di λ , meno isolante è il materiale). Essa dipende solo dalla natura del materiale, non dalla sua forma. I valori indicati dal λ provengono dalla normativa UNI CTI 7357 - 1974.

Conoscendo quindi la conducibilità termica dei materiali, è possibile calcolare il valore di trasmittanza U , dato dalla seguente formula.

Legenda

Cd = Calore di dispersione, attraverso pareti ecc.;

Cr = Calore da fornire all'aria esterna di ricambio;

Ci = Calore interno fornito da persone, lampade, ecc.;

Ct = Energia totale, ottenuta dalla somma di Cd più Cr meno Ci (solo quando Ci è di peso considerevole);

U = Coefficiente globale di conducibilità della superficie disperdente, trasmittanza in $W/h \text{ m}^2\text{C}$;

S = Superficie della parete in m^2 (muri, solai, ecc.);

R = Valore in m^3/h di ricambio d'aria con l'esterno;

ta = Temperatura ambiente (interna) in $^{\circ}\text{C}$;

te = Temperatura esterna atmosferica in $^{\circ}\text{C}$;

Δt = Salto termico tra temperatura ambiente e la temperatura esterna;

$0,35$ = Calore specifico medio di 1 m^3 d'aria in W/h .

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{S_p}{\lambda} + \frac{S_{pn}}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_i}}$$

Dove:

- **λ** = Conduttività termica interna W/m² °C del materiale costituente la parete;
- **Sp** = Spessore della parete m (metro);
- **αe** = Coefficiente di adduttanza, di convezione o di adduzione unitaria, relativo allo scambio termico tra la superficie della struttura esterna e l'aria che la lambisce, W/m² h °C;
- **αi** = Coefficiente di adduttanza, di convezione o di adduzione unitaria, relativo alla trasmissione di calore tra la superficie della struttura interna e l'aria che la lambisce, W/m² h °C.

Per le adduttanze unitarie: **αe** (esterne) e **αi** (interne) si possono assumere i seguenti valori approssimativi:

ADDUTTANZE UNITARIE αi (interne) αe (esterne)	
SUPERFICI ESTERNE ORIZZONTALI	
Flusso termico discendente --	αe = 16,24 W/m ² °C
Flusso termico ascendente ---	αe = 23 W/m ² °C
SUPERFICI VERTICALI -----	αe = 23 W/m ² °C
SUPERFICI INTERNE	
Superfici orizzontali con:	
Flusso termico ascendente ---	αi = 9,28 W/m ² °C
Flusso termico discendente --	αi = 6,50 W/m ² °C
Superfici verticali -----	αi = 8,12 W/m ² °C

Questi valori possono essere aumentati quando la velocità di movimento dell'aria (vento) che lambisce le pareti esterne, è superiore a 1,5 m/s, si possono applicare, non disponendo di riscontri più precisi, di alcuni valori pratici:

Velocità dell'aria m/s	2	2,5	3	4	6
αe = W/m ² °C	26	28	30	35	42

Tramite la conducibilità termica “λ “ di un materiale, è inoltre possibile calcolare la resistenza termica unitaria R, data dal rapporto:

$$R = \frac{Sp}{\lambda} \quad [W/m^2h \text{ } ^\circ C]$$

La resistenza termica risulta essere la capacità di un materiale di opporsi al passaggio di calore. Se una parete è costituita da elementi diversi è chiaro che si avranno anche resistenze dissimili; si intuisce che la resistenza totale **Rt**, sarà uguale alla somma di tutte le resistenze **R** degli strati che la compongono cioè:

$$R_t = R_1 + R_2 + \dots + R_n^\circ$$

Da quanto detto fino ad ora, si può quindi mettere in relazione la trasmittanza “**U**” con la resistenza termica unitaria “**R**”, per cui:

$$U = 1 / R_t$$

In altre parole:

$$R = \frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_e} + \frac{Sp}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}$$

Se nella parete composita ci sono intercapedini d'aria, si deve considerare che nello strato d'aria il calore si trasmette quasi solamente per convezione, per cui l'adduttanza dello strato d'aria sarà:

$$R_a = \frac{1}{C_a}$$

Dove

- **Ra**: resistenza termica dell'aria all'interno dell'intercapedine
- **Ca**: coefficiente di adduttanza dell'aria all'interno del intercapedine

Per cui

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{S_p}{\lambda} + \frac{S_{pn}}{\lambda_n} + \frac{1}{C_a} + \frac{1}{\alpha_i}}$$

I PONTI TERMICI

Una problematica che si verifica in alcuni edifici è il così detto ponte termico. Si ha un ponte termico dove il comportamento termico di una parte dell'edificio è considerevolmente differente rispetto a quello di parti circostanti. Questo fenomeno si verifica lungo le discontinuità costruttive presenti in qualsiasi struttura edile. Un ponte termico incide negativamente sull'isolamento di un edificio perché costituisce una fuga privilegiata per gli scambi di calore da e verso l'esterno e spesso produce condensazione di vapore acqueo e muffe.

Le cause principali di un ponte termico sono:

- presenza di materiali diversi nella sezione dell'edificio (es. muratura di tamponamento in mattoni con struttura in cemento armato),
- discontinuità geometrica nella forma della struttura (es. angoli).
- interruzioni dello strato di isolamento termico (es. pilastri, travi marcapiano, serramenti, ecc.).

I principali effetti negativi dei ponti termici sono:

1 Perdite di calore

Le perdite di calore derivanti dai ponti termici incidono in modo notevole sulle perdite di calore dell'intero edificio. I ponti termici possono anche triplicare la trasmissione di calore in una sezione dell'edificio, pur rappresentando solo una minima parte della superficie stessa.

2 Condensazione

La condensazione superficiale è uno degli effetti più comuni dei ponti termici. Si manifesta quando i normali livelli dell'umidità relativa degli ambienti interni in

condizione di comfort termico si combinano con una temperatura superficiale dell'involucro dell'edificio che ha valore più basso del punto di rugiada⁸.

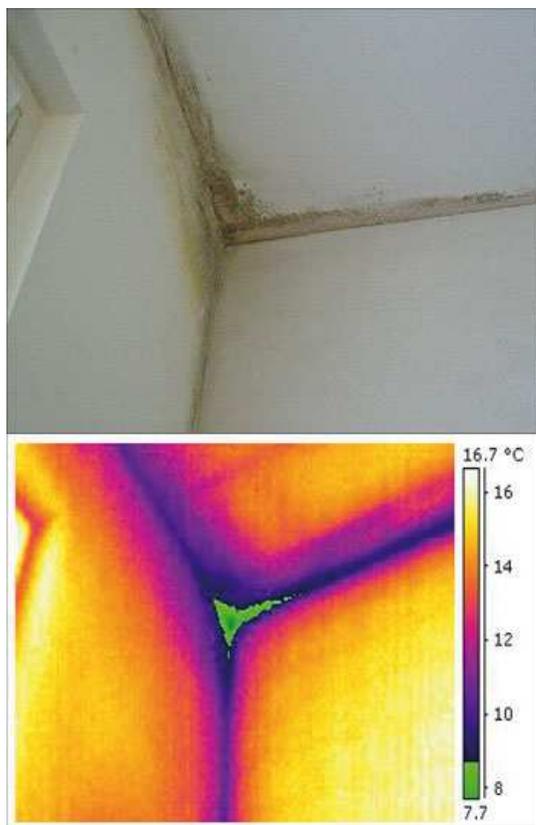


Figura 11: fenomeno di formazione delle muffe e rilevamento termografico di un ponte termico

3 Formazione delle muffe

La formazione delle muffe avviene quando si ha una particolare combinazione di temperatura, vapore e substrato favorevoli. I più comuni tipi di funghi (muffe) maturano in presenza di alti valori di umidità ed a basse temperature (0 - 15°C). Un ponte termico, a causa della contemporanea presenza di umidità relativa alta e bassa temperatura, crea le condizioni ideali per la formazione di muffe.

4 Danni alla superficie

Le variazioni cicliche della temperatura superficiale causano una polverizzazione dei materiali della struttura. E' stato osservato come nel 44% dei casi questi danni superficiali siano dovuti alla presenza di ponti termici

5 Diminuzione del comfort termico

Quando la temperatura superficiale interna di una parte della struttura (parete, pavimento, ecc.) è inferiore di almeno due o tre gradi rispetto alla temperatura dell'ambiente si avverte una sensazione di disagio in prossimità di tale superficie. Questo effetto è particolarmente evidente quando sono coinvolte ampie aree. Un tipico esempio è la zona di congiunzione tra un pavimento non isolato e la parete esterna. Per limitare tale disagio generalmente si innalza la temperatura dell'ambiente provocando in tal modo un'ulteriore perdita di energia.

⁸ Con l'espressione punto di rugiada si intende un particolare stato termodinamico (rappresentato dalla temperatura e dalla pressione) in corrispondenza del quale una miscela bifase multicomponente liquido-vapore diviene satura di vapore. Oltre il punto di rugiada (cioè a temperatura maggiore e/o a pressione minore) si ha la presenza solo di vapore, mentre sotto il punto di rugiada (cioè a temperatura minore e/o a pressione maggiore) il sistema è bifase (costituito da un liquido in equilibrio con il suo vapore).

Il ponte termico in condizioni estreme può rappresentare fino al 30% del calore totale disperso.

Un valido sistema per il rilevamento di tale fenomeno di dispersione termico è decisamente il rilevamento tramite tecniche ad infrarossi

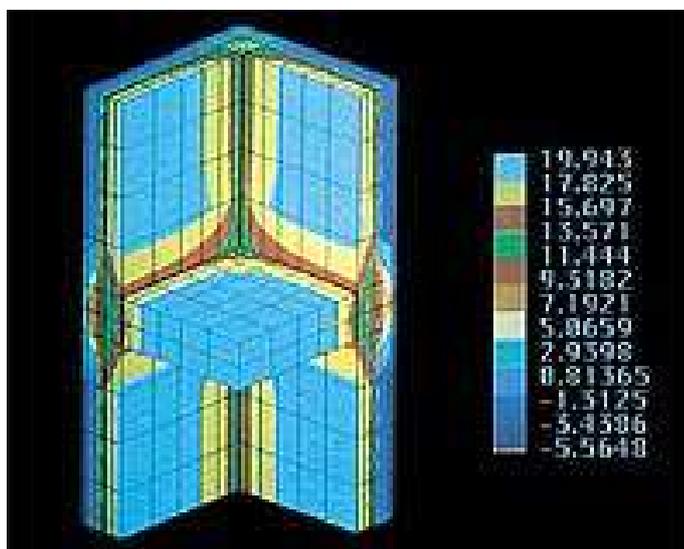


Figura 12: schematizzazione delle dispersioni in prossimità dei ponti termici

DISPERSIONI TERMICHE DELLE SUPERFICI FINESTRATE E SERRAMENTI

Oltre alla realizzazione di un buon isolamento nelle pareti, nei pavimenti e nei soffitti (strutture opache) è necessario che anche i serramenti (strutture finestrate) debbano avere opportune caratteristiche termiche.

Anche se la superficie delle strutture finestrate è molto inferiore a quella delle strutture opache, non è per niente da sottovalutare la relativa dispersione termica.

Risulta molto difficile, se non impossibile, realizzare serramenti con trasmittanza pari a quella delle pareti ed in genere di tutte le strutture opache.

Nel calcolo della trasmittanza di un elemento finestrato concorrono:

- Le caratteristiche del vetro-vestrata (superficie, tipo, materiale, spessore, trasmittanza).
- Le caratteristiche del telaio (superficie, spessore, materiale, trasmittanza)
- Le dimensioni dell'elemento.

E' necessario, inoltre, valutare il ponte termico del cassonetto e tra il serramento e la parete.

Altro fattore importante è che le strutture finestrate permettono di far entrare l'irraggiamento solare e quindi nella stagione invernale di apportare calore all'interno dell'edificio. Per contro però questo apporto è nocivo nella stagione estiva in quanto può innalzare molto la temperatura interna.

Per una prima valutazione si possono utilizzare le norme UNI con particolare riferimento alla UNI EN 10077, nelle quali vengono anche indicate le metodologie di calcolo della trasmittanza delle pareti vetrate e sue componenti.



Figura 13: serramento in PVC ed alluminio ad alto isolamento termico

DISPERSIONI TERMICHE DELLE COPERTURE

Le coperture, così come ogni altro elemento opaco, sono interessate da un flusso di calore per conduzione (trasmissione) che concorre a determinare le perdite per trasmissione del bilancio energetico invernale dell'edificio. Questa voce può assumere notevole influenza soprattutto nel caso di edifici con un numero limitato di piani o nel caso dell'analisi degli alloggi immediatamente sottostanti la copertura, sia in termini di bilancio energetico, sia delle temperature di comfort.

L'influenza che la copertura ha sul totale delle dispersioni termiche dell'involucro sono decisamente elevate, in quanto si stima che mediamente la copertura incide per circa il 30 % sul totale dell'involucro.

Per il calcolo della trasmittanza, il parametro principale per determinare le dispersioni termiche delle coperture si utilizzano le formule di cui nei paragrafi precedenti.

Dato l'alta incidenza che il tetto ha sulle dispersioni totali dell'involucro risulta essere di fondamentale importanza l'isolamento della copertura. L'isolamento rientra nelle prescrizioni del DLgs n. 311 e deve essere eseguito con idonei materiali, impiegando corretti spessori di isolante.

Tra le prescrizioni del DLgs n. 311, vi sono i limiti di trasmittanza da rispettare, riportati nella tabella sottostante.

Valori limite della trasmittanza U delle coperture espressa in W/m²K (Allegato C del DLgs 311)						
Zone climatiche	A	B	C	D	E	F
U (W/m²K) limite 2006	0,80	0,60	0,55	0,46	0,43	0,41
U (W/m²K) limite 2008	0,42	0,42	0,42	0,35	0,32	0,31
U (W/m²K) limite 2010	0,38	0,38	0,38	0,32	0,30	0,29



Figura 14: zone climatiche delle provincie italiane

Per quanto riguarda brevemente le opere di isolamento termico, le soluzioni che possono essere impiegate non riguardano solo le nuove edificazioni, ma si possono applicare anche in fase di ristrutturazione. Infatti esistono materiali isolanti che si possono applicare nello strato sotto tegola, non necessitando di un isolamento della struttura portante. In questo modo si possono ottenerne comunque notevoli diminuzioni delle dispersioni

termiche che contribuiscono ad aumento del benessere e il comfort all'interno dell'abitazione.

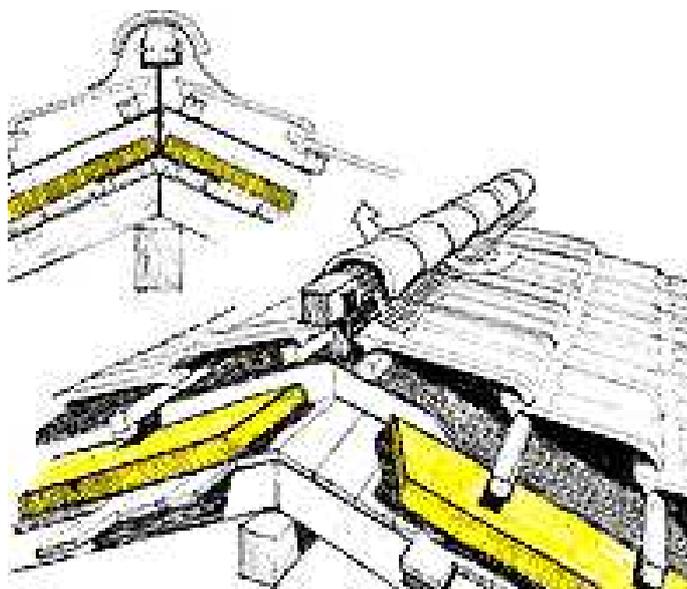


Figura 15: esempio di isolante applicato in sotto tegola

DISPERSIONI TERMICHE TRAMITE TERRENO

Durante l'inverno la temperatura del suolo è sempre più alta della temperatura dell'aria esterna, la dispersione termica di una parte di fabbricato a contatto del suolo risulta di solito inferiore rispetto ad una parete esterna al di sopra del terreno. Tuttavia, nelle pareti a contatto del terreno poco o per nulla isolate si formano facilmente umidità o muffe con relativi danni. Occorre perciò per contrastare il fenomeno di scambio termico con il terreno, conoscere le sue proprietà termofisiche, conoscere la resistenza offerta dal suolo al passaggio del flusso di calore.

Si rende necessario per contrastare questi scambi termici, attuare tecniche di isolamento, che possono essere intere od esterne. Per eliminare l'umidità è di solito consigliabile intervenire con isolamento esterno (quando questo sia possibile, ad esempio in fabbricati in cui porzioni di pareti verticali risultano a contatto con il suolo).

L'isolamento interno risulta meno oneroso di quello esterno e applicabile quasi esclusivamente nei fabbricati esistenti quando si debba intervenire sulla pavimentazione a contatto con il suolo. Tale tecnica è però molto meno efficace, perché in tal modo non è possibile ridurre significativamente i ponti termici che si formano nei punti di raccordo.

DISPERSIONI TERMICHE DA RINNOVAMENTO ARIA

Il confort termico per una persona che soggiorna in un ambiente chiuso dipende dalla temperatura e dall'umidità dell'aria. Tuttavia per mantenere una buona qualità dell'aria ambientale, è necessario effettuare dei ricambi d'aria con una certa regolarità. Di per sé i ricambi d'aria comportano una perdita di calore nella casa, nei mesi invernali, perché l'aria calda viene sostituita da aria fredda che richiede di essere riscaldata. Nei mesi estivi specialmente nelle ore più calde della giornata, si ha invece il fenomeno opposto.

La ventilazione è ottenuta con l'apertura delle finestre (ventilazione naturale) o con sistemi di aerazione che prelevano l'aria esterna, la filtrano, eventualmente la riscaldano e la convogliano nei diversi ambienti.

La ventilazione naturale, va a sommarsi alle infiltrazioni dovute a scarsa tenuta degli infissi, soprattutto per i serramenti più vecchi. Le dispersioni termiche che si hanno da pareti, copertura, ponti termici, ecc., avvengono nell'arco dell'intera giornata, con perdita di calore continuativa, mentre la ventilazione naturale ha un tempo, per il miglioramento della salubrità dei luoghi decisamente inferiori.

Una appropriata ventilazione è la chiave per non sprecare il calore negli edifici. Quando si fa arieggiare la casa è bene aprire le finestre per pochi minuti (massimo 5 minuti) ogni 2-3 ore, il tempo sufficiente a cambiare l'aria viziata, senza far raffreddare i muri e il mobilio (in modo che la casa non perda la sua "inerzia termica")

Per quanto riguarda invece i sistemi di aerazione meccanica, esistono in commercio sistemi che consentono ridotte perdite di calore, "sistemi di recupero termico". L'aria interna viene estratta dall'ambiente, attraversando un flusso di canali metallici, i quali vengono scaldati; l'aria esterna più fredda attraversa un fascio di canali che sono in contatto termico con i canali dell'aria estratta, consentendo cos' all'aria che viene introdotta (e poi filtrata) di essere riscaldata. Tali dispositivi che possono essere impiegati anche in edifici esistenti, consentono risparmi anche del 50% sui consumi per ricambi d'aria. Tali dispositivi funzionano ad energia elettrica, ma la potenza richiesta risulta contenuta.

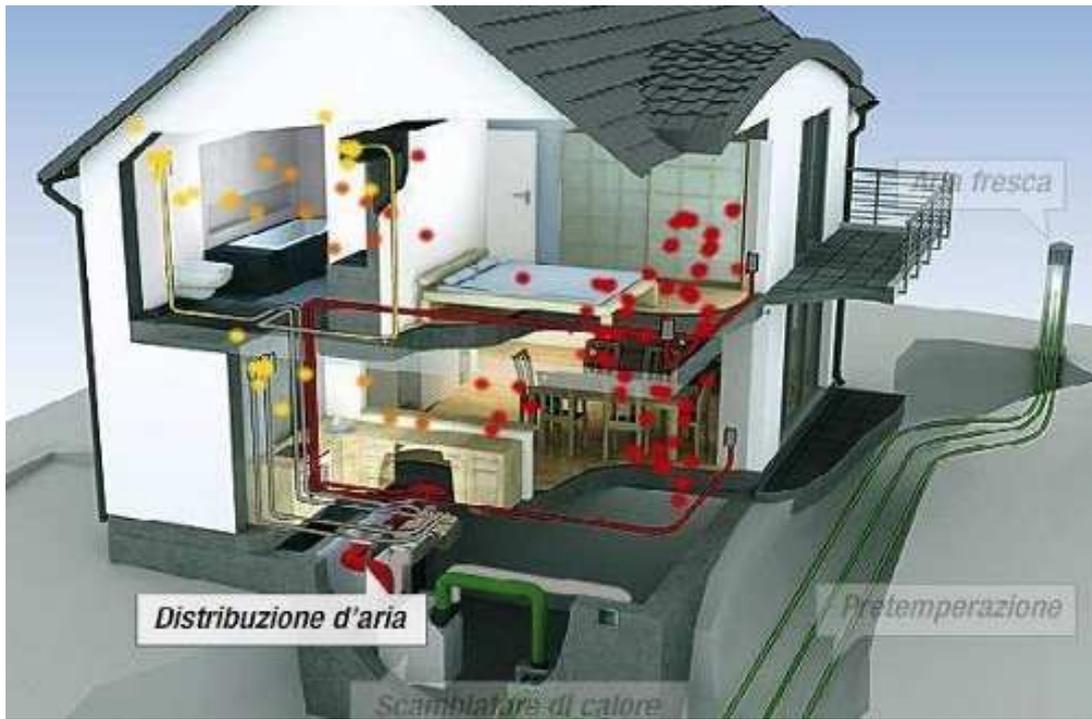


Figura 16: schema di un impianto di aerazione con recupero d'aria con sistema di recupero di calore

3. INQUADRAMENTO NORMATIVO

3.1. INTRODUZIONE

Come sovente accade, a muovere il legislatore italiano verso direzioni sconosciute o poco praticate è la Comunità Europea: così anche in materia di efficienza e di risparmio energetico. Si vedano, nel tempo, le dir. CE n. 106/1988, n. 76/1993 e, soprattutto, la n. 91/2002 peculiarmente dedicata al rendimento energetico nell'edilizia. In tale ultima direttiva si fa richiamo alle esigenze connesse alla tutela dell'ambiente e alla utilizzazione accorta e razionale delle risorse naturali per invitare gli Stati membri a una gestione del fabbisogno energetico che implichi un basso consumo di energia nei fabbricati. Ma la direttiva si spinge anche a evidenziare il problema creato dagli impianti di condizionamento d'aria (in termini di carico massimo, regolare manutenzione degli impianti a opera di personale specializzato, ecc.).

Verrà di seguito prodotto un breve excursus normativo in ambito di efficienza energetica, ed in seguito una descrizione delle principali norme comunitarie, nazionali e regionali, relative alla Regione Veneto.

3.2. EXCURSUS NORMATIVO

Già oltre trent'anni fa (legge 457 del 5 agosto 1978) furono emanate in Italia norme circa i criteri costruttivi e le tipologie per l'edilizia miranti al miglioramento dell'efficienza energetica dei fabbricati e, quindi, al risparmio.

È con la legge 10 del 9 gennaio 1991, contenente le "norme per l'attuazione del piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia". Era un'ottima legge e poneva l'Italia all'avanguardia, in Europa, riguardo al contenimento dei consumi energetici, nell'ambiente costruito; introduceva, la certificazione energetica degli edifici, i piani energetici comunali, l'obbligo delle fonti rinnovabili negli edifici pubblici. Purtroppo non furono rispettati i termini di 180 giorni per l'emanazione dei decreti attuativi che avrebbero reso la legge operativa.

La legge 10/1991 ha dato vita al D.P.R. 412 del 26 agosto 1993 recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esecuzione e la manutenzione degli impianti termici.

Tale provvedimento definisce la nozione di edificio, di impianto termico, di manutenzione e quant'altro....

Mentre non ebbe attuazione quella parte della legge 10 (art. 30, comma 1) che prevedeva la promulgazione di norme sulla certificazione energetica degli edifici, norme che saranno poi emanate solo con il D.Lgs. 192/2005 (art. 6), poi modificato dal D.Lgs. 311/2006 di recepimento della dir. CE n. 91/2002.

Prima di esaminare il D.Lgs. 192/2005, tuttavia, va citato il D.Lgs. 387 del 29 dicembre 2003 (integrato dal D.M. 19 febbraio 2007), in materia di conversione fotovoltaica della fonte solare. Queste ultime esoneravano tali impianti dalla valutazione di impatto ambientale e definivano la nozione di impianto fotovoltaico, prevedendo (art. 3, n. 1) agevolazioni tariffarie e le procedure da seguire per ottenere le tariffe incentivanti (art. 5) e l'attestato di certificazione energetica (art. 7, n. 2).

Il D.Lgs. 192 del 19 agosto 2005 si occupa del rendimento energetico nell'edilizia e ha lo scopo di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici e di favorire lo sviluppo delle fonti rinnovabili. Il provvedimento definisce "attestato di certificazione energetica dell'edificio" il documento attestante le prestazioni energetiche di esso; ridefinisce i concetti di cogenerazione, di sistema di condizionamento dell'aria (art. 2, n. 1) ecc.; prevede l'erogazione di sanzioni amministrative nel caso di inottemperanza delle operazioni di controllo e di manutenzione degli impianti.

L'art. 16 del D.Lgs. 192/2005, in tale senso poi modificato dall'art. 7 del D.Lgs. 311/2006 prevede che: «Per gli interventi sugli edifici e sugli impianti volti al contenimento del consumo energetico e all'utilizzazione di fonti di energia di cui all'art. 1, individuati attraverso un attestato di certificazione energetica o una diagnosi energetica realizzata da un tecnico abilitato...>>

In data 5 aprile 2006 veniva promulgata la dir. CE n. 32 concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e che abrogava la precedente dir. n. 76/2003.

Nasceva, così, il D.Lgs. 311 del 29 dicembre 2006 che (art. 2) ha introdotto la previsione del certificato di certificazione energetica a carico del venditore e/o del locatore, con scansioni temporali anche con riguardo agli immobili non di nuova costruzione, e ciò al fine di poter accedere agli incentivi e alle agevolazioni di qualsiasi natura nonché per i contratti relativi alla gestione di impianti termici o di climatizzazione degli edifici pubblici.

Successivamente interviene il D.Lgs. 115 del 30 maggio 2008 destinato, nelle sue dichiarate intenzioni (art. 1.1), a contribuire al miglioramento della sicurezza dell'approvvigionamento energetico e alla tutela dell'ambiente attraverso la riduzione delle

emissioni di gas a effetto serra e al miglioramento dell'efficienza degli usi finali dell'energia sotto il profilo costi e benefici.

Il D.P.R. 59 del 2 aprile 2009 di attuazione dell'art. 4, comma 1, lett. a) e b), del D.Lgs. 192/2005, si prefigge lo scopo di definire i criteri generali, le metodologie di calcolo e i criteri minimi per le prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti termici per la climatizzazione invernale e per la programmazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari. Definisce i sistemi filtranti da applicare su vetro e le coperture a verde. Nei casi di nuove costruzioni o di ristrutturazioni, impone la determinazione dell'indice di prestazione energetica e del valore della **trasmissione termica** sia per il riscaldamento sia per il raffrescamento (art. 4, n. 2 e 3).

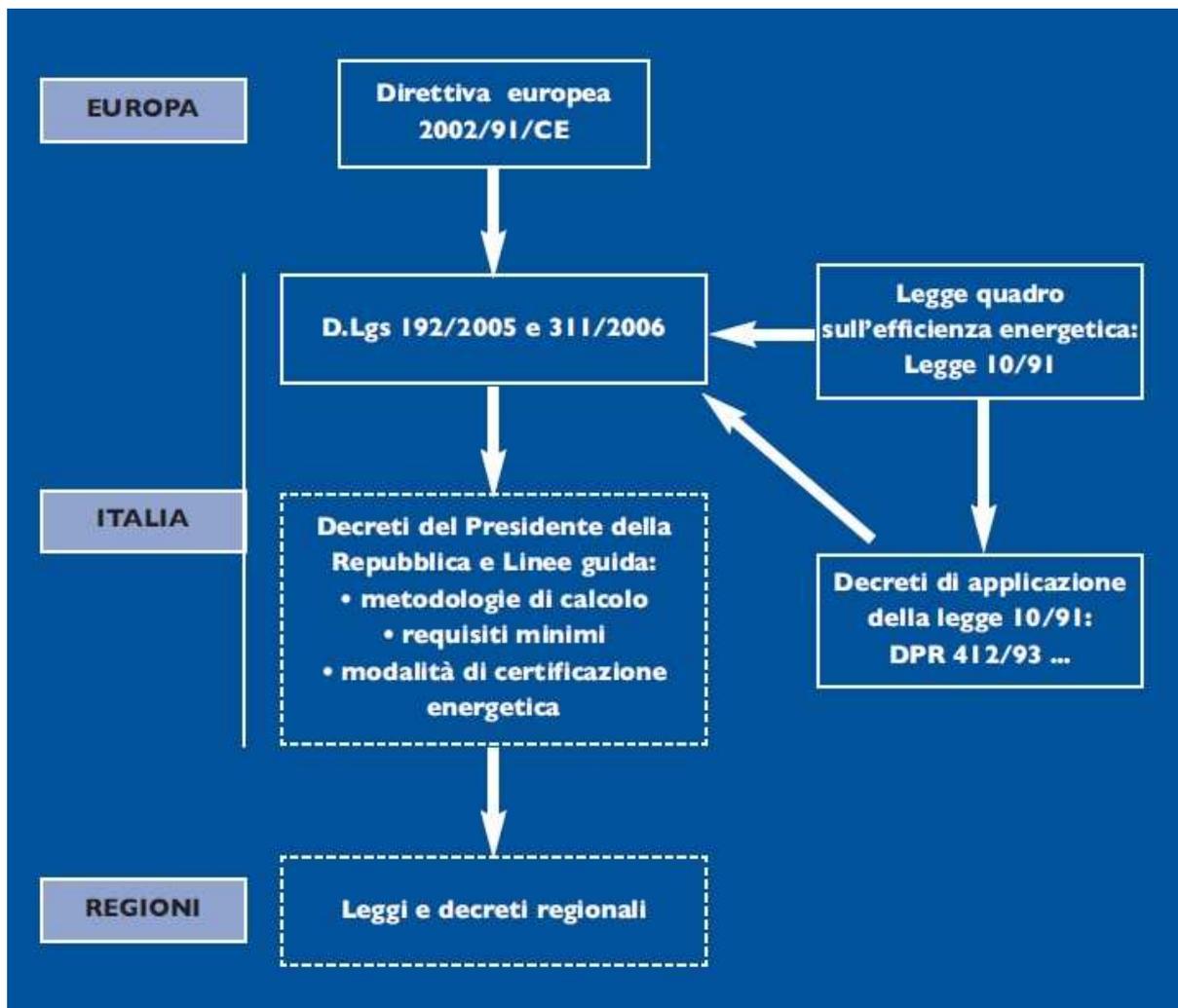


Figura 17: schema del quadro normativo sull'efficienza energetica degli edifici

3.2.1. NORMATIVA COMUNITARIA

Direttiva 2002/91 CE:

La Direttiva 2002/91/CE del Parlamento e del Consiglio Europeo sul rendimento energetico nell'edilizia, introduce importanti novità nell'ambito del risparmio di energia negli edifici, con molteplici finalità, ad esempio la tutela dell'ambiente, la riduzione delle emissioni inquinanti, l'indipendenza da fonti energetiche proveniente da paesi diversi.

Più in dettaglio dispone:

- L'adozione di un quadro generale e una metodologia per il calcolo del rendimento energetico integrato degli edifici (art.3);
- Applicazione dei requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici (art.4), di nuova costruzione (art.5), ed esistenti e oggetto di ristrutturazione (art.6);
- La certificazione energetica degli edifici (art.7);
- L'ispezione periodica di caldaie ed impianti di condizionamento d'aria negli edifici, nonché una perizia degli impianti termici (art. 8 e 9)

Ogni stato europeo deve recepire la direttiva mediante normativa nazionale, in modo da poter garantire una maggiore sensibilità alla specificità del clima di ciascun paese e rendere così operativa la direttiva.

Direttiva 2006/32 CE:

La direttiva si riferisce all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici.

Si inserisce nel quadro delle politiche e delle misure concrete da applicare per la realizzazione degli obiettivi degli accordi internazionali e del Protocollo di Kyoto in materia di lotta al cambiamento climatico e di riduzione delle emissioni di CO2 e gas a effetto serra. In particolare, essendo difficile agire sulle condizioni di approvvigionamento e di distribuzione dell'energia, l'intento della direttiva consiste piuttosto nel controllarne la domanda orientando possibilmente il mercato verso l'impiego di energie rinnovabili nel tentativo di ridurre la dipendenza dell'Italia dalle importazioni energetiche.

In particolare, gli stati membri devono:

- istituire appropriati sistemi di qualificazione, accreditamento e certificazione per i fornitori di servizi energetici (Art.8),
- assicurare l'abrogazione di disposizioni di legge e regolamenti che impediscano o limitino l'uso di strumenti finanziari (Art.9: fondi, sovvenzioni, riduzioni fiscali,

prestiti, finanziamenti tramite terzi) a fini di risparmio energetico o miglioramento dell'efficienza energetica.

3.2.2. NORMATIVA NAZIONALE

D.Lgs. 192/2005:

Il DL.gs. 19 agosto 2005 n. 192, è il decreto di attuazione della direttiva 2002/91/CE relativo al rendimento energetico nell'edilizia. Come si può leggere all'articolo primo, il decreto stabilisce i criteri, le condizioni e le modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici, con finalità che sono:

- lo sviluppo delle fonti rinnovabili,
- la diversificazione energetica,
- la limitazione delle emissioni inquinanti,
- lo sviluppo tecnologico.

Il presente decreto introduce la certificazione energetica degli edifici, che risulta essere un documento ufficiale, valido 10 anni, prodotto da un soggetto accreditato (certificatore energetico) e dai diversi organismi riconosciuti a livello locale e regionale. A livello pratico la sua utilità risulta:

- indispensabile per gli atti notarili di compravendita dal 1° luglio 2009 e per i contratti di locazione dal 1° luglio 2010.
- per l'accesso alle detrazioni del 55% sul reddito IRPEF: l'attestato energetico è parte della documentazione necessaria per ottenere gli sgravi fiscali.

Il documento stabilisce in valore assoluto il livello di consumo dell'immobile inserendolo in una apposita classe di appartenenza. Più è bassa la lettera associata all'immobile, maggiore è il suo consumo energetico. Definisce inoltre le metodologie di calcolo della prestazione energetica degli edifici.

Classi di efficienza

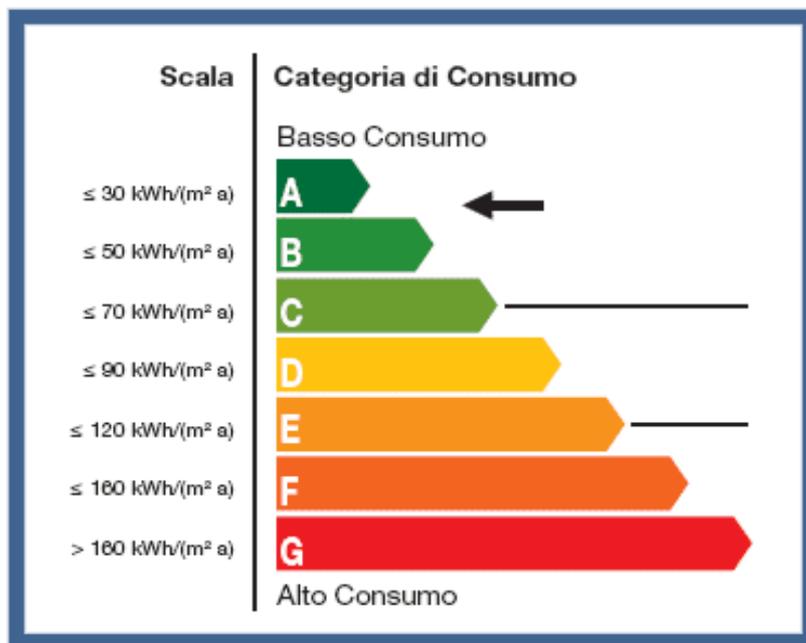


Figura 18: certificazione energetica, classi di efficienza

D.Lgs. 311/2006:

Il decreto è stato emanato come strumento correttivo e integrativo del precedente Dlgs 192/05, in particolare definisce alcuni aspetti, tra i quali i più importanti risultano:

- che le Regioni, in accordo con gli enti locali, predispongano (entro il 31 dicembre 2008) un programma di sensibilizzazione dei cittadini e di riqualificazione energetica del parco immobiliare territoriale;
- i livelli di prestazione energetica e di isolamento su tutti gli edifici nuovi e su quelli ristrutturati di determinate dimensioni risultano più severi, in particolare si prevede che per i nuovi fabbricati dopo il 1° gennaio 2010 dovranno garantire una riduzione dei fabbisogni termici del 20 – 25% rispetto a prima.
- l'acqua domestica debba essere riscaldata con l'energia solare nei nuovi edifici;
- l'obbligo di "protezioni solari" esterne per i nuovi palazzi;
- introduzione nella pianificazione del territorio del parametro energetico, per l'uso razionale delle fonti energetiche rinnovabili e soluzioni per il massimizzare sfruttamento della risorsa solare anche in ordine all'orientamento degli edifici.

D.Lgs. 115/2008:

Il decreto rappresenta l'attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici introducendo importanti novità e abroga la direttiva 93/76/CEE. Esso interessa sia i fornitori-distributori di energia sia i clienti finali.

Introduce alcune nozioni nuove, tra le quali vanno annoverate quelle di energia, di efficienza energetica, di miglioramento dell'efficienza energetica, di risparmio energetico, di servizio energetico e, in particolare, la figura dell'ESCO, ossia del soggetto che fornisce i servizi energetici o sistemi di miglioramento dell'efficienza energetica.

Un altro punto importante della normativa in esame è formato dalla definizione del contratto di rendimento energetico: «Accordo contrattuale tra il beneficiario e il fornitore riguardante una misura di miglioramento dell'efficienza energetica, in cui i pagamenti a fronte degli investimenti in siffatta misura sono effettuati in funzione del livello di miglioramento dell'efficienza energetica stabilita contrattualmente».

Il "certificato bianco" è il titolo di efficienza energetica attestante il conseguimento di risparmio di energia grazie a misure di miglioramento di efficienza energetica.

Un ruolo importante nell'attuazione degli scopi propri *del D.Lgs. 115/2008* è riservato all'ENEA, ossia l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, cui sono demandati ampi compiti di controllo, di formulazione di proposte, di supporto e consulenza, di informazione.

Le imprese di distribuzione di energia sono tenute ad adeguarsi a criteri di risparmio energetico e debbono possedere specifici requisiti (art. 7).

Sono contemplati finanziamenti per gli interventi mirati all'ottenimento di efficienza energetica (art. 9), attraverso una procedura di autocertificazione da parte delle ESCO (Energy Service Company) e degli esperti in gestione dell'energia.

Per gli edifici esistenti che adottino misure tese all'incremento dell'efficienza energetica, con generatori eolici o impianti solari termici o fotovoltaici è abrogata la necessità della presentazione di una DIA⁹, essendo sufficiente una comunicazione preventiva al comune (art. 11). Ma gli aspetti più salienti si colgono nella definizione del cosiddetto performance contracting, ossia del contratto di servizio energia «contratto che, nell'osservanza dei requisiti e delle prestazioni di cui al paragrafo 4, disciplina l'erogazione dei beni e dei

⁹ DIA: Denuncia di Inizio Attività, è un atto amministrativo della Pubblica Amministrazione. con la D.I.A. si possono fare le opere non riconducibili ad attività edilizia libera (art. 6 D.P.R. 380/2001), o al Permesso di costruire (art. 10 D.P.R. 380/2001). Oggi la DIA è stata sostituita da SCIA

servizi necessari alla gestione ottimale e al miglioramento del processo di trasformazione e di utilizzazione dell'energia».

Mentre viene definito contratto energia Plus il contratto servizi energia che rispetta gli ulteriori requisiti di cui al par. 5 e che configura come fattispecie di un contratto di rendimento energetico.

I citati parr. 4 e 5 si riferiscono all'art. 1, comma 1, lett. p), del *D.P.R. 412 del 26 agosto 1993* il quale così recita: «Per contratto servizio energia (si intende) l'atto contrattuale che disciplina l'erogazione dei beni e servizi necessari a mantenere le condizioni di comfort negli edifici nel rispetto delle vigenti leggi in materia di uso razionale dell'energia, di sicurezza e di salvaguardia dell'ambiente provvedendo nel contempo al miglioramento del processo di trasformazione e di utilizzo dell'energia».

D.P.R. 59/2009:

Decreto di attuazione del D.Lgs. 192/05, ha la finalità di promuovere un'applicazione "omogenea, coordinata e immediatamente operativa" delle norme per l'efficienza energetica sul territorio nazionale. Definisce le metodologie, i criteri e i requisiti minimi di edifici e impianti relativamente alla:

- climatizzazione invernale (mantenendo l'assetto del DLgs 192/05);
- preparazione di acqua calda per usi sanitari (sull'argomento in realtà non si chiarisce il ruolo dell'obbligo delle fonti rinnovabili);
- climatizzazione estiva (la principale novità rispetto al DLgs 192/05);
- illuminazione artificiale di edifici del terziario (anche se poi nel testo del decreto non se ne parla).

Per quanto riguarda gli ambiti d'applicazione, il quadro del DLgs 192/05 non è stato modificato.

D.M. 26 giugno 2009:

Il Decreto ministeriale detta le linee guida per la certificazione energetica degli edifici, si prefigge di raggiungere le seguenti finalità:

- a) Fornire informazioni sulla qualità energetica degli immobili e strumenti di chiara ed immediata comprensione:
 - per la valutazione della convenienza economica a realizzare interventi di riqualificazione energetica delle abitazioni.

- per acquisti e locazioni di immobili che tengano adeguatamente conto della prestazione energetica degli edifici;
- b) Contribuire ad una applicazione omogenea della certificazione energetica degli edifici coerente con la direttiva 2002/91/CE e con i principi desumibili dal decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, attraverso la definizione di una procedura nazionale che comprenda:
- l'indicazione di un sistema di classificazione degli edifici;
 - l'individuazione di metodologie di calcolo della prestazione energetica utilizzabili in modo alternativo in relazione alle caratteristiche dell'edificio e al livello di approfondimento richiesto;
 - la disponibilità di metodi semplificati che minimizzino gli oneri a carico dei cittadini.

Le Linee guida si applicano alle Regioni e Province autonome che non abbiano ancora provveduto ad adottare propri strumenti di certificazione energetica degli edifici in applicazione della direttiva 2002/91/CE e comunque sino alla data di entrata in vigore dei predetti strumenti regionali di certificazione energetica degli edifici.

Al fine dello svolgimento del presente lavoro occorre sottolineare quanto previsto dal decreto nell'allegato A, in merito al "Metodo di calcolo da rilievo sull'edificio"; sono infatti previste delle procedure di rilievo anche strumentali, sull'edificio e/o su dispositivi impiantistici, inoltre sempre all'allegato A, si prevede che "il soggetto certificatore, nell'ambito della sua attività di diagnosi, verifica e controllo, può procedere alle ispezioni ed al collaudo energetico delle opere, avvalendosi, ove necessario, di tecniche strumentali".

Le tecniche strumentali, che possono servire come supporto al "collaudo energetico", oppure ad una migliore diagnosi dell'edificio, per individuare interventi mirati che possano migliorare la classe energetica degli edifici sono:

- Valutazione qualitativa dell'involucro termico dell'edificio mediante termografia ad infrarossi (norma UNI EN 13187),
- Valutazione del valore di trasmittanza in opera (norma ISO 9869);
- Valutazione della permeabilità all'aria dell'edificio (o "blower door test", norma UNI EN 13829)

3.2.3. NORMATIVA REGIONALE VENETO

In materia di certificazione energetica degli edifici, la Regione Veneto non ha al momento dettato una disciplina regionale in materia, si applica quindi la normativa nazionale (Dlgs 192/2005 e successive modifiche, Dpr 59/2009, Dm 26 giugno 2009).

Verrà di seguito riportata la normativa principale riguardante le misure energetiche

L.R. 27 dicembre 2000 N. 25:

La legge ha dettato le norme per la pianificazione energetica regionale, l'incentivazione del risparmio energetico e lo sviluppo delle fonti rinnovabili di energia. Le finalità perseguite da questa legge risultano.

- a) l'uso razionale dell'energia;
- b) il contenimento del consumo energetico;
- c) la riduzione dei gas serra mediante la valorizzazione e l'incentivazione dell'utilizzo delle fonti rinnovabili di energia.

Inoltre la normativa prevede la predisposizione del Piano Energetico Regionale (PER), il quale ha la funzione di definire le linee di indirizzo e di coordinamento della programmazione provinciale in materia di promozione delle fonti rinnovabili e del risparmio energetico.

L.R. 9 marzo 2007 n. 4

Con tale legge la regione Veneto ha dettato norme in materia di edilizia sostenibile; le finalità che la norma vuole perseguire sono quelle di tutelare la qualità della vita, dell'ambiente e del territorio, incentivando nelle opere di edilizia pubblica e privata la sostenibilità energetico – ambientale, quindi l'osservanza di tecniche e teorie progettuali che producano immobili rispettosi dei principi di compatibilità con l'ambiente e che siano in grado di migliorare la qualità della vita.

In tale norma come ovvio, parlando di sostenibilità, viene esplicitamente presa in considerazione l'efficienza energetica, infatti all'art.2 lettera d) si prevede in merito alle tipologie di intervento che: *“privilegiare l'impiego di materiali e manufatti di cui sia possibile il riutilizzo anche al termine del ciclo di vita dell'edificio e la cui produzione comporti un basso consumo energetico”*.

Degno di nota risulta essere la previsione di contributi regionali per coloro che adottino negli interventi edilizi misure di sostenibilità.

La legge prevede inoltre che vengano emanate dalla Giunta Regionale delle Linee Guida per la *“ valutazione della qualità ambientale ed energetica espressa dai singoli interventi di bioedilizia, ai fini dell’ammissibilità degli stessi alla contribuzione regionale prevista dalla presente legge e della graduazione dei contributi stanziati.... Dette linee guida costituiscono inoltre riferimento per l’elaborazione e l’integrazione degli strumenti edilizi ed urbanistici comunali”*

Dgr 17 giugno 2008, n. 1579 e Dgr 07 luglio 2009 n. 2063

Il Decreto 1579 detta le linee guida previste dalla sopracitata L.R. 4/07, mentre il decreto 2063, aggiorna e semplifica le precedenti linee guida, definendo le modalità di attuazione dell’intervento finanziario regionale.

3.2.4. P.A.T. COMUNE DI FELTRE

Il 3 luglio 2006 il Consiglio Comunale di Feltre, ha adottato il Piano di Assetto Territoriale (P.A.T), in adeguamento alle indicazioni della L.R. 11 del 23 aprile 2004 della Regione Veneto.

Seguendo quindi tali indicazioni, il Piano comunale legifera in materia di contenimento energetico, in particolare all’art. 44 delle NTA prevede:

“art. 44: Norme a favore del contenimento dei consumi energetici e dell’edilizia sostenibile: *Il P.A.T., con l’obiettivo della tutela e riqualificazione ambientale, promuove la realizzazione di interventi edilizi che riducano al minimo i consumi energetici e che, usando tecnologie ecocompatibili, favoriscano lo sviluppo sostenibile. Il P.I. definirà modalità e procedure per l’attuazione e la verifica concreta del principio suesposto, anche prevedendo incentivi quali l’assegnazione di credito edilizio. Gli indirizzi e le direttive sono contenuti nell’allegato I alla Relazione di Progetto”.*

Quindi all’interno del punto 4.2.9 della Relazione Generale all’ Allegato I, Indirizzi e criteri per l’incentivazione della qualità architettonica, vengono indicati le finalità e le modalità per il raggiungimento dell’efficienza energetica degli edifici, in particolare al punto 1 dell’Allegato: Indirizzi e criteri si prevede:

“Il P.A.T. intende premiare e promuovere gli edifici ecocompatibili, con tecniche costruttive e uso di materiali indirizzati al risparmio energetico, attraverso forme di incentivazione e nel rispetto dei criteri sotto esposti.

Il P.I., attraverso specifici regolamenti, dovrà dare attuazione a tali criteri stabilendo le “specifiche tecniche”, le modalità di valutazione e di incentivazione. Attraverso tali regolamenti il Comune dovrà perseguire, oltre al rispetto dei criteri qui esposti, la promozione presso la popolazione degli interventi che presentino i requisiti della qualità architettonica”

Inoltre il Punto 2, nel comma riguardante il Contenimento del consumo energetico (Efficienza Energetica)(E) detta:

“...Finalità dell'intervento dovrà essere, oltre all'ottimizzazione dei consumi energetici, rendere consapevole il cittadino, attraverso informazioni facilmente comprensibili, delle caratteristiche energetiche dell'edificio.

Elementi di cui tenere conto:

- *studio del sito e dell'esposizione, massimizzazione degli apporti solari e passivi, e protezione dal calore durante i mesi estivi;*
- *ottimo isolamento termico;*
- *forma edificatoria semplice e compatta, che riduca le dispersioni di calore;*
- *utilizzo di serramenti ad alto potere isolante;*
- *utilizzo di materiali con limitato fabbisogno energetico nel ciclo produttivo, che siano durevoli e possibilmente riciclabili;*
- *progettazione e realizzazione accurata, che eviti i ponti termici;*
- *impiantistica ottimizzata.”*

4. INQUADRAMENTO TERRITORIALE (AREA DI STUDIO)

L'area di studio, che verrà presa in esame è il centro storico del Comune di Feltre in Provincia di Belluno (Veneto), lavorando su una porzione del centro storico di Feltre detto Cittadella, in particolare il lavoro avrà come campione Piazza Trento Trieste (fig. 19, 20, 21, 22, 23, 24)



Figura 23: regione Veneto



Figura 23: Provincia di Belluno



Figura 23: Comune di Feltre

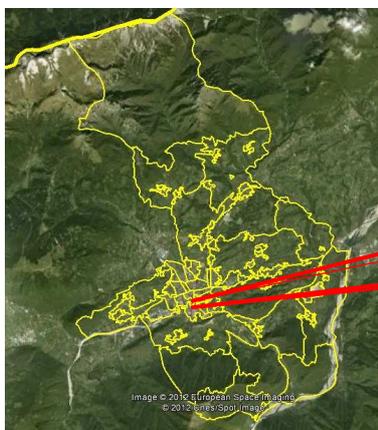


Figura 23: Territorio Comunale di Feltre

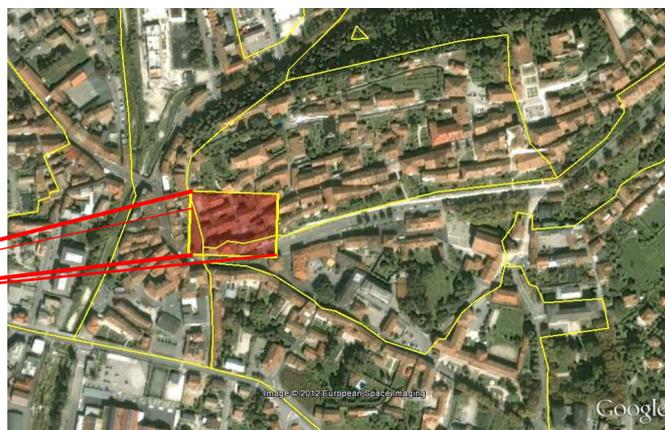


Figura 23: Localizzazione di Piazza Trento Trieste

L'intento del presente lavoro è quindi quello di produrre una mappa tematica contenente una classificazione delle dispersioni termiche delle facciate del centro storico e un'elaborazione tridimensionale del centro storico, con visualizzazione delle facciate termiche degli edifici (*thermal city model*).

Feltre è una città di circa 20900 abitanti, con una superficie territoriale di 100,60 km² ed una densità di 207,99 abitanti / km², la quota media comunale è di 325 metri s.l.m.

Il Comune di Feltre si trova nella parte sud-occidentale della Provincia di Belluno, disteso in una conca che abbraccia a nord le Vette Feltrine e a sud il monte Grappa, mentre a est viene lambito dalle acque del fiume Piave.

Per quanto riguarda il centro storico, la forma della Cittadella di Feltre è dettata dalla natura dello scosceso Colle delle Capre e ha due segni forti: la cinta allungata delle mura e l'asse rettilineo di via Mezzaterra. Agli estremi si aprono la porta Imperiale, principale ingresso all'abitato, e la porta Oria, sulla strada per Belluno. La Piazza si trova proprio all'ingresso sud-occidentale della Cittadella vecchia, dopo il passaggio di Porta Imperiale (fig. 25)



Figura 24: immagini della piazza Trento Trieste nella Cittadella di Feltre



Figura 25: Porta Imperiale

Per quanto riguarda i dati climatici dell'area d'interesse si riportano le seguenti informazioni desunte dal *D.P.R. n. 412 del 26 agosto 1993, tabella A e successive modifiche ed integrazioni.*

Zona Climatica

Il comune di Feltre risulta essere in zona climatica **F**

Il che significa:

Nessuna limitazione per l'accensione degli impianti termici.

L'Italia è divisa in sei zone climatiche che variano in funzione dei gradi-giorno (GG) associati al territorio comunale:

zona A: comuni con $GG \leq 600$

zona B: $600 < \text{comuni con } GG \leq 900$

zona C: $900 < \text{comuni con } GG \leq 1.400$

zona D: $1.400 < \text{comuni con } GG \leq 2.100$

zona E: $2.100 < \text{comuni con } GG \leq 3.000$

zona F: comuni con $GG > 3.000$

Gradi Giorno (GG):

il valore dei Gradi Giorno per il Comune di Feltre è di **3097**

Il Grado Giorno (GG) è l'unità di misura che stima il fabbisogno energetico necessario per mantenere un clima confortevole nelle abitazioni. Rappresenta la somma degli incrementi medi giornalieri di temperatura necessari per mantenere a 20 °C il clima interno delle abitazioni. Più alto è il valore del GG e maggiore è la necessità di tenere acceso l'impianto termico.

5. PORTATORI DI INTERESSI E PARTECIPAZIONE

5.1. INTRODUZIONE

L'aumento del consumo di fonti fossili e della conseguente dipendenza energetica dall'estero, l'incremento delle pressioni ambientali determinate dall'attuale sistema di produzione e di utilizzo dell'energia, l'appesantimento delle bollette energetiche di imprese e cittadini sono le principali questioni che l'Unione europea intende affrontare attraverso la definizione della nuova stagione di politiche energetiche basate sulla lotta al cambiamento climatico e sulla promozione di un'energia competitiva, sostenibile e sicura¹⁰.

A livello locale, l'obiettivo che occorrerebbe raggiungere, dovrebbe essere quello di arrivare alla costituzione di Sistemi Energetici Locali quanto più indipendenti e autosufficienti dal punto di vista energetico. L'indipendenza energetica implica di fatto la riduzione della vulnerabilità delle Comunità Locali rispetto ad eventuali difficoltà di approvvigionamento delle risorse energetiche a livello globale e lo sviluppo di un'economia e di un mercato locale.

In questo contesto perciò, la partecipazione diviene condizione indispensabile per lo sviluppo sostenibile delle città, in quanto i cittadini stessi con la modifica dei loro comportamenti possono diventare i protagonisti di un nuovo modello di sviluppo.

Quindi tra gli obiettivi da perseguire per uno sviluppo sostenibile rientra anche un'adeguata comunicazione e condivisione della visione futura della città con le altre istituzioni, con i portatori di interesse del territorio e con i cittadini. In tutto questo l'Amministrazione ha un ruolo fondamentale, in quanto risulta essere il soggetto che coordina e incentiva tali iniziative. Occorre aprire un dialogo con diversi soggetti del mondo imprenditoriale, delle associazioni dei consumatori, dei rappresentanti delle

¹⁰ Il Parlamento europeo, su proposta della Commissione, ha approvato i seguenti obiettivi al 2020: ridurre del 20% i consumi energetici; incrementare fino al 20% l'apporto da fonti energetiche rinnovabili sul consumo totale; ridurre del 20% le emissioni di gas serra rispetto ai valori del 1990. Il 15 dicembre 2010 il Parlamento europeo ha votato perché il 20% di riduzione dei consumi energetici diventi obiettivo legalmente vincolante. Il 9 marzo 2011 la Commissione europea ha adottato una tabella di marcia – Roadmap 2050 - per trasformare l'Europa in una società a basse emissioni di carbonio entro il 2050. La tabella di marcia indica all'Europa la strada per conseguire in maniera economicamente sostenibile l'obiettivo UE di ridurre le emissioni di gas a effetto serra dell'80-95% rispetto ai livelli del 1990. Il Consiglio europeo ha approvato l'obiettivo dell'Unione europea di ridurre entro il 2050 le emissioni di gas a effetto serra dell'80-95% rispetto ai livelli del 1990 quale contributo a lungo termine dell'UE per scongiurare pericolosi cambiamenti climatici. La tabella di marcia presenta il modo di raggiungere tale obiettivo in maniera economicamente sostenibile e raccomanda all'Europa di perseguirlo soprattutto attraverso misure proprie, dal momento che di qui al 2050 diminuirà notevolmente la disponibilità di crediti internazionali per compensare le emissioni. Entro il 2050 l'UE dovrebbe quindi riuscire a ridurre le emissioni dell'80% (rispetto ai livelli del 1990) contando unicamente su interventi interni. L'eventuale ricorso a crediti contribuirebbe comunque a ridurre complessivamente le emissioni di oltre l'80%. Il modello economico globale sul quale si basa la tabella di marcia dimostra che, per realizzare riduzioni interne dell'80% entro il 2050, è necessario che le emissioni dei gas a effetto serra siano ridotte del 40% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2030 e del 60% entro il 2040. Lo scorso 24 maggio, infine, la Commissione ambiente del Parlamento europeo ha chiesto che l'obiettivo UE di riduzione delle emissioni di gas serra passi al 2020, dal 20 al 30%.

categorie produttive e del mondo dell'associazionismo in generale per sviluppare questi temi, utilizzando diversi strumenti, come ad esempio l'urbanistica partecipata, spesso realizzata con strumenti dai più tradizionali ai più innovativi, la quale ha l'obiettivo principale di coinvolgere i cittadini nelle trasformazioni della città. I cittadini diventano quindi un fulcro nell'ambito di sviluppo sostenibile, ma più in particolare nell'ambito dell'efficienza energetica, in quanto essi stessi, potranno monitorare i consumi nel tempo e verificare i risultati raggiunti durante gli anni.

Quindi i principi base per il raggiungimento di sistemi energetici locali risultano essere:

- SOSTENIBILITA'
 - o Scegliere il best mix di risorse rinnovabili locali (sole, vento, biomasse etc.) nel rispetto dell'ambiente e degli ecosistemi locali
 - o Dare impulso al mercato locale incentivando l'iniziativa privata e creando lavoro e occupazione
- INNOVAZIONE
 - o Introdurre nuove soluzioni tecnologiche e gestionali
 - o Introdurre misure adeguate, nuovi strumenti, materiali più avanzati e innovativi per migliorare l'efficienza energetica nei diversi settori
- INTEGRAZIONE
 - o Integrare gli strumenti di Pianificazione territoriale e con le norme vigenti
 - o Integrare tecnologia e territorio
 - o Integrare politiche energetiche e interessi collettivi
- PARTECIPAZIONE
 - o Coinvolgere gli attori locali nella definizione di strategie energetiche locali
 - o Formare persone al fine di creare sapere diffuso e una comune sensibilità
 - o Fare attività di networking con le altre realtà locali

5.2. MAPPATURA DEI PORTATORI D'INTERESSI

Sono considerati portatori di interesse nell'ambito dell'efficienza-risparmio energetico tutti coloro che rappresentano il mondo dell'energia da tutti i punti di vista partendo dal produttore fino ad arrivare al consumatore di energia, inclusi coloro che appartengono al processo edilizio. Tali soggetti possono essere aggregati nelle seguenti sei categorie:

- Imprese e Professionisti: rappresentano coloro che dal processo di risparmio energetico possono trarre lavoro, o comunque avere effetti diretti sulla fornitura

energetica. Rientrano in questi ambito sia imprese di costruzione, le quali operano nell'ambito edilizio, sia aziende di fornitura energetica, le quali da questo processo possono investire nelle fonti rinnovabili, sia i professionisti, per consulenze o progettazione di interventi. Le imprese possono anche avere effetti diretti sulla propria spesa energetica, sia tramite l'impiego di fonti rinnovabili, sia tramite azioni e interventi atti al risparmio energetico sui propri edifici. Possono prevedere strumenti di pubblicità e sensibilizzazione al risparmio energetico, con effetti di aumento della fornitura dei propri prodotti, ad esempio per la fornitura di materiali isolanti

- Enti Locali: hanno la funzione di prevedere aggiornamento degli atti normativi ed integrazione degli strumenti di Pianificazione territoriale. Attuano politiche energetiche atte al raggiungimento degli interessi collettivi, promuovono forme partecipative e creano conoscenza condivisa. Possono avere effetti diretti sulla riduzione dei consumi energetici delle proprie strutture. Possono prevedere ed erogare incentivi per i soggetti che intendono attuare opere per il miglioramento della qualità energetica dei propri edifici
- Enti di Ricerca ed Enti Tecnici: hanno il principale compito tramite il lavoro di ricerca e sviluppo di individuare nuove soluzioni tecnologiche e gestionali, per il raggiungimento dell'obiettivo di risparmio energetico. Ad esempio la scoperta di nuovi materiali o nuove soluzioni per il contenimento delle dispersioni energetiche degli edifici.
- Istituti Finanziari: Molti istituti bancari hanno scelto di offrire ai clienti prodotti finanziari particolari per incentivare la realizzazione di scelte compatibili dal punto di vista ambientale, privilegiando così l'adozione di tecnologie, impianti e strumenti che favoriscono il risparmio energetico, l'utilizzo di fonti di energia rinnovabili e di materiali di bioedilizia
- Comunità locali: i cittadini, possono avere effetti derivanti dal minor consumo energetico estivo e invernale e una migliore qualità della vita, effetto indiretto della politica efficienza energetica. Possono accedere agli incentivi pubblici e a prodotti finanziari apposti per l'efficienza energetica da parte degli istituti di credito.
- Altri soggetti: le associazioni ambientaliste e associazioni non governative

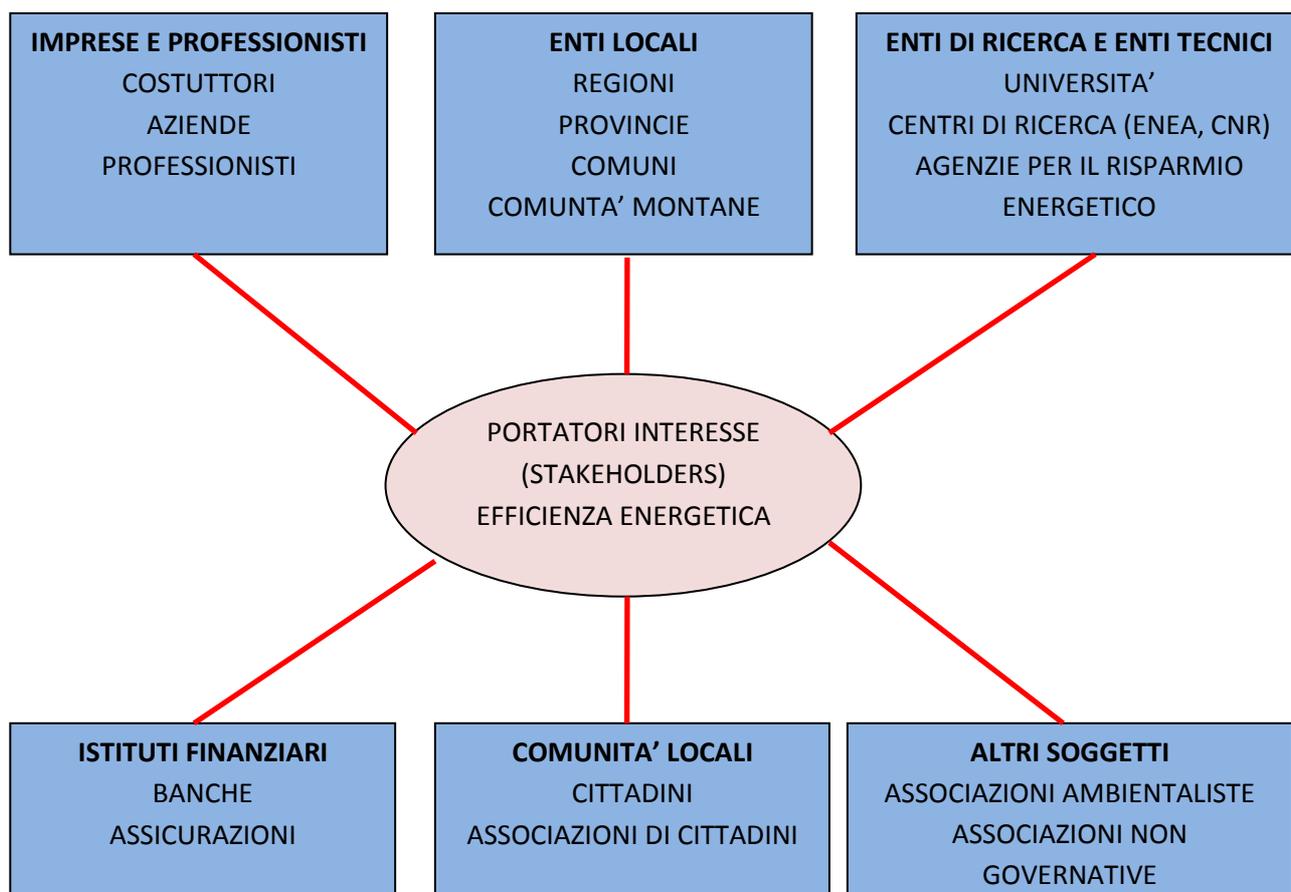


Figura 26: schema dei portatori d'interessi nel campo dell'efficienza energetica

A partire dalle macro-categorie individuate è importante definire in modo condiviso:

- i criteri di rappresentatività dei soggetti coinvolti (quali soggetti possono essere considerati portatori di interessi e chi rappresentano)
- il grado di partecipazione che si vuole raggiungere (quanti soggetti per ogni categoria si ritiene opportuno coinvolgere per il raggiungimento dei risultati prefissi e per la buona riuscita del processo di Piano)
- gli attori istituzionali, economici e sociali, che è indispensabile coinvolgere attivamente nel progetto

5.3. IL PROCESSO PARTECIPATIVO

Una volta individuati i vari attori che risultano portatori d'interessi nel campo dell'efficienza energetica, occorre attivare percorsi partecipati, volti a coinvolgere tutti quei soggetti che agiscono in un determinato territorio.

Per questo, sarà opportuno procedere all'individuazione di tutti gli strumenti di comunicazione che potrebbero risultare più o meno idonei ad agevolare e favorire

l'interattività e il governo delle relazioni. Di seguito viene presentata una tabella riassuntiva dei principali strumenti e dei loro vantaggi / svantaggi.

ATTIVITA'	VANTAGGI	SVANTAGGI
Workshop Convegni Seminari	Persone sentono che i loro pensieri hanno valore Possono essere creative e flessibili Dibattiti mirati, possibilmente meno polemici coinvolgono interessati e ben informati Aiutano a formare un punto di vista comune	Si potrebbero creare aspettative che non possono avere seguito Necessitano gestione accurata, continuità e follow-up, dipendente su qualità di agevolazione Non risulterà necessariamente un punto di vista bilanciato
Newsletter , whitepaper, etc.	Danno opportunità di dialogo a tutti Contribuiscono a rafforzare immagine del progetto Si coordinano con il sito web	Potrebbero diventare faticosi se il processo si prolunghi nel tempo C'è il rischio di utilizzo di troppi termini tecnici
Esibizioni e Info-Day	Visibili per tutta la comunità Danno l'opportunità di presentare contesti e questioni ad un grande numero di persone molto facilmente Utili per distribuire newsletters, questionari, educational, o come sfondo per altre riunioni Uno staff di tecnici potrà rispondere domande e attirare interesse	Potrebbero avere poca affluenza Non tutte le location potrebbero essere ugualmente attraenti Rischio di tediosità
Info Point e Urban Center	Costituiscono uno strumento di comunicazione permanente sul territorio Valorizzano non solo il trasferimento di informazioni ma anche il rapporto tra Pubblica amministrazione e Comunità	Oneroso da realizzare sia in termini di tempo che di risorse Perde in flessibilità Richiede una capacità di gestione e coordinamento della struttura
Ufficio stampa e Local Media Relation	Potenzialmente potrebbe avere grande audience Relativamente poco costoso Buono per relazioni pubbliche Innalza la consapevolezza e la sensibilità	Incertezza su come i materiali verranno utilizzati dai media che potrebbero non pubblicare niente, sbagliare i fatti, o puntare sul negativo anziché sul positivo
Flyer brochure	Utile per identificare macro temi Facile da produrre Utile per public relation Ampia copertura	Occorrono tempo e soldi per produrli Potrebbero essere troppo semplificativi Potrebbero incoraggiare delle pretese non giustificabili

<p>Siti web e Strumenti networking su Internet</p>	<p>Potenzialmente grande audience</p> <p>Innalza la consapevolezza e i provider hanno accesso ai dati</p> <p>Immagine positiva</p> <p>Possibilità di utilizzare i social network per formare gruppi tematici</p>	<p>Qualche settore della popolazione potrebbe essere impaurito da questi tipi di veicoli</p> <p>Occorre costante aggiornamento per rimanere di rilevante interesse</p> <p>Potrebbe essere costoso e impersonale</p>
<p>Formazione e Training</p>	<p>Possibilità di approfondire aspetti e temi specifici</p> <p>Innalza la sensibilità</p> <p>Documenti e paper studio facilmente distribuibili</p>	<p>Difficile coinvolgere particolare tipologie di stakeholder</p> <p>(es. politici)</p> <p>Molto focalizzato</p> <p>Attività costose e dispendiose</p>
<p>Gadget(magliette, magneti, penne, etc.)</p>	<p>Hanno un alto potenziale attrattivo, in quanto consentono di catturare facilmente l'attenzione delle persone</p> <p>Facili da distribuire consentono di veicolare il messaggio in maniera efficace</p> <p>Consentono un consolidamento dell'informazione, in quanto solitamente vengono utilizzati più di una volta (es. t-shirt)</p>	<p>Contengono messaggi e informazioni "spot"</p> <p>Non approfondiscono un problema, ma sollevano solo l'attenzione</p> <p>Potrebbero essere costosi e impersonali</p>

Il processo partecipativo e di sensibilizzazione della popolazione alla problematica dell'efficienza energetica degli edifici, deve tener conto degli obiettivi diretti da perseguire, nel nostro caso l'obiettivo di sensibilizzare cittadini e proprietari di edifici (enti, aziende) alla problematica del contenimento energetico, indicando lo stato di dispersione degli edifici, gli incentivi a cui è possibile accedere e le soluzioni che possono essere impiegate. Occorre però sottolineare un fenomeno che si può creare a seguito di politiche di efficienza energetica, il così detto "Paradosso di Jevons".

Il "Paradosso di Jevons", deriva da uno studio effettuato da William Stanley Jevons, il quale affermò che i miglioramenti tecnologici che aumentano l'efficienza con cui una risorsa è usata possono fare aumentare il consumo totale di quella risorsa, invece di diminuire. Questo risulta un paradosso proprio perché normalmente l'aumento di efficienza si traduce in una diminuzione di costi, ma di contro quello che viene registrato è aumento dei consumi. Ad esempio nel caso delle dispersioni energetiche, quello che può accadere è che dopo aver coibentato casa o dopo aver acquistato una caldaia più efficiente, si può verificare un aumento della temperatura impiegata per il riscaldamento

durante il periodo invernale, passando per esempio da una temperatura interna del locale di 18 C° a una temperatura di 22 C°. Per questo motivo si ritiene che nel processo partecipativo i soggetti che possono avere interessi diretti quali cittadini, aziende (proprietari di immobili), debbano essere sensibilizzati ed informati, oltre alle problematiche dei consumi di tipo economico, anche alle problematiche ambientali connesse alla combustione di fonti fossili, quali emanazione di gas serra, isole di calore e particolato educandoli al buon utilizzo dell'energia e all'eliminazione degli sprechi connessi ad un errata consuetudine di azioni di comportamento quotidiano.

6. FONTI INFORMATIVE

Per lo sviluppo del presente lavoro, si è partiti da alcuni dati forniti dallo spin-off dell'Università IUAV di Venezia, UniSky srl, la quale ha svolto alcuni progetti nell'area feltrina. In particolare i dati di partenza sono stati:

- File .las derivanti da rilievi LIDAR da aereo. I cui punti di acquisizione avevano una risoluzione di 8 punti a metro quadrato. I dati di partenza risultano già classificati in:
 - o BLD (Building): rappresentano i soli punti delle coperture degli edifici
 - o GROUND: rappresentano i soli punti del terreno
 - o OVERGROUND: la somma dei due precedenti, sono i punti acquisiti dal volo lidar e non classificati

Con sistema di riferimento geodetico Roma 1940 e proiezione conforme Gauss-Boaga fuso Ovest

- Immagini termografiche in formato bitmap in RGB. Le immagini sono state acquisite rilevando in continuo porzioni di edifici.
- File .3pf e .txt contenenti punti di edifici rilevati tramite laser scanner terrestre. I file .3pf sono stati forniti in un sistema di riferimento cartesiano xyz relativo, i file txt, sono composti da colonne contenenti coordinate dei punti nel sistema di riferimento geodetico Roma 40 e proiezione conforme di Gauss-Boaga fuso Ovest, altimetria relativa al livello medio del mare (riferimento mareografo di Genova), ampiezza d'onda del segnale e colonne contenenti i valori delle bande R G B. Lo schema della tabella è il seguente

ID	X [m]	Y [m]	Z [m]	Amplitude[0..1]	R	G	B
----	-------	-------	-------	-----------------	---	---	---

- Ortofoto a colori RGB, in formato TIFF ad altissima risoluzione spaziale di 0,05x0,05 m. Già georeferenziate nel sistema di riferimento geodetico Roma 1940, con proiezione conforme Gauss-Boaga fuso Ovest.

Di seguito vengono descritte le tecnologie impiegate e i principi fisici che stanno alla base di tali tecnologie e tecniche, in particolare verranno prese in considerazione.

- Termografia

- Sistemi a scansione laser, differenziandoli per tecniche di rilevamento impiegate.
 - o Laser scanner terrestre
 - o Rilevamento LIDAR da aereo

6.1. TERMOGRAFIA TERRESTRE

6.1.1. Introduzione

L'analisi di immagine termografiche, nel campo del patrimonio edilizio esistente, sia di recente costruzione, ma in particolar modo in quello storico (dove l'individuazione delle tipologie costruttive risulta più difficoltosa), consentono di effettuare una valutazione qualitativa delle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio e dei sistemi impiantistici. Infatti la termografia risulta essere una tecnica d'indagine non invasiva, né distruttiva, la quale viene effettuata tramite l'impiego di apposite macchine (termocamere), che misurano l'intensità di radiazione infrarossa dello spettro elettromagnetico.

Verranno di seguito esposti i principi che stanno alla base della termografia, (concetto di temperatura, lo spettro elettromagnetico e l'infrarosso, leggi fisiche) fino ad arrivare alle tecniche di rilevamento termografico e l'ambito applicativo per la valutazione delle dispersioni energetiche degli edifici.

6.1.2. La temperatura

Il trasporto di energia avviene per:

- *Convezione*: avviene in un fluido in movimento in cui parti calde trasferiscono durante il loro moto (generalmente turbolento) calore a parti più fredde
- *Conduzione*: viene trasferita, all'interno dello stesso corpo o tra corpi in contatto, energia cinetica per urti tra molecole attraverso la materia.
- *Irraggiamento*. La trasmissione di calore avviene a distanza (anche nel vuoto) per emissione e assorbimento di onde elettromagnetiche, avviene indipendentemente dalla presenza di un mezzo

Benché questi tre processi siano fondamentalmente diversi fra di loro, essi sono in relazione tramite la temperatura, la quale risulta comune a tutti e tre.

La temperatura è la misura in gradi del calore o del raffreddamento di un corpo (Quattrochi, Luvall, 2009). Questa a sua volta è legato, a livello atomico/molecolare, all'attività interna del corpo, infatti, le molecole che costituiscono un oggetto, sono

perennemente in movimento, o per dire meglio, sono in costante vibrazione e questo le porta ad urtarsi vicendevolmente. L'energia sprigionata da questo movimento casuale delle molecole è detta energia cinetica e produce un calore detto calore cinetico (che è pur sempre una forma di energia). La temperatura cinetica è la misura della concentrazione di questo calore cinetico all'interno del corpo e quindi è riferita alla temperatura interna del corpo o temperatura reale.

Quando le molecole si scontrano cambiano il loro stato energetico e l'energia viene rilasciata sotto forma di radiazione elettromagnetica, la quale costituisce il cosiddetto flusso radiante. In definitiva la temperatura radiante non è altro che la misurazione del flusso radiante uscente da un corpo, ed è proprio quella misurata dalla termografia. Tale temperatura può essere vista anche come il valore della temperatura esterna del corpo. In termini assoluti, la temperatura radiante di un corpo naturale è sempre inferiore alla temperatura cinetica del medesimo corpo. In termini relativi, si ha che la maggior temperatura cinetica del corpo corrisponde ad una maggior temperatura radiante. Tuttavia, questa relazione tra temperatura radiante e temperatura cinetica è una relazione non lineare e varia per materiali differenti sulla base di un'unica proprietà del corpo detta *emissività* in cui il coefficiente di emissione spettrale $\epsilon\lambda$ condiziona fortemente l'interpretazione dei dati in termini di temperatura superficiale. Da queste, per ricavare l'effettiva temperatura delle superfici, bisogna conoscere il corrispondente valore di $\epsilon\lambda$.

Inoltre, la temperatura radiante descrive solo la condizione termica della superficie del corpo, mentre la temperatura cinetica può riferirsi alla pura temperatura interna. La temperatura cinetica della superficie di un corpo può essere misurata mediante strumenti a contatto, come i comuni termometri, mentre, la temperatura radiante può essere rilevata mediante radiometri.

6.1.3. Lo spettro elettromagnetico e la banda dell'infrarosso

Lo spettro elettromagnetico è il continuo monodimensionale consistente in un insieme di radiazioni elettromagnetiche ordinate normalmente secondo la lunghezza d'onda (λ), oppure secondo la frequenza o l'energia fotonica. Comprende onde di ogni lunghezza, dalle frazioni del millesimo di millimetro fino a molti chilometri. Il campo dello spettro elettromagnetico (nel caso in cui venga ordinato per lunghezza d'onda) viene di norma diviso in:

- luce visibile: così definita perché compresa nell'intervallo di sensibilità spettrale dell'occhio umano,
- i raggi cosmici gamma (γ),
- raggi X,
- ultravioletto,
- infrarosso,
- visibile,
- microonde,
- onde radio.

La radiazione elettromagnetica consiste in campi di forza elettrici e magnetici ortogonali tra loro e rispetto alla direzione di propagazione; viene definita in base a:

- lunghezza d'onda (λ): espressa in micron μm , è la distanza che separa due picchi adiacenti dell'onda;

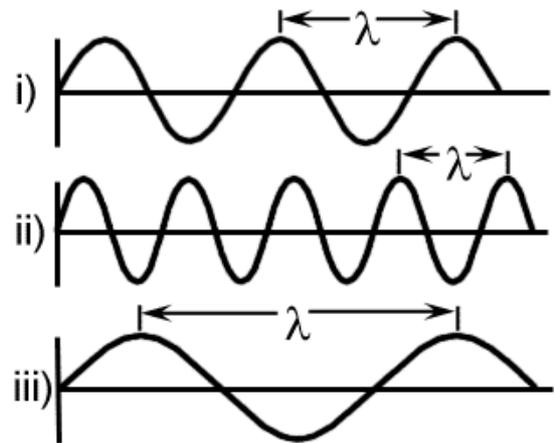


Figura 27: lunghezza d'onda

- frequenza (ν): il numero di picchi d'onda che passano in un dato punto in una unità di tempo, espressa in Hertz (Hz) o cicli al secondo

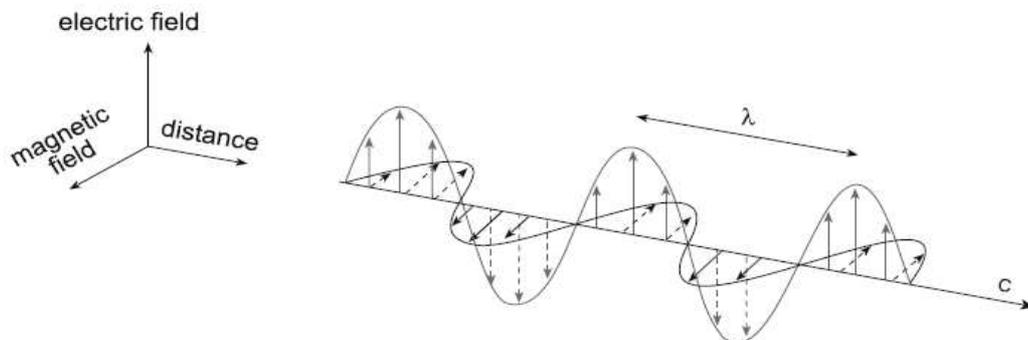


Figura 28: la propagazione dell'energia elettromagnetica, avviene alla velocità della luce "c" secondo un modello definito dalla teoria ondulatoria: la lunghezza d'onda (λ) è inversamente proporzionale alla frequenza (ν)

6.1.4. Principi fisici nell'infrarosso termico

Le leggi fisiche nel campo dell'infrarosso termico sono una serie di leggi che valgono in generale per un corpo nero, verranno di seguito descritte:

Radiazione del corpo nero, e concetto di emissività

Per tutti i corpi naturali, come precedentemente detto (par.6.2.1.2), la temperatura radiante è sempre inferiore alla temperatura cinetica. A tale corpo si contrappone un modello teorico detto *corpo nero*, che rappresenta un corpo in perfetto equilibrio termico per il quale la temperatura radiante coincide con la temperatura cinetica. Un corpo nero ha la proprietà di assorbire tutte le radiazioni incidenti indipendentemente dalla lunghezza d'onda, non riflette né trasmette energia, apparendo quindi in prima approssimazione nero. Successivamente è in grado di riemettertele all'esterno in tutte le lunghezze d'onda possibili. Il limite teorico della lunghezza d'onda in cui un corpo nero può emettere è praticamente infinito.

Ad una particolare temperatura, il corpo nero emetterebbe la massima quantità di energia possibile per quella temperatura. Questo valore è noto come *radiazione del corpo nero*. Esso emette quindi una quantità definita di energia ad ogni lunghezza d'onda per una particolare temperatura, è così possibile modellare delle curve standard della radiazione di un corpo nero generate per ogni temperatura, mostrando l'energia radiante per ogni lunghezza d'onda (fig. 22)

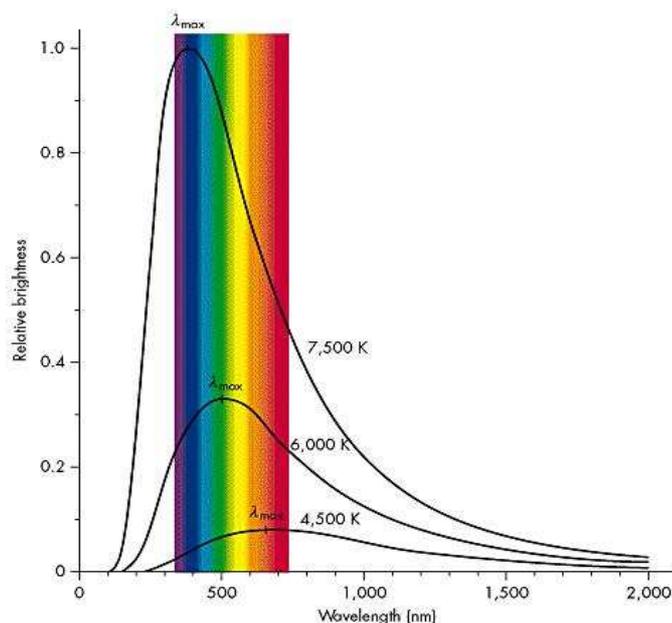


Figura 30: distribuzione spettrale della radiazione di corpo nero

A lunghezze d'onda molto elevate la quantità di energia emessa è molto piccola. Per un corpo nero questa energia emessa diventa sempre più piccola (vicino allo zero). La curva di radiazione di un corpo nero per temperature molto basse tende ad appiattirsi avvicinandosi molto all'asse delle ascisse senza però mai intersecarlo, in quanto vi è sempre una piccola quantità di energia emessa in qualsiasi lunghezza d'onda.

Per ricavare la temperatura, si confrontano i valori misurati di *emissività* con una tabella di calibrazione generata da sorgenti costituite da corpi neri. L'assunzione implicita è che il target sia un corpo grigio (graybody), ovvero un corpo con *emissività* inferiore per qualsiasi lunghezza d'onda considerata rispetto a quella del corpo nero. La maggior parte delle volte questo è vero, ma per una più accurata misura, dovrebbe individuare la natura spettrale (cioè la lunghezza d'onda) dell'obiettivo. Max Planck fu il primo a sviluppare il modello matematico del corpo nero.

L'emissività di un materiale indicata normalmente con ϵ , è la proprietà caratteristica di un mezzo materiale di emettere una radiazione elettromagnetica. Si definisce come il rapporto tra la radiazione emessa da una superficie e quella emessa da una pari superficie di un corpo nero alla stessa temperatura. L'emissività dipende da vari fattori, uno dei quali è la lunghezza d'onda, tant'è che viene anche definita la cosiddetta emissività spettrale (ϵ_λ), ovvero quando ci si riferisce ad un determinato intervallo di lunghezza d'onda dell'energia emessa. Si può esprimere come:

$$\epsilon_\lambda = \frac{\text{Energia emessa da un corpo ad una data lunghezza d'onda e temperatura}}{\text{Energia emessa da un corpo nero alla medesima lunghezza d'onda e temperatura}}$$

Un vero corpo nero ideale avrebbe un $\epsilon = 1$, ciò significa che il materiale può assorbire tutta l'energia incidente e successivamente emetterla. In tal caso, la misura della temperatura radiante coincide con la temperatura reale (o cinetica). Un'emissività pari a zero implica che il corpo non assorbe nessuna radiazione all'interno dello spettro elettromagnetico. Questo sarebbe il caso di un riflettore ideale o, per contrario, di un ideale *corpo bianco*. I materiali naturali non sono né emettitori ideali né riflettori ideali. Sebbene la maggior parte delle superfici naturali hanno un'emissività piuttosto elevata, 0.9 o superiore, esistono materiali come i metalli levigati che hanno decisamente valori di emissività ben più bassi. Riassumendo dal momento che i corpi naturali non riescono né ad assorbire tutta l'energia incidente né ad emettere tutta quella immagazzinata, i loro valori di emissività sono sempre inferiori a 1, e la temperatura radiante misurata è sempre

minore della temperatura superficiale reale registrata in situ, quindi un oggetto reale ha un valore compreso tra $0 < \varepsilon < 1$ (corpo grigio). L'emissività dipende oltre che dalla lunghezza d'onda anche da altri fattori quali la temperatura, l'angolo di emissione, e la finitura superficiale del corpo osservato.

Legge di Plank

Definisce l'andamento della potenza emessa dalla superficie in funzione della lunghezza d'onda cui ci si riferisce.

Qualunque superficie esterna di un corpo, se a temperatura superiore allo zero assoluto espresso in gradi Kelvin [K] (-273,14 °C), emette radiazioni elettromagnetiche proprie che dipendono dalla temperatura del corpo e dalle caratteristiche fisiche – chimiche – geometriche della superficie, mentre riflette, assorbe o si lascia attraversare dalle radiazioni elettromagnetiche provenienti dall'esterno.

La radiazione elettromagnetica è definita dalla lunghezza d'onda (λ) e dalla frequenza d'onda (ν), legate tra loro da una relazione di proporzionalità inversa:

$$c = \lambda \nu \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

c: velocità della luce nel vuoto;

λ: lunghezza d'onda;

ν: frequenza d'onda

la velocità di propagazione della luce, o della radiazione elettromagnetica, si può ritenere costante nel vuoto pari a 300000 km sec⁻¹

La legge generale di Planck permette di calcolare per unità di superficie e di lunghezza d'onda, la densità di flusso radiante spettrale L_λ emessa da qualunque corpo, mediante la seguente espressione:

$$L_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{\pi \left(e^{\frac{ch}{\lambda KT}} - 1 \right)} \right) \varepsilon_\lambda$$

Dove:

λ = lunghezza d'onda in metri

L = radianza spettrale

h = costante di Planck = 6.62×10^{-34} Js

k = costante di Boltzmann = 1.38×10^{-23} JK⁻¹

T = temperatura in K

c = velocità della luce = 3×10^8 ms⁻¹

$\epsilon\lambda$ = emissività spettrale

Da questa formula emerge quanto l'energia emessa da un corpo nero (per il quale è valida la legge di Planck), a una data lunghezza d'onda, sia funzionale esclusivamente della temperatura del corpo stesso.

La figura denota chiaramente che all'aumentare della temperatura il picco di radiazione emessa si sposta verso le lunghezze d'onda minori, inoltre l'area sottesa dalla curva (cioè l'energia totale) cresce rapidamente.

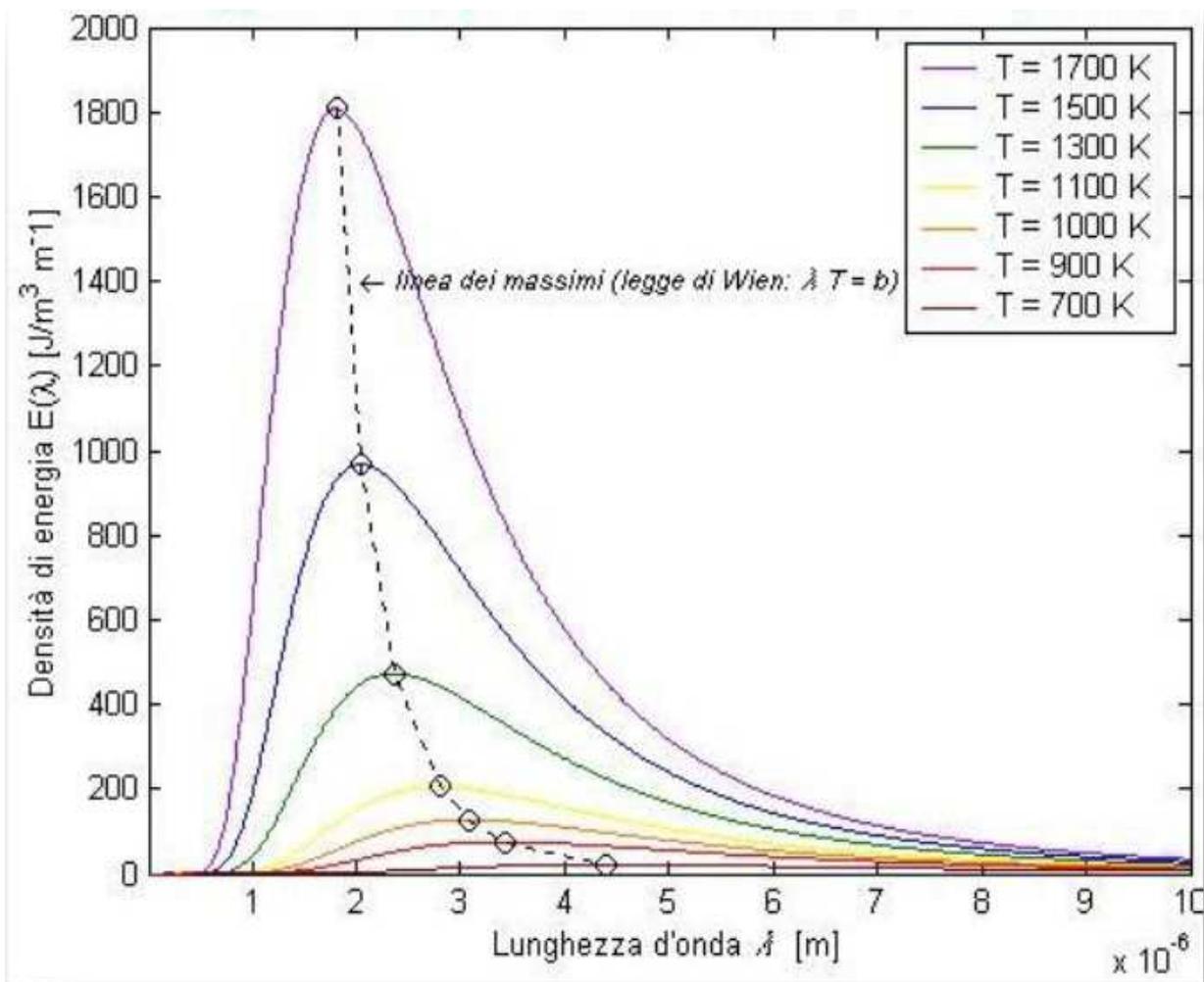


Figura 31: rappresentazione grafica della legge di Planck

Da un'ulteriore analisi della legge di Planck si può notare che per i corpi con basse temperature, lo spettro è situato principalmente nella regione delle onde lunghe, al contrario per i corpi ad alta temperatura, lo spettro è concentrato nella regione delle onde corte. Si può quindi affermare che uno spettro di emissione può rilevare la temperatura del corpo che ha generato la curva.

Legge di Stefan Boltzmann

Fornisce la quantità totale di potenza emessa dalla superficie, calcolata su tutto lo spettro elettromagnetico, per ogni temperatura. Essa precisa che l'emittanza¹¹ (M) complessiva di una superficie fisica è in funzione della quarta potenza della temperatura assoluta della superficie:

$$M = \epsilon \sigma T^4$$

dove:

M = emittanza totale uscente dalla superficie

σ = costante di Stefan Boltzmann = $5.6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

T = temperatura assoluta (K) della superficie

ϵ = emissività della superficie

La legge esprime l'energia totale emessa da un corpo nero a tutte le lunghezze d'onda (cioè con $\epsilon = 1$). Quindi, dalla legge si evince che più è alta la temperatura del corpo, e maggiore sarà la quantità di calore che esce dalla sua superficie. Ciò, rende coerente la brusca crescita in altezza della curva di radiazione all'aumentare della temperatura, essendo il tutto proporzionale alla quarta potenza.

Legge di Wien

Indica il valore della lunghezza d'onda in corrispondenza dell'emissione elettromagnetica massima a una definita temperatura.

La legge di Planck è una funzione dotata di un valore massimo per ogni temperatura ma prima ancora che fosse definita, nel 1893 Wien enunciò la legge che mette in relazione la lunghezza d'onda corrispondente al massimo di energia, o potenza, emessa da una superficie di corpo nero con il suo valore di temperatura T :

¹¹ L'**emittanza** o **eccitanza** è la potenza emessa per unità di superficie. Si misura in W/m^2 .

$$\lambda_{\max} = w T^{-1} [\mu\text{m}]$$

w: costante specifica per ciascun corpo secondo i suoi caratteri di emissività; per un corpo nero $w = 2890$

T: temperatura assoluta di corpo nero in Kelvin [K]. *T* è la temperatura che avrebbe una superficie di corpo nero se emettesse come la superficie in oggetto

La legge di Wien enuncia che la lunghezza d'onda corrispondente al massimo valore di emissione elettromagnetica λ_{\max} di una superficie di corpo nero decresce al decrescere della temperatura *T*. Essa quindi aiuta ad individuare la lunghezza d'onda in cui vi è il massimo grado di emissione ad una particolare temperatura

6.1.5. Termografia all'infrarosso e funzionamento della termocamera

Come prima cosa occorre definire la termografia ad infrarosso, si prenderà a questo proposito quella derivante dalla norma UNI 10824-1:

“Metodo che permette di ottenere, per mezzo di un'apparecchiatura termografica, la distribuzione spaziale e l'evoluzione temporale della radiazione infrarossa proveniente dalla scena osservata, nell'intervallo di sensibilità della termocamera”.

In altre parole la termografia all'infrarosso è una tecnica che consente di individuare e misurare a distanza, il calore prodotto da un qualsiasi corpo caldo (il quale emette radiazioni nella lunghezza d'onda dell'infrarosso). Lo strumento utilizzato è una telecamera termica (termocamera), la quale è in grado di riprodurre in immagini le differenze termiche fra i vari oggetti e all'interno di uno stesso oggetto. In pratica la termografia ad infrarossi dà la possibilità di conoscere la temperatura presente in tutti i punti di un oggetto senza bisogno di un contatto diretto. Infatti questa tecnica fa parte delle cosiddette prove non distruttive, cioè quelle prove che non causano alterazioni in seguito alla verifica. Un'immagine prodotta da una termocamera è chiamata termogramma, ed è la fotografia delle emissioni elettromagnetiche di un oggetto (fig. 31)

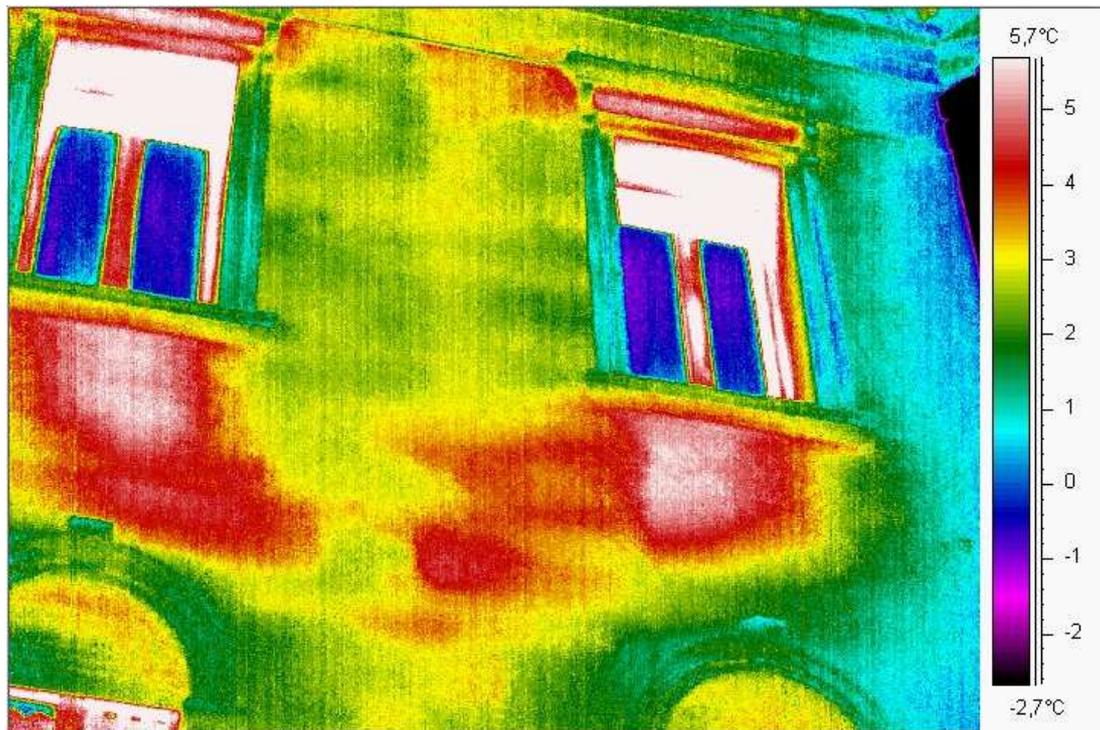


Figura 32: termogramma di una porzione di edificio, con indicazione delle temperature calcolate

La termocamera misura e visualizza le radiazioni infrarosse emesse dagli oggetti. Per il fatto che la radiazione è una funzione della temperatura superficiale degli oggetti, è possibile per la termocamera calcolare e visualizzare questa temperatura.

In considerazione che ogni corpo con temperatura superiore allo zero assoluto ($0,0 \text{ K}$ o $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$) emette radiazioni elettromagnetiche, l'energia emessa dalla superficie può essere catturata dal sensore all'infrarosso e convertita in segnale elettrico. A partire dalla radiazione rilevata si ottengono delle mappe di temperatura delle superfici esposte. Le termocamere consentono di misurare il valore di temperatura assoluto di ogni punto dell'immagine. Essa infatti è costruita su una matrice di un certo numero di pixel per un certo numero di righe. L'elettronica dello strumento legge velocemente il valore di energia immagazzinata da ogni singolo pixel e genera un'immagine in bianco e nero o in falsi colori dell'oggetto osservato. Si conviene associare ad ogni temperatura rilevata un colore scelto da una scala corrispondente alle varie temperature.

Il tipo di sensore usato influenza direttamente tutte le caratteristiche della termocamera. Per applicazioni comuni è attualmente utilizzato un sensore di tipo microbolometrico a matrice piana. Esistono sensori a maggiori prestazioni a matrice singola (scansione meccanica) o a matrice di punti. I sensori possono essere sia non raffreddati sia raffreddati (in genere con celle peltier o pompe stirling). I sensori raffreddati sono utilizzati per

applicazioni di ricerca e sviluppo e hanno sensibilità termica superiore rispetto ai microbolometri non raffreddati. Il materiale costituente il sensore influenza la sensibilità termica della termocamera. I sensori più comuni sono o in silicio amorfo o in ossido di vanadio, quest'ultimo ha una migliore qualità rispetto al silicio amorfo (che ha anche un tempo di vita medio più basso).

La risoluzione geometrica, nella scelta di una termocamera, risulta essere una delle principali caratteristiche, in quanto influisce enormemente sulla qualità dell'immagine. Occorre perciò tener presente alcuni fattori, quali il campo visivo (FOV Field of View) e i dispositivi ottici. Infatti per determinare la distanza di misura appropriata e l'oggetto di misura massimo visibile o misurabile occorre considerare le tre variabili

- il campo visivo (FOV);
- il più piccolo oggetto identificabile (IFOV_{geo});
- il più piccolo oggetto/area di misura misurabile (IFOV_{meas}).

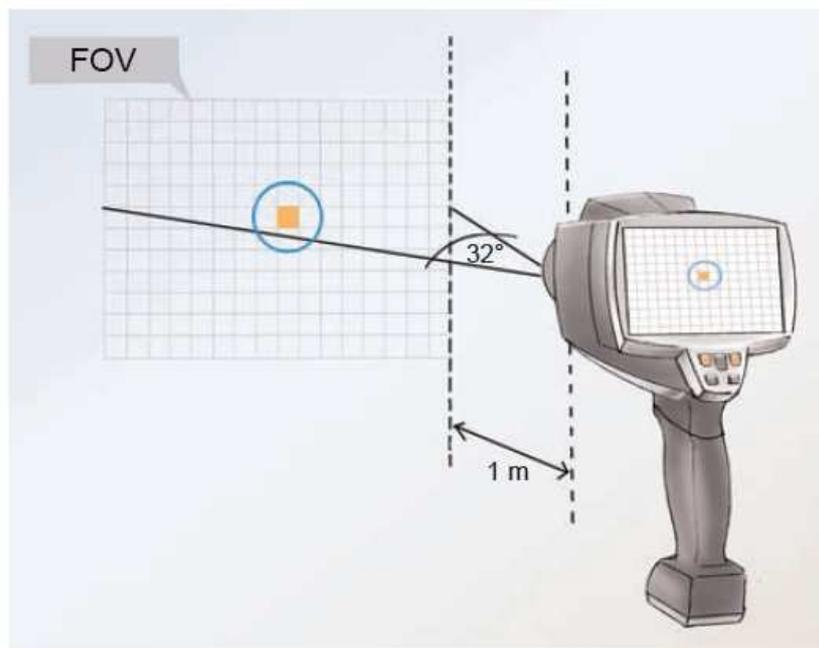


Figura 33: campo visivo della termocamera

Il campo visivo (FOV) della termocamera descrive l'area visibile con la termocamera, questa è in funzione della lente usata (in figura lente grandangolare a 32°, le lenti a grandangolo risultano indispensabili per ottenere campi visivi estesi).

Bisogna inoltre conoscere la specifica per il più piccolo oggetto identificabile (IFOV_{geo}) della termocamera. Questo valore definisce le dimensioni di un pixel in base alla distanza. Portando un esempio, con una risoluzione spaziale della lente di 3,5 mrad e una distanza

di misura di 1 m, il più piccolo oggetto identificabile (IFOV_{geo}) ha una lunghezza del lato di 3,5 mm e viene mostrato sul display come un pixel (fig. 25). Per ottenere una misura precisa, l'oggetto di misura deve essere da 2 a 3 volte più grande del più piccolo oggetto identificabile (IFOV_{geo}). La seguente regola pratica si applica pertanto al più piccolo oggetto misurabile (IFOV_{meas}):

$$IFOV_{meas} \approx 3 \times IFOV_{geo}$$

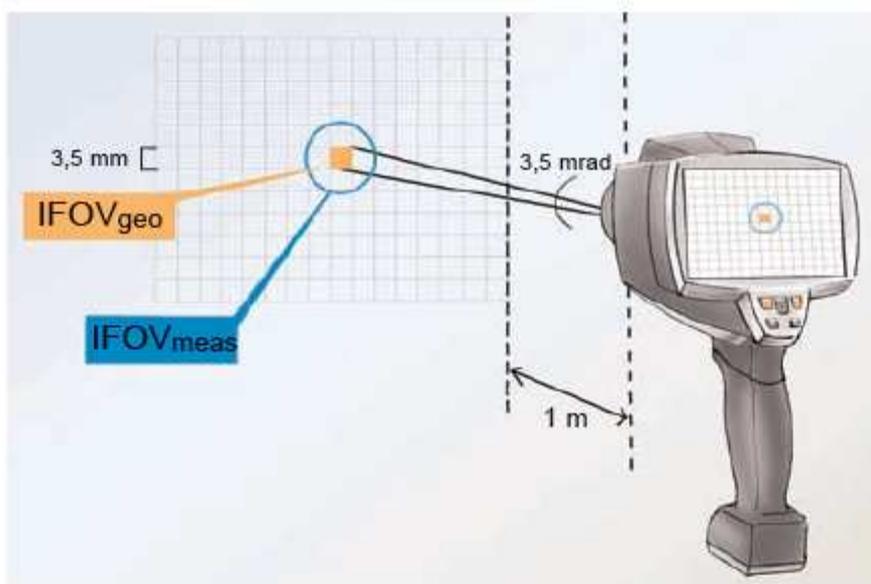


Figura 34: campo visivo di un singolo pixel

6.1.6. Descrizione dello strumento impiegato

La termocamera impiegata nella campagna di rilevamento è stata la termocamera FLIR P640. La quale risulta essere tra le termocamere a infrarossi più performanti del suo genere, con risoluzione di 640 x 480 pixel. La termocamera produce immagini radiometriche JPEG che possono essere elaborate tramite software FLIR, consente di sovrapporre le immagini infrarossi a quelle nel visibile e fonderle, per una migliore analisi.



Di seguito vengono riportate le caratteristiche tecniche dello strumento:

Caratteristiche Immagine	
Risoluzione IR	640x480 pixels
Focal Plane array (FPA)	Microbolometrico non raffreddato da 640x480 pixel, di ultima generazione, pitch 17 µm
Campo spettrale	7,8 - 14 µm
Campo visivo (FOV, Field of view)/distanza minima di messa a fuoco	45° x 34° / 0.15 m
Risoluzione spaziale (IFOV)	1.23 mrad
Frequenza di immagine	30 Hz
Messa a fuoco	Automatica o manuale
Presentazione dell'immagine	
Display	Display LCD touch screen ad elevata luminosità da 4,3" da 800x480 pixel
Modalità immagine	Immagine IR con scala colore selezionabile, immagine nel visibile a colori, Picture-in-Picture (Area IR ridimensionabile e spostabile), Thermal Fusion (sopra/sotto/intervallo), galleria immagini
Regolazioni manuali dell'immagine	Livello/campo/max./min.
Regolazioni automatiche dell'immagine, attivazione continua o manuale	Standard o basato su istogramma dal contenuto dell'immagine
Regolazioni automatiche dell'immagine con blocco scala	Blocco di minimo, massimo o campo

Caratteristiche generali

Misurazione	
Accuratezza	±2°C o 2% della lettura
Intervallo di temperatura	De -40 °C a +150 °C, de +100 °C a +650 °C
Intervallo di temperatura, opzionale	De +300 °C a +2.000 °C
Analisi della misurazione	
Puntatore	10
Area	5 valori Max/Min/Medio all'interno delle aree rettangolari o circolari
Rilevamento automatico caldo/freddo	Temp. Max/Min e la loro posizione all'interno delle aree rettangolari, circolari o su una linea
Isoterma	Isoterma sopra/sotto/intervallo
Differenza di temperatura	Differenza tra qualsiasi coppia di funzioni di misurazione o qualsiasi funzione di misurazione e una temperatura di riferimento.
Temperatura di riferimento	impostata manualmente
Correzione dell'emissività	Variabile tra 0,01 e 1,0 o selezionata dall'elenco dei materiali
Correzioni di misura	Temperatura ambiente riflessa, ottiche & temperatura atmosferica
Correzione ottiche/finestre esterne	Automatica, basata sui valori di trasmittanza e temperatura delle ottiche/finestre IR
Impostazioni	
Controlli immagine	Tavolozze (Artico, Grigio, Ferro, Lava, Arcobaleno e Arcobaleno HC), regolazione immagine (automatica/manuale)
Comandi di setup	Adattamento geografico di unità, lingua, formati data e ora; spegnimento automatico, intensità display
Configurazione delle informazioni da mostrare nell'immagine	✓
Pulsanti programmabili	✓
Memorizzazione delle immagini	
Modalità	Immagini IR/visive, memorizzazione contemporanea di immagini IR e visive
Formato	JPEG standard - inclusi dati di misurazione
Salvataggio immagine periodica	Ogni 2 secondi fino a 24 ore
Fotocamera digitale	
Fotocamera digitale integrata	5 Megapixel con due illuminatori a LED
Laser LocatIR	
Laser	Laser a diodo AlGaInP a semiconduttore, Classe 2
Allineamento laser	La posizione viene visualizzata automaticamente sull'immagine IR

6.1.7. Termografia e valutazione delle dispersioni energetiche degli edifici

Negli ultimi anni le indagini termografiche hanno trovato sempre maggiore impiego nella diagnostica e negli interventi sull'edilizia storica e moderna. La capacità di identificare la causa dei difetti imputabili a una costruzione scadente o a un'anomalia causata da un'errata messa in opera o da una pessima conduzione dei lavori, può assumere un ruolo importante nell'incremento dell'efficienza energetica ed economica dell'edificio. Nel campo della diagnosi energetica, la termografia è utile per determinare la presenza di criticità termiche e igrometriche presenti su un manufatto edilizio. La termocamera a infrarossi identifica i modelli di dispersione termica che appaiono invisibili a occhio nudo, localizzando i problemi energetici in modo preciso. Permette, infatti, di identificare le aree soggette a sprechi energetici, a dispersioni termiche, a difetti di isolamento, a problemi legati ai sistemi impiantistici inefficienti, a infiltrazioni d'aria e di acqua nella struttura edilizia.

Le componenti di un edificio che risultano di particolare importanza nell'analisi termografica atta all'individuazione delle dispersioni energetiche risultano:

- Involucro opaco: La resistenza termica dell'involucro opaco dipende dalle caratteristiche fisiche degli strati interni. Pertanto, a composizioni murarie differenti corrispondono dispersioni termiche differenti. Attraverso l'immagine termografica è possibile individuare la sussistenza di tipologie d'involucro diverse, ad esempio nelle strutture verticali, nei pannelli sottofinestra, nei cassonetti e negli elementi decorativi. Analogamente, è possibile individuare la stratigrafia muraria e, in particolare, la presenza o meno dell'isolamento termico, nello strato interno o esterno. Nelle pareti portanti in mattoni pieni, infatti, l'assenza di isolamento termico è facilmente identificabile poiché si riconosce l'andamento della tessitura muraria. La mancanza di isolamento è enfatizzata dalla presenza di un radiatore. La ripresa IR fatta dall'esterno dell'edificio evidenzia una notevole dispersione di calore nell'area del sottofinestra, dove vi è la dissipazione di buona parte di calore prodotto dal terminale scaldante. La ripresa IR fatta dall'interno, invece, mostra il passaggio delle tubazioni e delle condotte termiche. Negli interventi di retrofit energetico, la conoscenza della struttura e della tessitura muraria prima di intervenire in maniera invasiva permette di realizzare un intervento mirato per risolvere il problema termico.

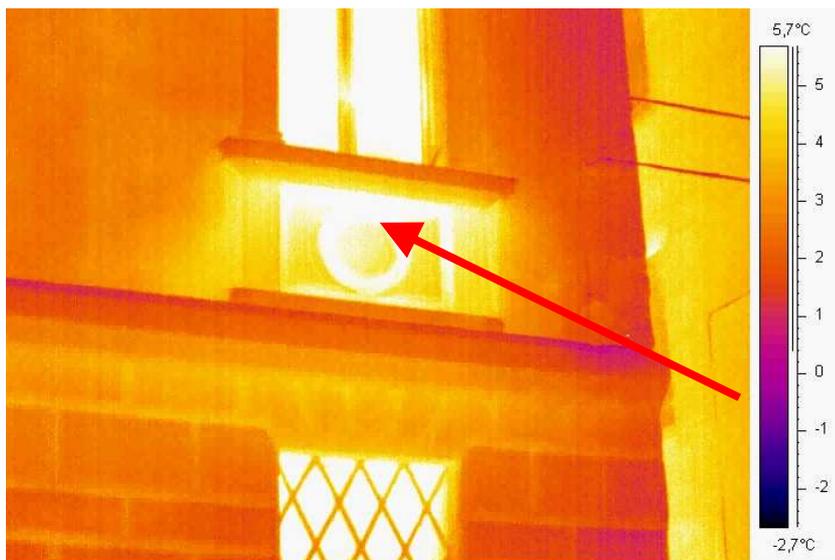


Figura 35: nella seguente immagine si può notare oltre alle parti vetrate, un'altissima dispersione termica della parete esterna in prossimità presumibilmente della presenza di un corpo radiante

- Isolamento termico: Negli edifici di nuova costruzione, la termografia permette di verificare la correttezza degli standard costruttivi e la conformità dell'edificazione rispetto le specifiche tecniche definite in fase progettuale. In alcune termocamere vi è la funzionalità "Indice Termico" che, secondo un particolare algoritmo, calcola automaticamente le aree di parete perimetrale che si trovano sotto le corrette prestazioni d'isolamento. Attraverso le immagini IR è possibile verificare la corretta posa dell'isolante o, viceversa, la presenza di discontinuità termiche anche con un buon livello di coibentazione. In particolare, si può indagare la corretta posa dell'isolamento a cappotto esterno, la scarsa perizia nella posa, la presenza di materiale isolante degradato, alterato o compresso.
- Involucro trasparente: Nelle finestre è possibile verificare la presenza di prestazioni molto diverse tra strutture, quali telaio, vetro e distanziatore. Su una facciata, inoltre, la termografia permette di controllare l'uniformità prestazionale delle diverse finestre e la corretta posa dei vetri. Questo tipo di controllo è particolarmente utile per verificare la corretta posa in opera dei vetri basso-emissivi, che potrebbero essere montati girando il deposito metallico verso la posizione più esterna. In questo modo, infatti, si inficiano le prestazioni energetiche del vetro.

Figura 36: termogramma della sede della Fondazione per l'Università e l'Alta Cultura in Provincia di Belluno sede di Feltre. Nell'immagine si può notare come la porzione di area vetrata sopra la porta d'ingresso abbia dispersioni decisamente maggiori rispetto al contorno murario e alla porta.

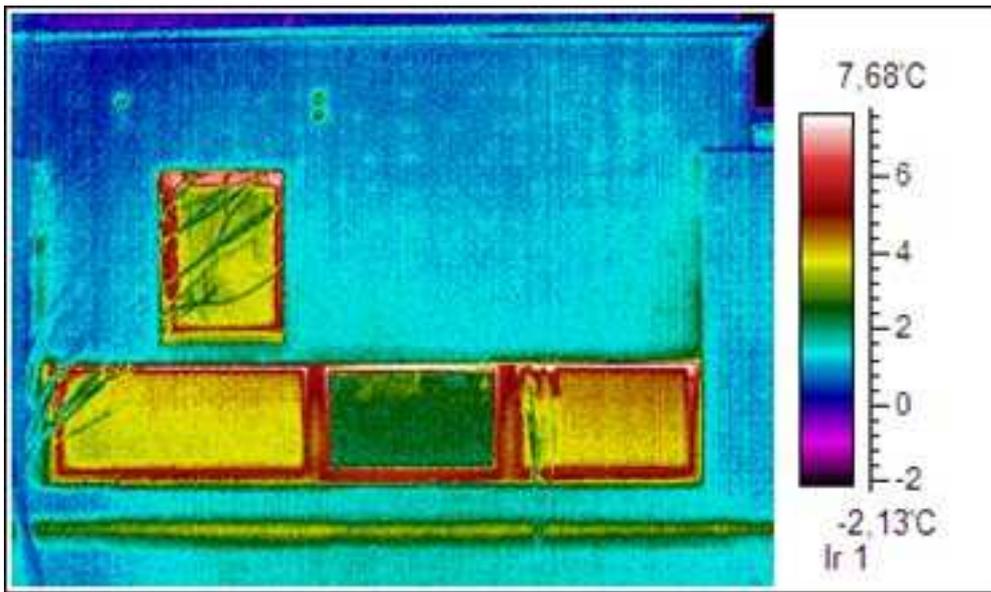
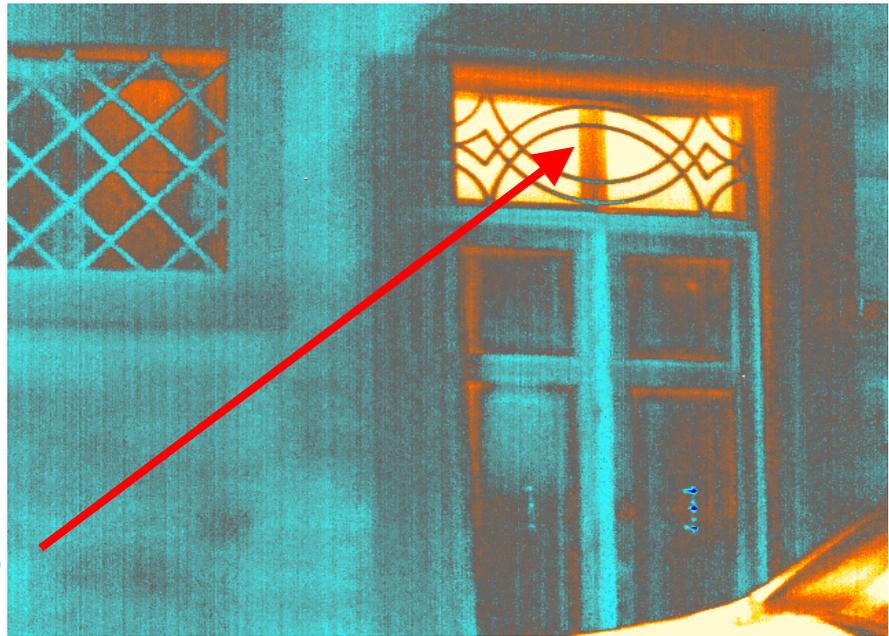


Figura 37: differenza tra superfici vetrate isolate e non, quella centrale risulta aver impiegato un tecnica di isolamento dell'involucro trasparente

- Ponti termici. Negli edifici esistenti, l'analisi termografica è uno strumento molto utile per individuare il tipo di struttura portante e di involucro opaco. In modo molto semplice e rapido, infatti, è possibile riconoscere la presenza di ponti termici di forma o di struttura, ovvero di zone localizzare caratterizzate da una resistenza termica inferiore rispetto alle zone limitrofe. Esempi di ponti termici di forma si hanno quando il sistema strutturale e l'involucro sono realizzati con lo stesso materiale (ad esempio il cemento armato o il mattone pieno) nelle zone d'angolo o nell'intersezione tra trave e parete verticale. I ponti termici di struttura sono elementi di discontinuità strutturale e materica che aumentano le

dispersioni termiche ed energetiche dell'involucro edilizio. Esempi di ponti termici che si possono vedere all'esterno dell'edificio si hanno tra la maglia strutturale in cemento armato e i tamponamenti in laterizio, negli angoli dell'edificio e nelle giunzioni tra la parete verticale e le solette superiori e inferiori. Anche all'interno è possibile riconoscere la presenza di ponti termici nelle pareti angolari, nella giunzione tra soletta e parete verticale e nella zona di ancoraggio tra infisso e parete.



Figura 38: esempio di ponti termici causati da colonne e travi in cemento armato

- Infiltrazioni d'aria: infiltrazione d'aria individua uno spostamento d'aria incontrollabile attraverso i muri, le porte, le finestre e i pavimenti. L'infiltrazione dipende dalle condizioni di pressione interna ed esterna del locale. La termocamera consente di individuare il trasferimento termico provocato dall'aria sulla superficie che lambisce. Uno strumento particolarmente utile in questa analisi è il "Blower Door", ovvero un grosso ventilatore che viene installato su una porta del locale. Chiudendo tutte le altre porte e le finestre, il ventilatore crea una differenza di pressione fra l'interno e l'esterno dell'edificio e fa passare più velocemente l'aria per i punti dove usualmente si hanno infiltrazioni. In questo modo, impone una differenza costante di pressione tra interno ed esterno, aumentando il flusso d'aria naturale. La termocamera permette di identificare i punti dove ci sono passaggi facilitati di correnti d'aria, che contribuiscono a incrementare il consumo energetico complessivo.

Altre problematiche rilevabili negli edifici tramite termografia risultano essere:

- Problemi di umidità;
- Anomalie negli impianti elettrici
- Verificare l'efficienza e il funzionamento dei sistemi di distribuzione e di emissione. Nel primo caso, consente di analizzare il corretto funzionamento e l'isolamento delle tubazioni. Nel secondo, invece, è possibile verificare l'efficienza e l'uniformità di distribuzione del calore nel terminale scaldante

6.2. SISTEMI A SCANSIONE LASER

Fra le discipline del rilevamento, un particolare significato viene conferito alla tecnica della scansione laser, o laser scanning, grazie alla completezza delle informazioni prodotte, alle precisioni conseguibili e ai livelli di automazione e produttività che la caratterizzano.

A partire da una sorgente laser fissa, o in movimento, terrestre o aerea, attraverso il rilevamento polare di un numero elevatissimo di punti circostanti la sorgente e della risposta radiometrica di ciascuno di essi, è possibile ricostruire, quasi al continuo, l'immagine tridimensionale dell'oggetto o della superficie d'interesse.

La tecnica del laser scanning si basa sul metodo di misurazione delle distanze per mezzo di onde elettromagnetiche, anche noto con il nome LIDAR (light detection and ranging). Questa tecnica di misura nasce nel 1933 grazie al sovietico Balaicov che brevettò il primo distanziometro ad onde ed il connazionale Lebedev che ne costruì il primo prototipo nel 1938. A partire dagli anni '70 furono messi in commercio, a prezzi accessibili anche alla piccola utenza, i primi distanziometri ad onde. Questa introduzione ha decretato la fine del rilievo delle distanze con metodi tradizionali a vantaggio di un metodo di misura avente precisione maggiore ed una più rapida esecuzione delle misure stesse. La possibilità di misurare distanze con estrema facilità ha portato come logica conseguenza ad una rivoluzione dei metodi di rilevamento e di calcolo consentendo agli operatori di svincolarsi dai vecchi schemi di rilievo a favore di nuovi sistemi.

6.2.1. Principi del raggio laser e dei sistemi a scansione laser

Il LIDAR come precedentemente detto è una tecnica di telerilevamento che permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie utilizzando un impulso laser.

Il laser è un dispositivo in grado di emettere un fascio di luce coerente, monocromatica e, con alcune eccezioni, ad una ben precisa lunghezza d'onda, concentrata in un raggio rettilineo estremamente collimato attraverso il processo di emissione stimolata. Il fascio

luminoso, viene collimato attraverso un opportuno sistema di lenti e specchi, in un intervallo dello spettro elettromagnetico caratteristico delle frequenze ottiche (0,3 – 15 μm) Come per il radar, che al posto della luce utilizza onde radio (0,1 – 100 cm), la distanza dell'oggetto è determinata misurando il tempo trascorso fra l'emissione dell'impulso e la ricezione del segnale retro diffuso.

Quindi il laser non è altro che una radiazione elettromagnetica, ovvero un'onda luminosa, avente tre principali proprietà:

- *coerenza*: l'onda non viene irradiata in tutte le direzioni, ma si propaga a grande distanza con estrema direzionalità
- *monocromaticità*: composta da una sola frequenza di luce
- *alta brillantezza*: data dalla concentrazione di una grande potenza in un'area molto piccola

Gli strumenti laser scanner oggi sul mercato utilizzano in genere distanziometri laser che misurano il tempo di volo del segnale, ovvero distanziometri ad impulsi.

I distanziometri ad onde possono essere classificati in due grandi categorie:

- Strumenti che prevedono la misura di tempi trascorsi tra due impulsi o tra due treni d'onda (distanziometri ad impulsi)
- Strumenti che prevedono la misura dello sfasamento tra l'onda emessa e quella ricevuta (distanziometri a misura di fase).

Verrà ora descritto il funzionamento dei distanziometri laser, che risultano essere come precedentemente detto quelli maggiormente impiegati per i sistemi laser scanner

Distanziometri ad impulsi

Il principio su cui si basa questo metodo di misura della distanza è concettualmente semplice. Si tratta di misurare il tempo Δt impiegato da un impulso luminoso per andare dal distanziometro al riflettore e viceversa. Nota la velocità di propagazione dell'impulso è possibile calcolare la distanza percorsa:

$$2 D = v \Delta t$$



Figura 39: schema di funzionamento di un sistema ad impulsi

Per le applicazioni in ambito geodetico e topografico risultano fondamentali delle precisioni centimetriche così come previsto dalle specifiche tecniche per la costruzione di modelli digitali del terreno, così come previsto dal gruppo di lavoro sui DTM, intesa GIS. Per ottenere tali risultati, è fondamentale conoscere con precisione sia la velocità v che può essere correttamente approssimata a $2.9979 \cdot 10^8$ m/s, che l'intervallo di tempo Δt .

Nei distanziometri esiste un oscillatore molto stabile di precisione $p = 3 \cdot 10^{-8}$ s a frequenza $f \approx 14.985$ MHz pari a $\lambda = 20$ m.

Il diodo viene attraversato per un tempo ristrettissimo, 12 ns, da una forte corrente di 20÷30 A ed emette un fascio di luce laser. La corrente è costante e stabilizzata in questo brevissimo intervallo. Dopo un intervallo di tempo Δt arriva al ricevitore il segnale di ritorno. Questo intervallo di tempo permette il calcolo di un valore approssimato della distanza con s.q.m pari a:

$$\sigma_D = p \cdot c = \pm 3 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx \pm 9 \text{ m}$$

Per distanze superiori l'orologio di riferimento determina in modo esatto solo il numero di lunghezze d'onda contenute nell'intervallo di tempo Δt tra il segnale emesso e quello ricevuto.

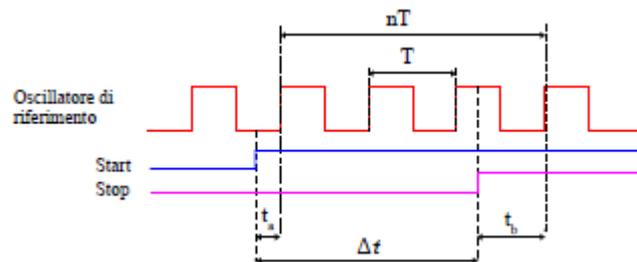


Figura 40: misure del tempo trascorso

Chiamando con T il periodo della frequenza fondamentale f (il periodo T sarà pari a $1/f$), l'intervallo Δt tra lo Start (partenza del segnale) e lo Stop (arrivo del segnale) sarà:

$$\Delta t = nT + t_a - t_b$$

Per distanze minori di 10 m il valore è uguale a zero. Il valore di n è noto in quanto la distanza approssimata è nota con precisione migliore del decametro. Una precisione dell'ordine del decametro non è però sufficiente nel campo del rilevamento di una distanza in topografia o nelle applicazioni affini. E' necessario quindi procedere ad un affinamento

della misura del tempo entro un periodo di oscillazione (T). Il tempo impiegato dall'impulso è pari al numero di periodi interi trascorsi (nT) e dai tempi residui compresi tra lo Start (t_a) e lo stop (t_b) e la prima oscillazione di riferimento immediatamente successiva. Ciò è dovuto al fatto che l'oscillatore di riferimento viene attivato all'accensione dello strumento e non al comando di start dell'impulso, con il quale, quindi, non risulta in genere sincronizzato. Per misurare con precisione t_a e t_b si usa un convertitore tempo tensione: esso è costituito da un condensatore che viene caricato, per i tempi in oggetto, da una corrente costante. Essendo nota la tensione raggiunta per un tempo di carica corrispondente ad un periodo di oscillazione (T), è facile, con una semplice proporzione, ricavare i tempi residui richiesti in funzione della tensione in essi raggiunte dal condensatore.

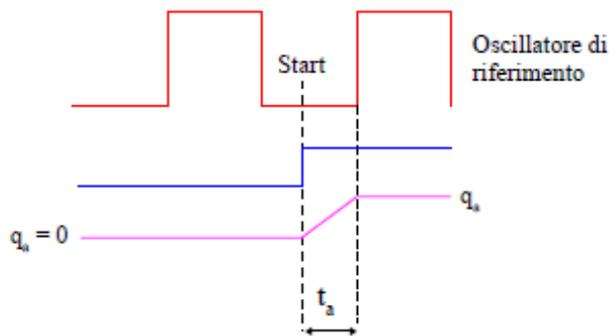


Figura 41: misura del tempo t_a

Indicando con q la tensione raggiunta dal condensatore nel tempo t e con Q la tensione raggiunta nel periodo T si avrà:

$$tq = TQ$$

Con t si indicano successivamente t_a e poi t_b . Dopo ogni misura di tensione ed entro un intervallo che al massimo deve durare un ciclo, il condensatore viene scaricato. Questo condensatore viene cioè aperto dal segnale di start e chiuso dalla prima rampa del segnale dell'oscillatore. Per la misura di t_b , essendo il segnale ricevuto molto debole, si preferisce fare la misura dopo aver modulato questo segnale con la frequenza data dallo stesso circuito di oscillazione. Un "circuito rivelatore di zero" misura t_b come primo zero della sinusoide smorzata che si ottiene come risultato di detta operazione. Per poter effettuare misure di tempo così precise, non si può prescindere dai ritardi di fase dell'orologio interno dovuti ai ritardi parassiti dell'elettronica dei circuiti interni o di altri sistemati qui non più trascurabili. Per questo motivo, oltre alla "esterna" del tempo,

cioè del segnale di ritorno, avviene anche una misura interna di calibrazione, catturando prima dell'uscita, una parte del segnale emesso e misurandone il tempo di percorrenza nei circuiti, cioè a distanza nulla. Questi tempi assumono valori rilevanti in relazione ai tempi normalmente in gioco (ad es. si possono avere ritardi di 100 μ s cui corrisponderebbe una distanza misurata di circa 15 km). Poiché entrambi i segnali percorrono lo stesso circuito interno, sottraendo al tempo misurato quello di calibrazione, è possibile ricavare il tempo del solo percorso esterno.

Comportamento del laser a contatto con i materiali

Quando una radiazione colpisce la superficie di un corpo reale (corpo grigio), essa è in parte assorbita in parte riflessa ed in parte trasmessa.

Si possono definire i seguenti coefficienti adimensionali (variabili tra 0 ed 1), che misurano le interazioni tra energia e materia:

1. Assorbività (α): il rapporto E_a / E_i tra l'energia assorbita da una superficie e quella incidente;
2. Riflettività (ρ): il rapporto E_r / E_i tra l'energia riflessa da una superficie e quella incidente;
3. Trasmissività (τ): il rapporto E_t / E_i tra l'energia trasmessa da una superficie e quella incidente.

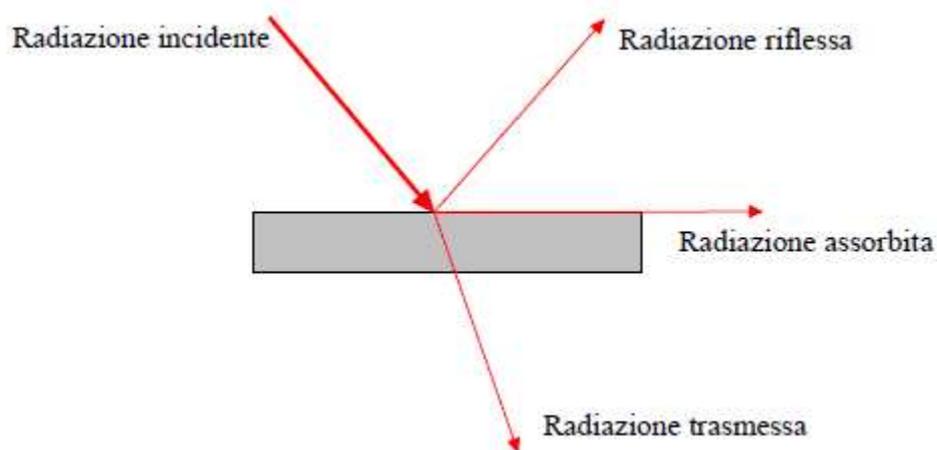


Figura 42: ripartizione dell'energia incidente di una superficie

Da notare che lo stesso materiale ha un comportamento differente rispetto a lunghezze d'onda differenti. I coefficienti indicati sono quindi in funzione della lunghezza d'onda.

Questa dipendenza è funzione delle caratteristiche chimico-fisiche dell'oggetto.

Se un fascio luminoso colpisce una superficie liscia di acciaio si forma un raggio riflesso ben definito, mentre se arriva su di un foglio di carta la luce viene riflessa più o meno in tutte le direzioni (riflessione diffusa). La differenza tra riflessione diffusa e speculare trova la sua ragione nel concetto di ruvidità delle superfici. Il comportamento geometrico della componente riflessa del raggio incidente è governato dal cosiddetto criterio di Rayleigh, per cui una superficie è considerata rugosa se:

$$\Delta h \geq \frac{\lambda}{8 \cdot \cos \Theta}$$

dove:

Δh : dimensione verticale media delle asperità superficiali della superficie [m];

λ : lunghezza d'onda della radiazione incidente [m];

Θ : angolo di incidenza dell'onda emessa rispetto alla verticale [rad].

Da notare il fatto che il concetto di rugosità di una superficie è funzione della lunghezza d'onda incidente la superficie stessa. In generale le superfici perfettamente lisce riflettono in modo speculare, quelle perfettamente rugose si comportano come riflettori lambertiani, dove la direzione di riflessione è indipendente da quella di incidenza. Normalmente le superfici reali non si comportano né da superficie perfettamente speculare né da superficie perfettamente lambertiana ma si comportano in modo intermedio.

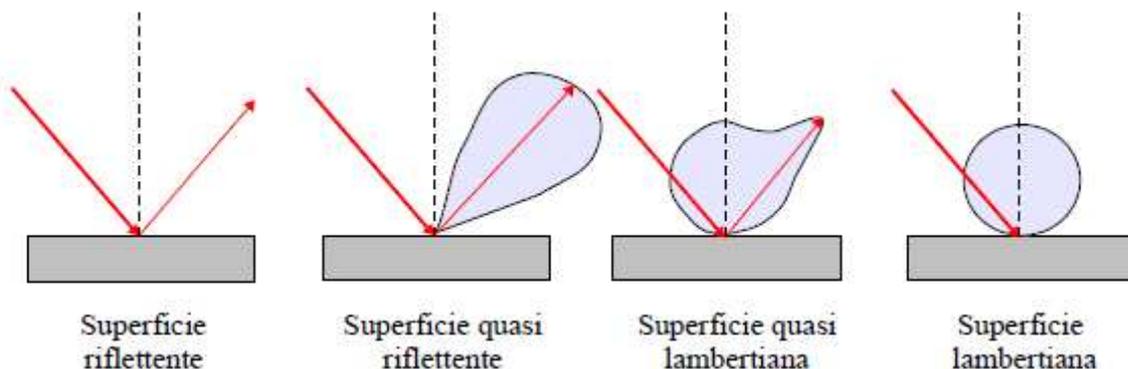


Figura 43: comportamento riflettivo di una superficie in base alla sua rugosità

Esiste poi una particolare superficie che non si comporta né da superficie speculare né da superficie lambertiana. Si tratta delle superfici così dette retroriflettenti. Per queste particolari superfici il raggio riflesso si propaga esattamente lungo la stessa direzione del

raggio incidente. Questa proprietà è valida inoltre per un elevato numero di direzioni di incidenza.

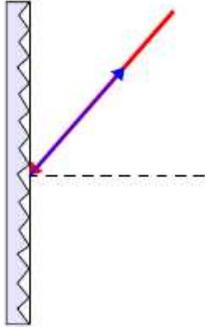


Figura 44: comportamento riflettivo delle superfici retro-riflettenti

Come precedentemente detto il laser risulta essere una radiazione luminosa concentrata, monocromatica formata da onde parallele in fase tra loro.

Nella realtà dei fatti però la condizione di direzionalità è difficilmente raggiungibile. I fasci che compongono un'emissione laser infatti sono “praticamente” paralleli, ovvero sono affetti da una leggera divergenza che, entro distanze ridotte, è assolutamente irrisoria e quindi praticamente inesistente. Il fenomeno della divergenza del raggio laser è legato alle dimensioni limitate della cavità nella quale si produce il raggio laser così come al fenomeno di diffrazione imposto dalla finestra d'uscita del fascio.

In assenza del fenomeno di divergenza, un raggio laser incidente una qualsiasi superficie, avrebbe un'area di impatto puntiforme. La divergenza del raggio fa in modo tale che la zona reale di impatto sia invece un'area (in genere abbastanza piccola).

Nel rilevamento laser scanner la determinazione della posizione dei punti acquisiti è come noto effettuata utilizzando un raggio laser. Se il punto colpito dal raggio non è puntiforme ma areale la misura di posizione effettuata è funzione dell'area di impatto. Questo fenomeno si traduce in un lieve disturbo nella determinazione della posizione del punto acquisito ed è funzione della grandezza dell'area di impatto del laser e della geometria della superficie colpita. In generale è possibile affermare che meno elevato è il valore di divergenza del raggio più risulta precisa la misura della posizione del punto considerato.

6.2.2. Rilievi Laser scanner terrestre

I distanziometri laser oggi presenti sul mercato del rilevamento sono sempre più precisi ed affidabili e possono misurare la posizione di punti ad elevata velocità. L'unione di un distanziometro con queste caratteristiche ad un insieme di apparati meccanici di alta

precisione ha reso possibile la realizzazione dei sensori laser scanner. La meccanica dello strumento permette di materializzare una direzione di acquisizione mentre il distanziometro laser acquisisce una distanza lungo la direzione stessa. Il risultato dell'acquisizione è un insieme di punti sparsi nello spazio in modo più o meno regolare che comunemente viene chiamata “nuvola di punti” .

I laser scanner oggi presenti sul mercato sono molti ed ognuno di essi presenta caratteristiche differenti nel principio di acquisizione, nella precisione ottenibile, nella portata e nella velocità di acquisizione. Nonostante le molteplici differenze tra di essi è possibile classificare i sensori laser in alcuni gruppi principali.

La prima classificazione che è possibile effettuare è quella che distingue gli strumenti a seconda del principio di acquisizione che utilizzano:

- *Laser scanner distanziometrici*
- *Laser scanner triangolatori.*

Laser scanner distanziometrici

I laser scanner distanziometrici possono facilmente essere paragonati alle stazioni totali topografiche. La misura della posizione tridimensionale del punto avviene infatti in coordinate sferiche. Per ogni punto acquisito sono misurati un angolo orizzontale (azimutale), un angolo verticale (zenitale) ed una distanza inclinata. Per questo motivo spesso i sistemi a scansione laser terrestri sono considerati quali stazioni totali ad elevata automazione.

Esiste però una sostanziale differenza tra i rilevamenti topografici con stazione totale e le acquisizioni laser scanner. Quando si effettua un rilievo topografico classico sono misurate le coordinate di punti particolari appartenenti all'oggetto, che devono essere ben riconoscibili all'occhio e che definiscono in genere la sagoma dell'oggetto stesso, come ad esempio spigoli, fessure. Nel caso di un rilevamento laser scanner invece non vi è alcuna possibilità di scegliere i punti da rilevare. E' possibile in genere definire solo l'area che si vuole acquisire e la densità di punti desiderata. Definiti questi parametri l'acquisizione è completamente automatica. Il risultato del rilevamento è una nuvola di punti molto densa ma con gli stessi distribuiti in modo casuale sull'oggetto. Non sono quindi in genere rilevati i punti che classicamente sono misurati con le tecniche di topografia classica.

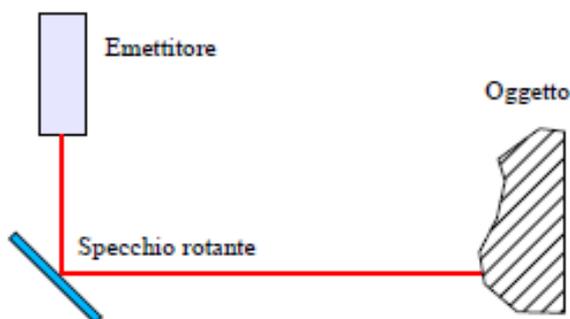


Figura 46: schema di funzionamento dei laser scanner distanziometrici

Figura 46: esempio di laser scanner distanziometrico

I laser scanner distanziometrici in genere sono dotati di distanziometri laser ad impulsi (che misurano quindi un tempo di volo) in quanto permettono di effettuare misure molto velocemente (circa 10000 pti/sec) con precisioni elevate (dell'ordine dei 5 - 10 mm). La portata massima oggi raggiungibile con un sensore laser di classe 1 (quindi non pericoloso per la vista) è di circa 800 m. Se la distanza viene invece misurata per differenza di fase lo strumento è più lento ma più preciso e la portata di acquisizione diminuisce.

Laser scanner triangolatori

I laser scanner triangolatori vengono impiegati per il rilievo di piccoli oggetti. utilizzano il principio dell'intersezione in avanti. L'apparecchio è costituito da un braccio detto base ai cui estremi sono collocati due diodi. La misurazione viene effettuata tramite impulsi che partono dal diodo emettitore e si riflettono sull'oggetto raggiungendo il diodo ricevitore situato dall'altra estremità della base. Lo strumento calcola la posizione dei singoli punti in base all'angolo che si forma tra il raggio emesso, il raggio riflesso e la base. Anche in questo caso l'acquisizione è totalmente automatizzata, rispetto ai laser scanner distanziometrici la velocità è minore ma è più elevata la precisione del rilievo, arrivando a precisioni sub-millimetriche.

Il segmento che unisce i due diodi (base) non può in genere superare alcuni limiti pratici di maneggevolezza (circa 1 m), che di conseguenza produce un limite alla portata dello strumento dell'ordine di qualche metro.

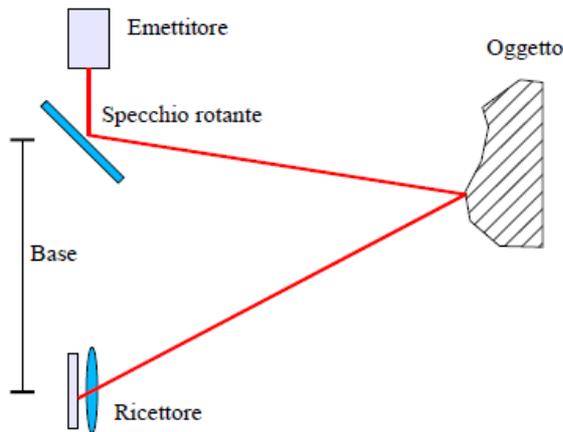


Figura 48: Schema di funzionamento di un laser scanner triangolatore



Figura 48: esempio di laser scanner triangolatore

I laser scanner possono anche essere classificati a seconda di altre caratteristiche che sono:

Posizionamento del sensore laser

Possono essere distinti due tipi di laser differenti: laser statici e laser mobili.

Gli strumenti statici sono quelli generalmente impiegati nelle linee di controllo meccanico, per il monitoraggio di movimenti e deformazioni o per il rilevamento di alta precisione. In genere hanno una posizione fissa nel tempo e acquisiscono sempre una stessa scena.

I laser scanner mobili, o trasportabili, sono quelli più utilizzati nel campo del rilevamento topografico. Si tratta di strumenti di dimensioni ridotte che sono posizionati su treppiedi e permettono di inquadrare la zona desiderata.

Portata del sensore laser

Si possono distinguere strumenti a piccola portata (< 1 m, in genere laser triangolatori con precisioni sub-millimetriche), strumenti a media portata (1 m ÷ 50 m, distanziometrici o triangolatori con precisioni da 0.2 a 6 mm) e strumenti a lunga portata (50 m ÷ 1000 m, distanziometrici con precisioni da 5 mm a 2 cm).

Naturalmente non bisogna dimenticare che la portata di un laser è funzione del tipo di materiale colpito dal raggio ed, in particolar modo, dalla riflettività del materiale (ρ) alla lunghezza d'onda del laser. Maggiore è infatti la riflettività infatti maggiore sarà la portata ottenibile mentre minore è la riflettività (e quindi maggiore la parte di energia assorbita) minore sarà la portata.

Questo avviene semplicemente perché il raggio riflesso dalla superficie si propaga nell'atmosfera che non è altro che un corpo trasparente. Come tale ha la proprietà di

assorbire, trasmettere e riflettere una qualsiasi radiazione elettromagnetica. Nonostante nei limiti di operabilità dei laser l'effetto di attenuazione del segnale laser sia abbastanza ridotto e facilmente dimostrabile da prove empiriche come l'effetto di attenuazione aumenti all'aumentare della distanza che si vuole rilevare.

Se la parte di raggio riflesso da una superficie è particolarmente debole questa si disperde velocemente nell'ambiente per cui la distanza massima rilevabile in questo caso diminuisce.

6.2.3. Rilievi LIDAR da aereo

La tecnologia laser scanner, può avere innumerevoli impieghi nel campo del rilevamento topografico, in particolare sta prendendo sempre più piede, la scansione laser su piattaforme aviotrasportate, come elicottero e aereo.

Il sistema a scansione laser da aereo (Aerial Laser Scanning), risulta essere la convergenza di tre tecnologie.

- Distanziometro laser
- Sistemi di posizionamento satellitari (GPS, GLONASS)
- Sistemi di navigazione inerziale (INS)

La peculiarità del sistema è quella di essere in grado di svolgere anche misurazioni in presenza di alta densità di vegetazione e di caratterizzare la posizione, la forma e l'altezza di diversi oggetti e infrastrutture. Non esiste il problema dell'ombra degli oggetti irradiati, ma è significativa l'interferenza altri oggetti tra il sensore e l'oggetto in questione. Nell'intervallo spettrale tipico dell'infrarosso, la riflessione di molti oggetti, risulta essere elevata, provocando la saturazione del sensore. In alcuni casi, alcuni oggetti possono essere invisibili a causa della loro bassa riflettanza nella regione spettrale del laser ottenendo così una migliore penetrazione.

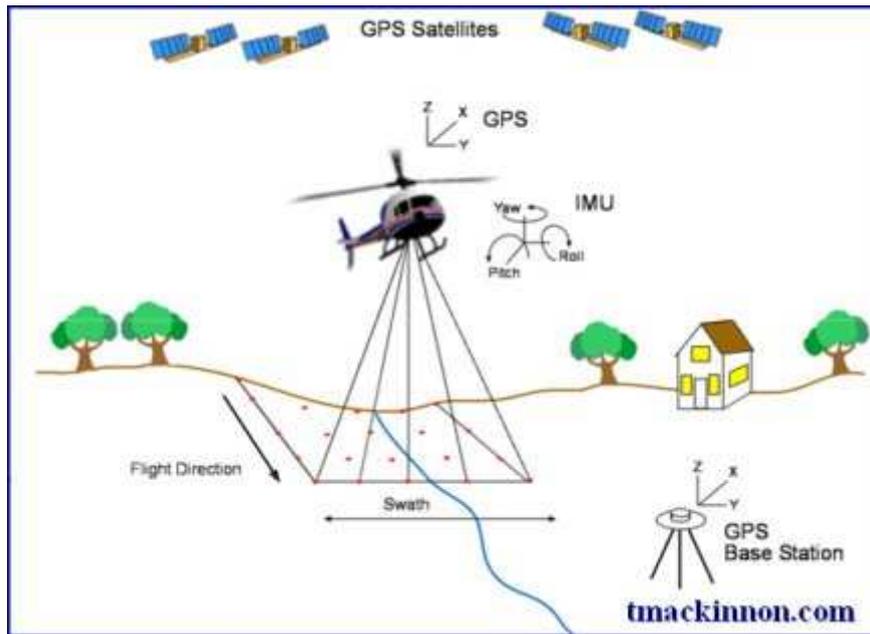


Figura 49: sistema laser scanner avionico

Come tutti i sistemi laser, la metodologia si basa sulla misura della distanza tra un aereo, o un elicottero, e la superficie terrestre, misurando con precisione il tempo impiegato dal segnale laser a raggiungere la terra, essere riflesso e tornare alla piattaforma di emissione. Il segnale laser riflesso viene ricevuto da un piccolo telescopio che raccoglie la luce laser in un rivelatore. Il tempo impiegato dal segnale viene convertito in distanza dal piattaforma considerando la velocità di raggio laser uguale alla velocità della luce nel vuoto ($2.99 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$).

Le distanze misurate vengono convertite in coordinate planimetriche e altimetriche valori per ciascun impulso laser combinando le misure di distanza con l'esatta posizione dello strumento sulla piattaforma di acquisizione. Il punto di emissione del segnale laser lungo tutta la linea di volo viene identificato con precisione dal sistema di posizionamento satellitare (GPS, GLONASS e Galileo) applicando di correzione differenziale in modalità cinematica. Attraverso il sistema di correzione differenziale, ottenuta dall'elaborazione dei dati provenienti dal ricevitore satellitare montato sulla piattaforma aerea e dai dati provenienti dalla stazione fissa (base) di coordinate note, sono ottenibili precisioni dell'ordine di pochi centimetri. Al fine di identificare correttamente le coordinate 3D del segnale laser, occorre conoscere con precisione l'orientamento dell'impulso. La piattaforma aerea è soggetta ad un eventuale non costante velocità di avanzamento, nonché ad errori di rollio, beccheggio e imbardata, con riferimento alle rotazioni sui

rispettivi assi. La direzione dell'impulso laser viene definita con precisione utilizzando un sistema di navigazione inerziale (INS) che registra questi errori e misura l'orientamento della piattaforma. I sistemi inerziali sono in grado di rilevare gli errori più piccoli di $0,01^\circ$. La misura della distanza e la conoscenza dell'angolo di emissione e ricezione del segnale consentono la determinazione delle coordinate spaziali del punto riflettente da localizzare. Combinando le informazioni raccolte sulla distanza, posizione e direzione, ogni segnale laser può essere georeferenziato. L'acquisizione rapida in successione di linee parallele ortogonali alla direzione della piattaforma di volo aerea, continuamente guidato da un sistema di posizionamento preciso, è possibile mappare vaste aree, con sovrapposizione di fasce laterali al fine di attuare una corretta mosaicatura. I dati delle singole fasce acquisite vengono elaborate per produrre mappe in 3D del terreno, come modelli digitali di superficie del terreno (DSM) e modelli digitali di elevazione (DEM), che descrivono la topografia utilizzando una griglia regolare con valori altimetrici. Questo metodo risulta essere una metodologia alternativa ai tradizionali metodi quali curve di livello o immagini stereoscopiche di foto riprese con tecniche di fotogrammetria, stereoscopia satellite e / o metodi interferometrici.

Con i più recenti modelli di sistemi a scansione laser è possibile misurare riflessioni multiple per ciascun impulso, ad esempio è possibile avere per un'area vegetata, una prima riflessione che rappresenta la chioma di un albero, una seconda che individua i rami ed una terza il terreno, lo stesso discorso può essere effettuato nelle aree urbane, potendo discriminare il suolo dalla copertura.

Le applicazioni del laser scanner avionico includono rischio idrogeologico, fluviale e le aree alluvionali, modelli idrogeologici, pianificazione urbana, individuazione di percorsi per oleodotti, ecc L'acquisizione da scanner laser può contenere più di $100.000 \text{ points/km}^2$.

La precisione del sistema LIDAR, è funzione delle tre tecnologie che lo compongono e cioè laser scanner, il sistema di posizionamento ed il sistema inerziale INS.

I sistemi laser da aereo operano nell'intervallo spettrale del vicino infrarosso tra $1,04 \mu\text{m}$ e $1,55 \mu\text{m}$. Gli impulsi sono ravvicinati, con frequenza compresa tra 2 e 80 kHz di media ed alta potenza. La divergenza del raggio è di circa 1mrad. L'ampiezza della strisciata è funzione dell'altezza della piattaforma e dell'angolo di scansione. In genere un tipico campo di vista (FOV) è inferiore a 30° , per cui la larghezza della strisciata è compresa tra 100 e 750 m per altezze di volo comprese tra 200 e 1500 m. L'altezza di volo condiziona l'accuratezza delle riprese, infatti a maggiore altezza gli errori angolari aumentano. Altri

fattori che possono condizionare la qualità delle riprese sono: venti forti, neve, pioggia, nebbia, umidità, nuvole basse.



Figura 50: rappresentazione tramite generazione di superfici triangolari dei punti desunti da volo LIDAR, in rosso l'area campione oggetto di studio

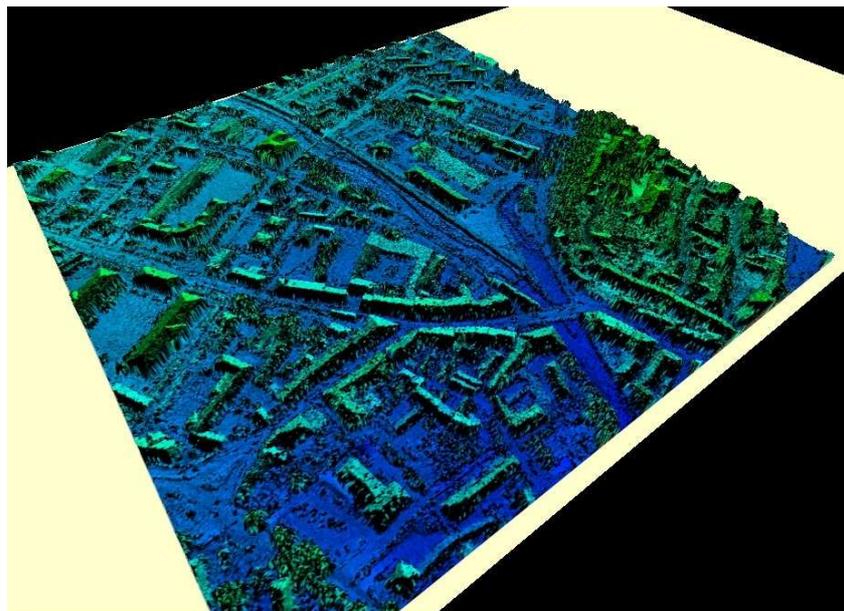


Figura 51: visualizzazione 3D del rilevamento LIDAR tramite generazione di superfici triangolari

7. ELABORAZIONE DATI

7.1. SCHEMA DEL PIANO DI ELABORAZIONI

Il presente lavoro come già detto si pone l'obiettivo di generare strumenti e cartografie per la sensibilizzazione della popolazione alla tematica del consumo energetico, in particolare alle dispersioni energetiche degli edifici. Questi prodotti avranno il compito di supportare altri sistemi di condivisione e pubblicazione, per informare e coinvolgere le comunità, tramite l'implementazione all'interno di Sistemi Informativi Territoriali, o quantomeno su portali web.

Questi strumenti consistono in una mappa tematica delle dispersioni delle facciate degli edifici ed una modellazione 3D urbana con immagini termografiche, che rivestono le pareti degli edifici.

Schematizzando si può dire che il lavoro è composto principalmente da due parti:

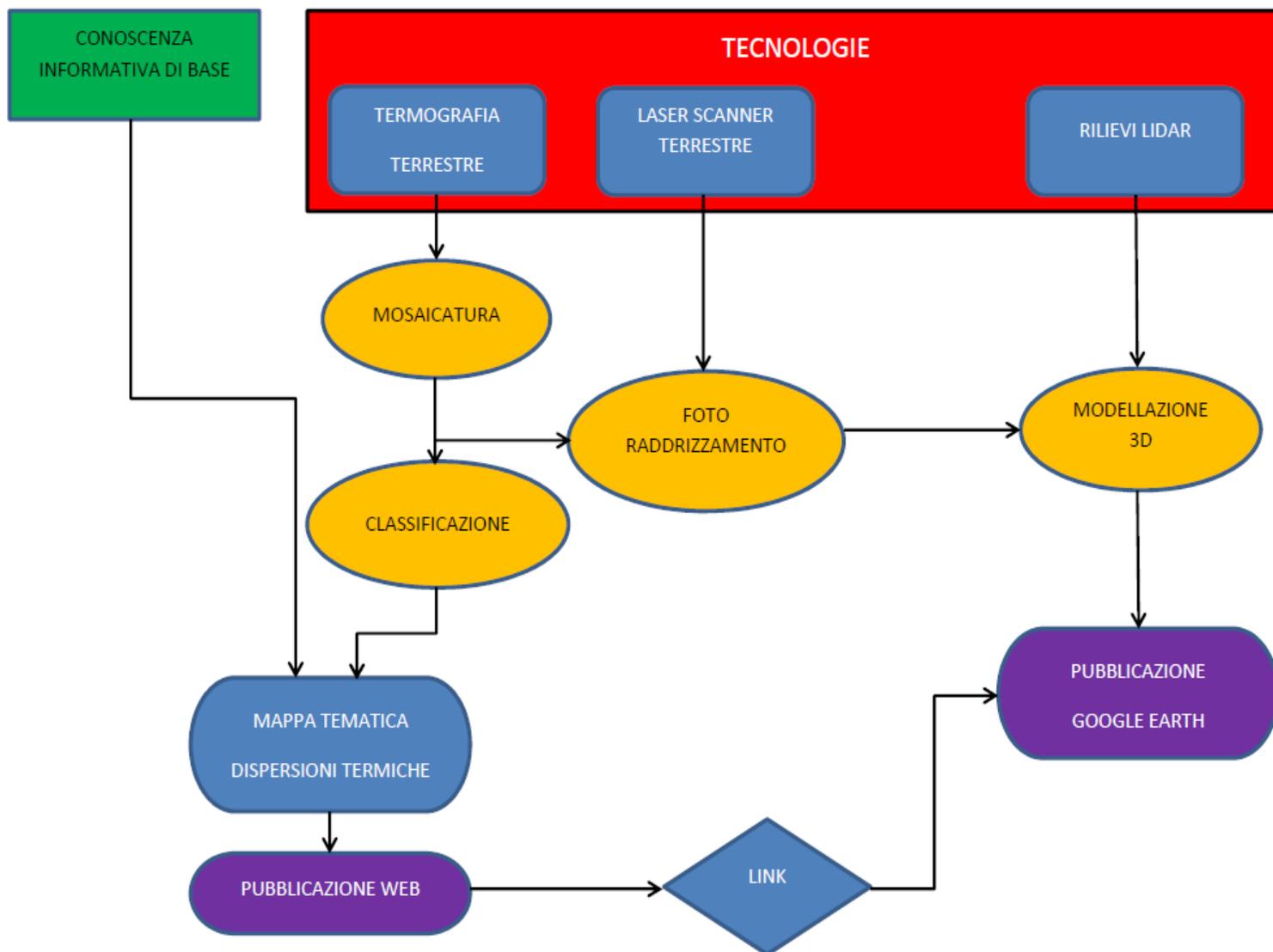
1. Mappa delle dispersioni energetiche degli edifici in ambiente urbano, con classificazione delle immagini termografiche
2. Modello 3D dell'edificato urbano, con "vestizione" delle pareti con termografie degli edifici" (Thermical City Model)

Nello schema seguente vengono riassunte le procedure per la redazione del presente lavoro. In particolare le fasi sono state:

1. Mosaicatura dei termogrammi
2. Fotoraddrizzamento delle immagine termografiche (impiego di dati desunti da laser scanner terrestre).¹²
3. Classificazione delle immagini termografiche prodotte tramite procedura di interpretazione visiva
4. Generazione di una mappa tematica con impiego di cartografia di base, esportazione del dato in formato vettoriale (.shp)
5. Modellazione 3D dell'edificato (impiego di dati desunti da acquisizione LIDAR da aereo)
6. Vestizione del modello 3D tramite immagini termografiche raddrizzate ed esportazione del dato in formato .kmz (Google Earth)

¹² Sarebbe più corretto attuare prima una procedura di raddrizzamento e poi di mosaicatura, ma vista la grande quantità di termogrammi e visto lo scopo finale si ritiene che questa sequenza produca errori di entità trascurabili

SCHEMA DEL PIANO DELLE ELABORAZIONI



7.1.1. Mosaicatura dei termogrammi

Con la campagna di rilievo termografico da terra, vengono registrate le radiazioni nella banda dell' infrarosso emesse dagli edifici, calcolate sulla base di queste le temperature e rappresentate in una scala di falsi colori. Il prodotto finale di tale elaborazioni eseguite dalla termocamera dipendono dalla distanza tra l'oggetto da rilevare e la termocamera e dall'angolare della lente focale dello strumento. Si hanno perciò casi in cui con una ripresa è stato acquisito un intero edificio, casi in cui per mancanza di spazio (vedi vie strette, per cui la distanza tra strumento e edificio da rilevare risulta di pochi metri) sono stati prodotti dei termogrammi (fotogrammi termici), che rappresentano stralci di edificio. Logicamente questo influenza anche la risoluzione spaziale dell'immagine (minore è la distanza, maggiore è la risoluzione spaziale). I termogrammi che rappresentano stralci di edificio devono perciò essere mosaicati, per poter avere l'immagine completa del fabbricato.

Per fare ciò è stata eseguita tramite il software open source HUGIN¹³, la mosaicatura dei termogrammi, tramite una procedura che possiamo definire come semiautomatica.

Una volta settato all'interno del software la lunghezza focale, nel nostro caso il valore risulta di 25 mm e successivamente selezionate le immagini da mosaicare (inserite in ordine di acquisizione), il software individua i punti di controllo per la mosaicatura, cioè quei punti in comune tra un termogramma ed un altro. Visto la natura dell'immagine, che risulta come già detto un'interpretazione della radiazione infrarossa acquisita, capita spesso che il software non sempre riconosca tra un'immagine ed un'altra i punti di controllo, in questo caso occorrerà procedere per una individuazione manuale di tali punti. Una volta individuati tutti i punti di controllo tra tutti i termogrammi, occorrerà far partire l'elaborazione di mosaicatura delle immagini.

¹³ Hugin è un programma libero multiplatforma per creare immagini panoramiche a partire da varie foto scattate secondo determinate regole. È sviluppato da Pablo d'Angelo e altri. L'incollaggio delle foto è eseguito a partire da foto che si sovrappongono parzialmente, usando dei punti di controllo per allineare e trasformare le foto in modo che siano adatte a formare un'unica grande immagine. Hugin consente di creare facilmente (e anche automaticamente) i punti di controllo tra coppie di immagini, ottimizzare le deformazioni delle immagini attraverso una finestra di anteprima.

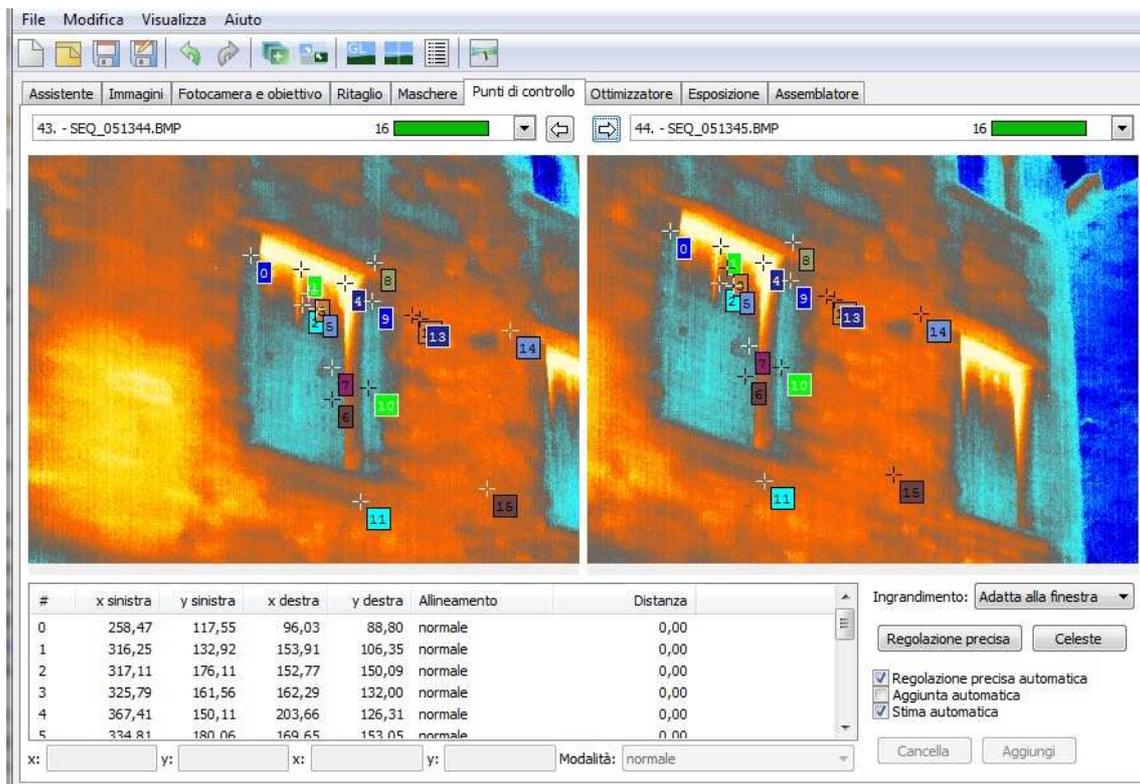


Figura 52: processo di individuazione dei punti di controllo

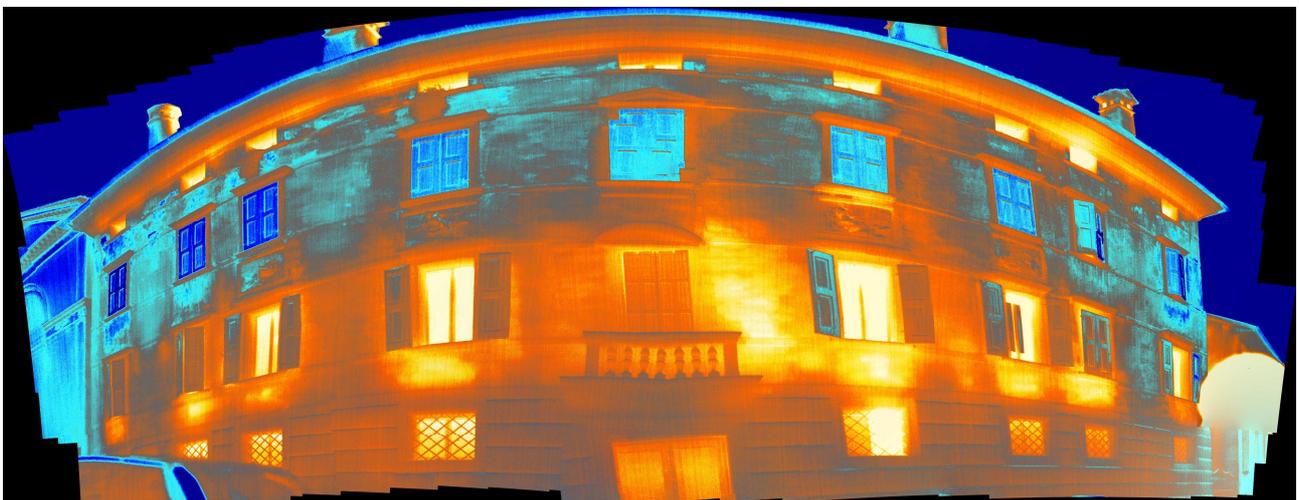


Figura 53: immagine mosaicata

7.1.2. Fotoraddrizzamento dell'immagine termografica

Come da nota precedente occorre sottolineare che in una normale procedura di raddrizzamento e mosaicatura sarebbe più corretto procedere prima al raddrizzamento della singola immagine e poi passare alla mosaicatura, per ridurre gli scarti e migliorare la qualità del prodotto finale, ma vista la grande quantità di termogrammi che devono essere raddrizzati e non avendo a disposizione un software in grado di raddrizzare in maniera automatica i fotogrammi e visto inoltre la finalità del lavoro, si ritiene che gli errori prodotti, possano essere ritenuti tolleranti con le finalità che si vogliono perseguire. Quindi una volta mosaicata l'immagine termica dell'intero fabbricato, questa deve subire un trattamento dal punto di vista geometrico per poter diventare un'immagine che ad una determinata scala sia direttamente misurabile. Dal punto di vista analitico, stabilito il sistema di riferimento, le relazioni tra immagine da raddrizzare e oggetto dipendono da 9 parametri che descrivono la posizione della lastra nello spazio (orientamento esterno) e le caratteristiche geometriche della camera (orientamento interno). Nel particolare caso in cui l'oggetto da rilevare sia un piano i parametri si riducono a otto: il motivo sta nel fatto che esistono delle relazioni fra i nove parametri originari.

Le relazioni analitiche tra coordinate oggetto e coordinate immagine sono governate dalle seguenti formule:

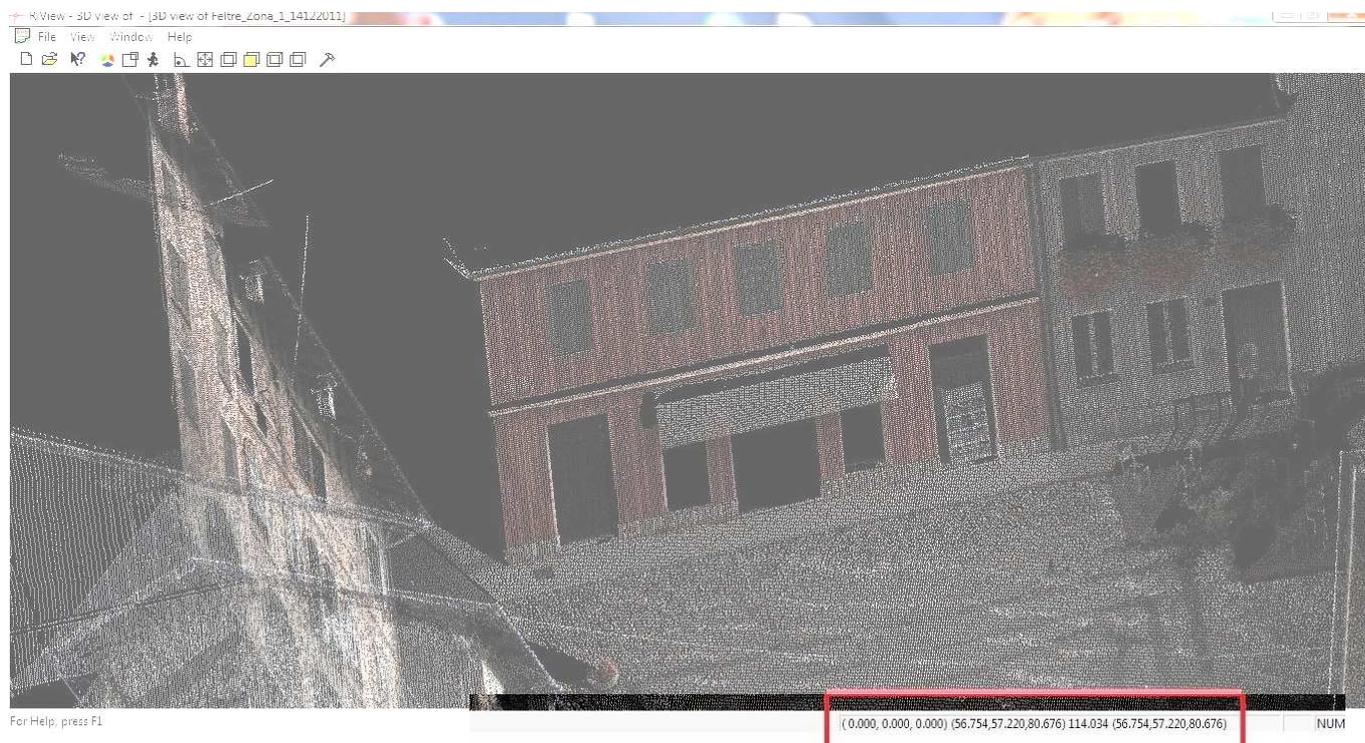
$$X = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{c_1x + c_2y + 1}$$

$$Y = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{c_1x + c_2y + 1}$$

Avendo a disposizione quattro punti (di controllo) di cui siano note le coordinate immagine e oggetto si possono determinare gli otto coefficienti e successivamente calcolare le X_i , Y_i di qualsiasi punto oggetto a partire dai punti immagine x_i , y_i . Qualora i punti di controllo siano più di quattro, i parametri sono stimati con il metodo dei minimi quadrati ed è possibile valutare l'incertezza dei risultati ottenuti. Il presupposto fondamentale per l'impiego del metodo del raddrizzamento è che l'oggetto da rilevare sia piano.

Per tale motivo si impiega il software prodotto dal Circe dell'università IUAV di Venezia RDF.

Avendo a disposizione le scansioni laser degli edifici, è possibile determinare le coordinate dei punti da impiegare come punti di controllo per il raddrizzamento (fig. 54).



BARRA DELLE COORDINATE DEI SINGOLI PUNTI RIFERITI AD UNA TERNA CARTESIANA XYZ

Figura 54: nuvole di punti acquisite con laser scanner terrestre. Nell'immagine vengono evidenziate le coordinate relative ad una terna cartesiana xyz, che verranno salvate in un file di testo, per essere utilizzati come punti di controllo per il fotoraddrizzamento

A questo punto viene definito il piano su cui occorrerà fare la trasformazione. Per ciò i dati desunti da scansione laser terrestre dovranno essere proiettati sul piano di cui sopra. Per questa procedura si impiegano funzioni CAD in modalità 3D, in cui tramite la definizione degli UCS è possibile proiettare e calcolare i punti di controllo secondo un origine da noi definita, come si evidenzia dall'immagine sottostante.

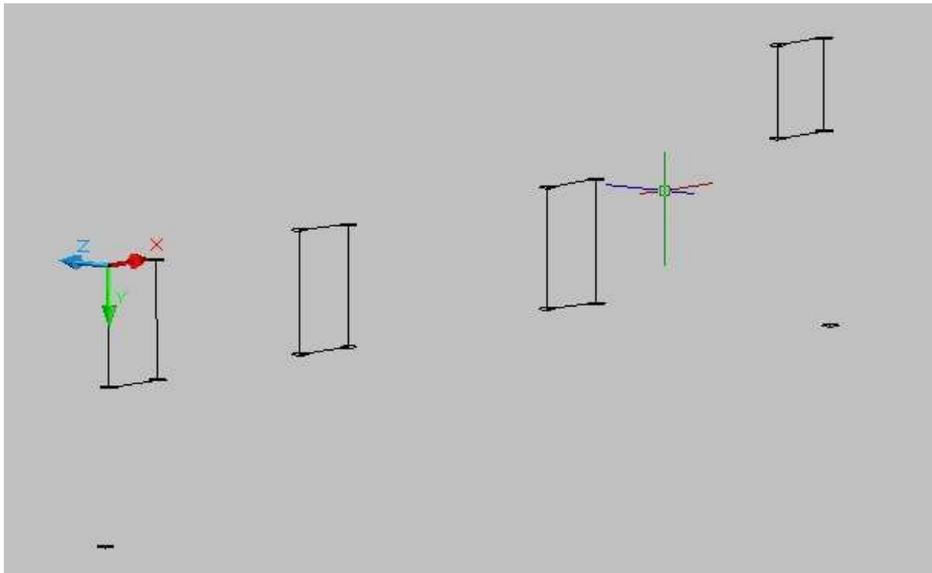


Figura 55: definizione di UCS in ambiente CAD 3D per la proiezione dei dati rispetto a un piano ed un origine da noi definito

Nell'esempio vengono rappresentati i limiti di quattro aree finestrate e altri due punti di controllo e la definizione dell'origine del piano rispetto ad un spigolo dell'area finestrata

Dopodiché viene generato un file di testo contenente le coordinate normalizzate, che verrà impiegato nella procedura di fotoraddrizzamento. Saranno creati secondo il seguente schema:

52	53.1850	9.1490
51	51.2330	9.1570
44	49.5287	2.5930
50	47.3447	9.1690
46	48.3082	5.2070

La prima colonna rappresenta il numero d'ordine dei punti di controllo che successivamente dovranno mantenere la stessa numerazione nella fase di inserimento degli stessi punti direttamente nell'immagine da raddrizzare. Nella

seconda e terza colonna saranno indicate le coordinate X e Y.

Una volta inserite tutte le coordinate nell'immagine, verrà prodotta una tabella contenete gli scarti residui derivante dalla trasformazione

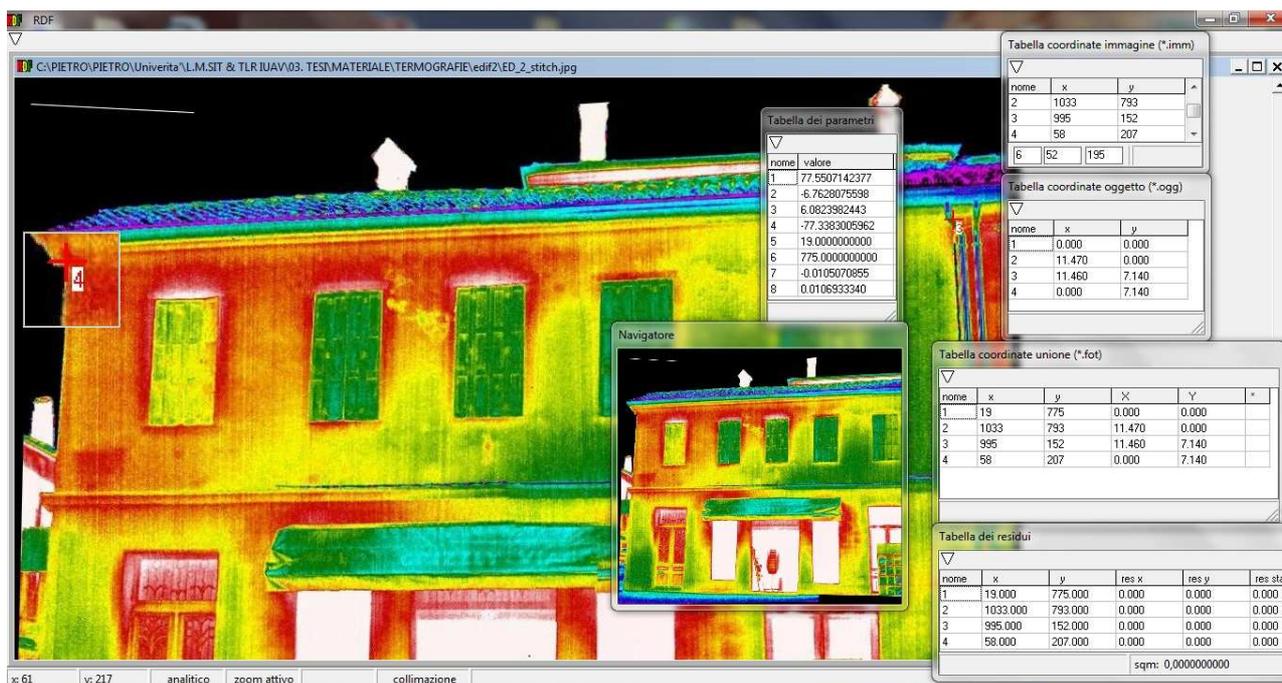


Figura 56: processo di fotoraddrizzamento dell'immagine, con indicate le tabelle relative ai punti di controllo dell'immagine termografica e i rispettivi punti desunti da laser scanner terrestre e normalizzati al piano di lavoro. Si possono inoltre notare le tabelle dei residui (con indicazione degli scarti derivanti dal processo di raddrizzamento)

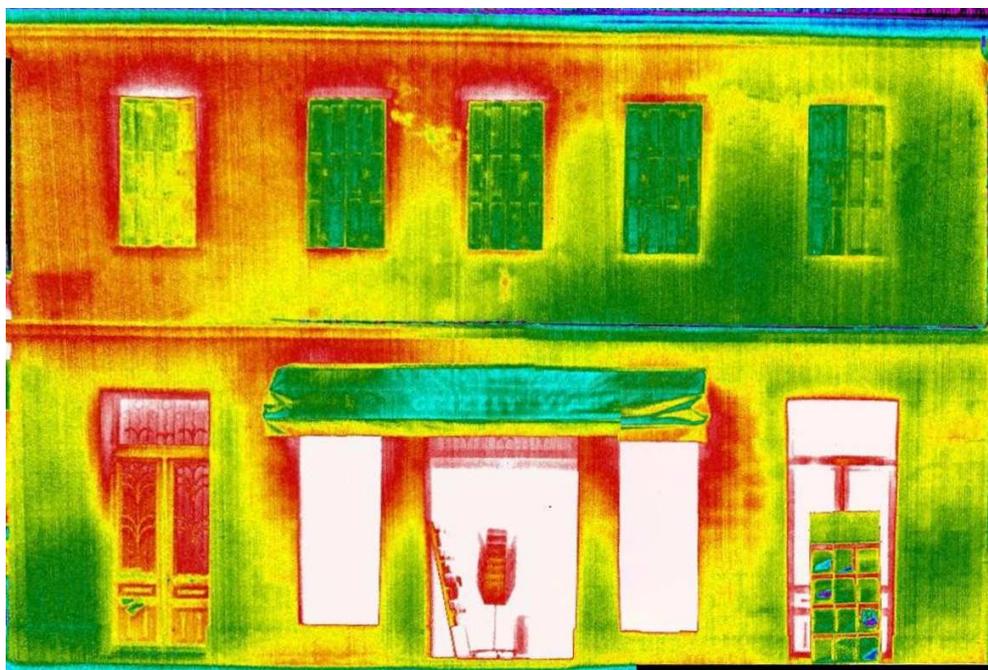


Figura 57: risultato dell'immagine raddrizzata

7.1.3. Classificazione immagini termografiche

Si vuole ora procedere ad una classificazione delle varie immagini per la produzione successivamente di una mappa tematica delle dispersioni. La classificazione consiste nell'assegnare ad ogni facciata di edificio un valore, che denoti lo stato di dispersione termica in cui si trova, utilizzando a tal fine le immagini termografiche le quali individuano le temperature delle varie porzioni delle facciate.

Il processo di raddrizzamento delle immagini termografiche, ha prodotto una caratteristica di coerenza con i dati metrici dell'oggetto. Per questo motivo si è pensato inizialmente di poter attuare delle procedure di classificazione automatiche utilizzando i falsi colori RGB e dando un peso alle varie classi risultanti e definire l'appartenenza della facciata del fabbricato ad una gruppo.

Si è però notato che i fattori che influenzano il risultato finale sono innumerevoli, non dipendenti dalle caratteristiche del fabbricato, che possano essere statisticamente valutate. In particolare i fabbricati durante la campagna di rilevamento, quando viene acquisita l'immagine termografica, risultano essere in determinate condizioni, il che comporta che l'immagine termografica acquisisca determinati valori dell'edificio in quel determinato istante. Capita a volte però che quello che viene rilevato non è rappresentativo dell'effettive caratteristiche termiche del fabbricato. In altre parole i fattori che influenzano l'acquisizione del termogramma possono essere, ad esempio l'apertura o meno di una persiana, una stanza che può essere riscaldata oppure no, la presenza di un sottotetto, la presenza di ornamenti o altri oggetti come le tende parasole, ecc.

Quindi a causa di questi fattori, in caso di sola valutazione automatica tramite formule statistiche, si possono produrre dei risultati che non rispecchiano effettivamente la realtà.

Occorre però fare una precisazione, questo discorso vale soprattutto per il rilievo termografico delle facciate, mentre si ritiene che nel caso di coperture essendo la superficie meno influenzata da fattori di cui sopra ed essendoci una continuità di materiale (le coperture sono solitamente composte da coppi; la presenza di materiali differenti di lucernai o comignoli, incidono molto poco sulla omogeneità dell'intera superficie), questo discorso non valga. Esistono esempi di progetti di rilievi termografici delle coperture, in cui viene eseguita una classificazione di dispersione sulla base della risposta infrarossa rilevata (si veda l'esempio di cui alla premessa sul lavoro eseguito nella città di GAP).

Per questi motivi, per il presente lavoro si ritiene che la classificazione debba essere fatta sulla base di un'analisi critica delle immagini, eseguita soprattutto da professionisti esperti

del settore, che grazie a conoscenze specifiche ed esperienza acquisita nel campo possano dare una valutazione la più verosimile alla realtà. Essi sono in grado di interpretare situazioni in cui la risposta termografia non rappresenti la reale situazione di capacità dispersiva del singolo elemento della facciata dell'edificio. Ad esempio nel caso di una stanza non riscaldata, la termografia rileva una bassa temperatura, questo non significa per forza di cose che la parete ha un buon isolamento, potrebbe anzi essere che il materiale da cui è composta abbia un alto valore disperdente. Di seguito (figura 58) viene fatto un esempio pratico:

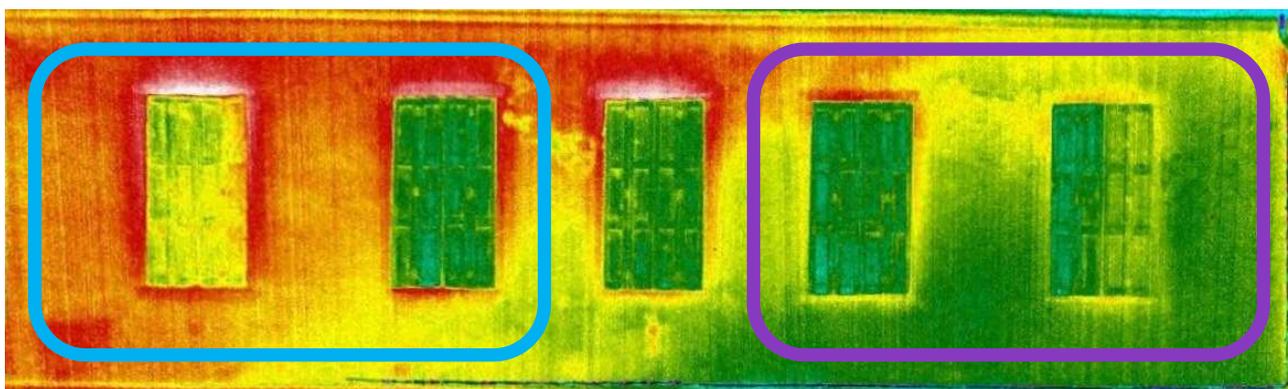


Figura 58: nella parte a sinistra dell'immagine si denota un'alta temperatura della facciata (riquadro azzurro), mentre nella parte di destra è misurata una bassa temperatura (riquadro viola). Nella porzione di sinistra molto probabilmente vi è la presenza di un locale riscaldato e le pareti risultano avere una dispersione degna di nota. A sinistra molto probabilmente i locali interni non sono riscaldati. Considerando che i materiali costituenti le pareti esterne siano omogenei (l'andamento generale della temperatura sembra affievolirsi gradatamente andando da sinistra verso destra, non si rilevano cambiamenti repentini di temperatura che facciano presagire ad una diversificazione di materiali) si può stimare che anche la porzione di destra abbia una capacità dispersiva uguale alla porzione sinistra.

Comunque una classificazione ad oggetti sulla base della risposta RGB delle temperature, può divenire un ottimo strumento di supporto all'analisi e alla valutazione critica delle dispersioni.

In particolare, per il presente lavoro si è ritenuto di procedere nel seguente modo:

- Individuazione delle parti componenti la facciata dell'edificio, in base alle diverse tipologie di dispersioni termiche delle facciate (ponti termici, superfici opache, superfici trasparenti, serramenti)
- Assegnazione di un valore di dispersione tra le varie componenti (Alto, Medio, Basso)
- Assegnazione di un peso di dispersione delle varie componenti, sulla base dei dati desunti da uno studio condotto nell'ambito di un progetto francese per la sensibilizzazione della popolazione al tema delle dispersioni di calore degli edifici

abitativi attraverso l'uso di termografia aerea. In particolare il progetto riguarda le amministrazioni comunali di Dunkerque, Grenoble, Marsiglia, Nantes, Nice o Reims.

- Calcolo della media aritmetica ponderata dei valori di cui sopra
- Individuazione delle classi di dispersione in base a determinati range di valori desunti dalla media aritmetica ponderata. Le classi di dispersione risultano (Alto, Medio, Basso, Non Definito)

Ad ogni singolo componente possono essere quindi assegnati i seguenti valori:

Alto = 3

Medio = 2

Basso = 1

Non definito = 0

Alle varie componenti costituenti la parete viene assegnato un peso. Questo valore deriva dai valori medi stimati di dispersione degli elementi dell'edificio. Questi valori vengono raggruppati per macro-elementi (facciata, resto dell'edificio) ed infine calcolato il peso che gli elementi costituenti la facciata hanno sul totale dell'intera facciata

<i>COMPONENTI DISPERDENTI DELLE PARETI</i>	<i>PERCENTUALE DISPERSIONE SU INTERO INVOLUCRO</i>	<i>RAGGRUPPAMENTO IN MACROELEMENTI</i>	<i>PERCENTUALE DISPERSIONE PER MACROELEMENTI DELL'INVOLUCRO</i>	<i>PERCENTUALE DISPERSIONE DEI SINGOLI ELEMENTI SU FACCIATA</i>
PONTI TERMICI	5	FACCIATE	53	9
SUPERFICI OPACHE	25			47
SUPERFICI TRASPARENTI	13			25
SERRAMENTI	10			19
TETTO	30	RESTO INVOLUCRO	47	
VENTILAZIONE	10			
SUOLO	7			
Totale	100		100	100



Figura 59: percentuale di dispersione delle varie componenti dell'involucro edilizio

A questo punto, una volta assegnati i valori di dispersione dei singoli componenti costituenti le facciate, viene fatta una media ponderata e sulla base di questa assegnato un valore totale di dispersione della facciata.

La media ponderata viene calcolata secondo la seguente formula:

$$\bar{X}_P = \frac{\sum_{i=1}^c x_i \cdot f_i}{n}$$

Dove:

- **Xp**: media aritmetica ponderata;
- **x_i**: valore assunto dalla variabile i;
- **f_i**: valore del peso assegnato alla variabile i;
- **n**: sommatoria dei pesi da 1 a c.

Calcolato il valore della media aritmetica ponderata si assegnerà la classe di dispersione sulla base del seguente range di valori:

Range	Classe di dispersione
0,72 – 1,43	BASSO
1,44 – 2.15	MEDIO
2,16 - 3	ALTO
	NON DEFINITO

Il valore “NON DEFINITO” viene assegnato nel caso in cui la somma dei pesi di due componenti sia maggiore di 28.

Il numero 28 infatti rappresenta la sommatoria dei pesi del ponte termico e dei serramenti, per cui riuscendo a dare un valore alle superfici opache e alle superfici trasparenti, è possibile ugualmente assegnare una classe alla parete, al contrario la non conoscenza delle superfici opache, fa sì che la parete non possa essere classificata, assegnando così il valore “NON DEFINITO”. Infine il range che va da 2,16 a 3, è stato scelto per far sì che nel caso in cui non sia definibile il ponte termico e i serramenti e le superfici vetrate e quelle opache abbiano un valore di dispersione “Alto”, queste debbano ricadere all’interno della classe di dispersione della facciata pari ad “ALTO”. Di conseguenza per le classi “MEDIO” e “BASSO”, il range calcolato deriva dalla media tra il valore minimo possibile (senza che la classe divenga NON DEFINIBILE) e il valore di 2,15

Nella seguente tabella vengono fatti alcuni esempi:

	PONTE TERMICO	SUPERFICIE OPACA	SUPERFICIE TRASPARENTE	SERRAMENTI	MEDIA ARITMETICA PONDERATA	CLASSE DI DISPERSIONE
Facciata 1	1	1	1	1	1	BASSA
Facciata 2	2	2	3	2	2,25	ALTA
Facciata 3	1	0	3	3	1,41	NON DEFINITO
Facciata 4	2	2	0	3	1,69	MEDIO
Facciata 5	0	3	3	0	2,16	ALTA
PESO ELEMENTO	9	47	25	19		

7.1.4. Procedure per la classificazione dell’immagine termografica

Di seguito si riporta l’esempio della procedura per l’assegnazione dei valori di dispersione delle singole componenti delle facciate dell’involucro. In particolare si è proceduto secondo due principali:

- Classificazione immagine termografica sulla base della risposta RGB, tramite classificatore ad oggetti
- Analisi critica dell’immagine, con l’ausilio dei valori desunti da classificazione di cui sopra e assegnazione della classe di dispersione

L'immagine termografica, a seguito delle elaborazioni di cui ai paragrafi precedenti, risulta essere geometricamente corretta. A questo punto tramite software eCognition, si procede ad una classificazione sulla base della risposta RGB, in particolare si utilizza un classificatore ad oggetti. Vengono definite 6 classi che rappresentano sei risposte RGB, direttamente connesse al valore di temperatura, in particolare vengono create le classi: ALTO, MEDIO ALTO, MEDIO, MEDIO BASSO, BASSO, NO DATA.

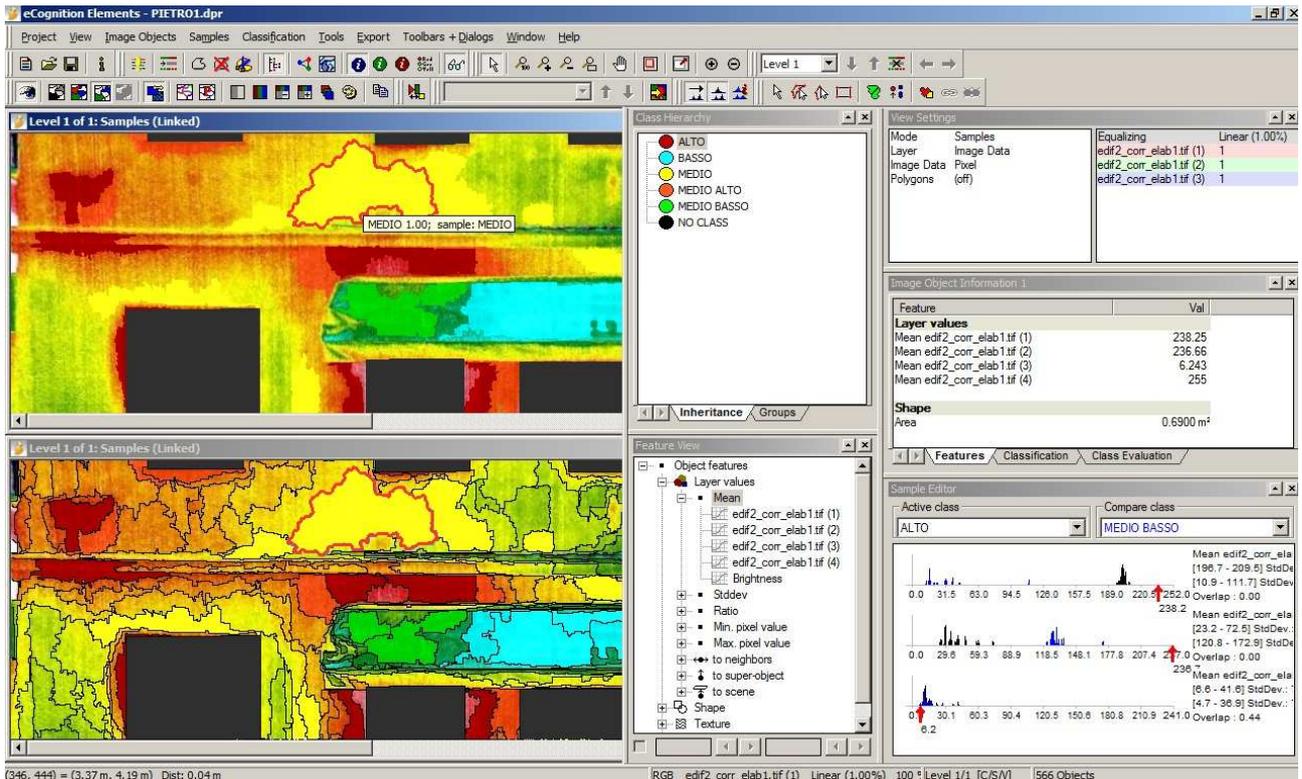


Figura 60: procedura di classificazione ad oggetti tramite software eCognition

Dal processo di elaborazione avremo in uscita un file vettoriale, con associata una tabella indicante per ogni singolo poligono la classe da noi definita e il valore RGB assegnato ad ogni singola classe.

A questo punto si procede al calcolo della superficie di ogni singolo poligono ed alla sommatoria delle superfici per classi. Una volta calcolate le superfici, viene eseguita una sommatoria per il calcolo della superficie totale e conseguente calcolo percentuale di ogni singola classe

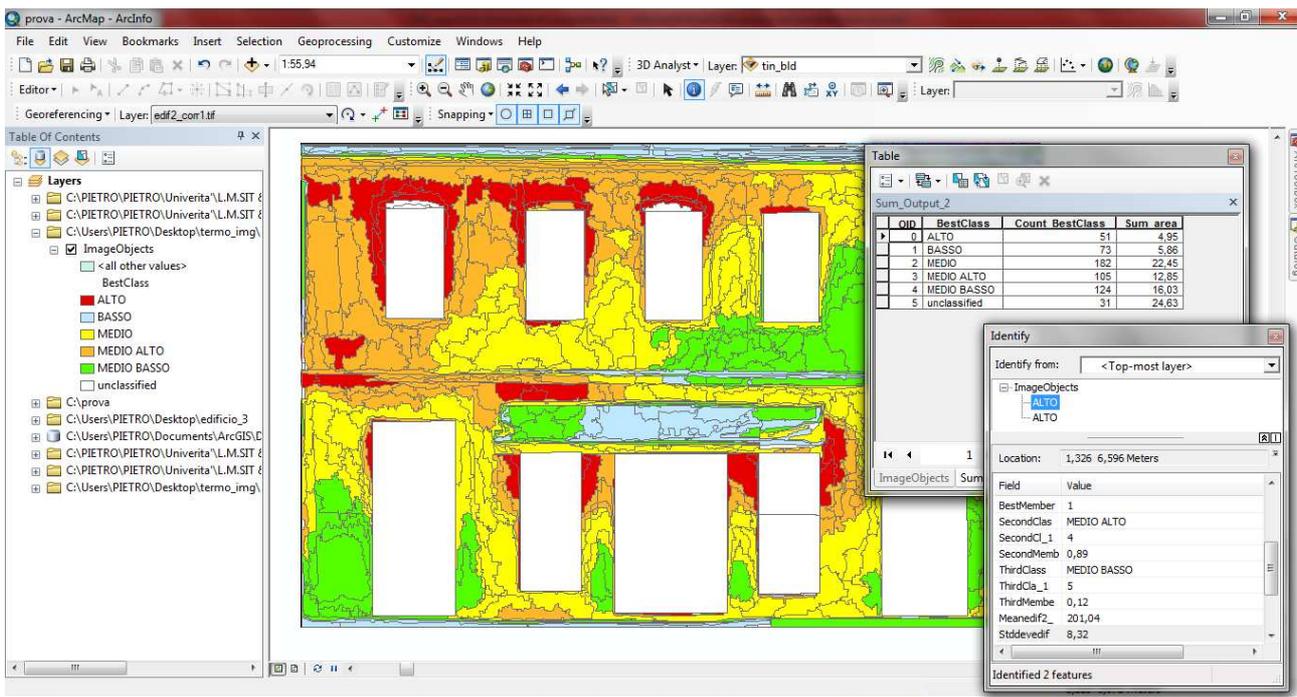


Figura 61: calcolo delle superfici delle singole classi desunte da classificazione ad oggetti

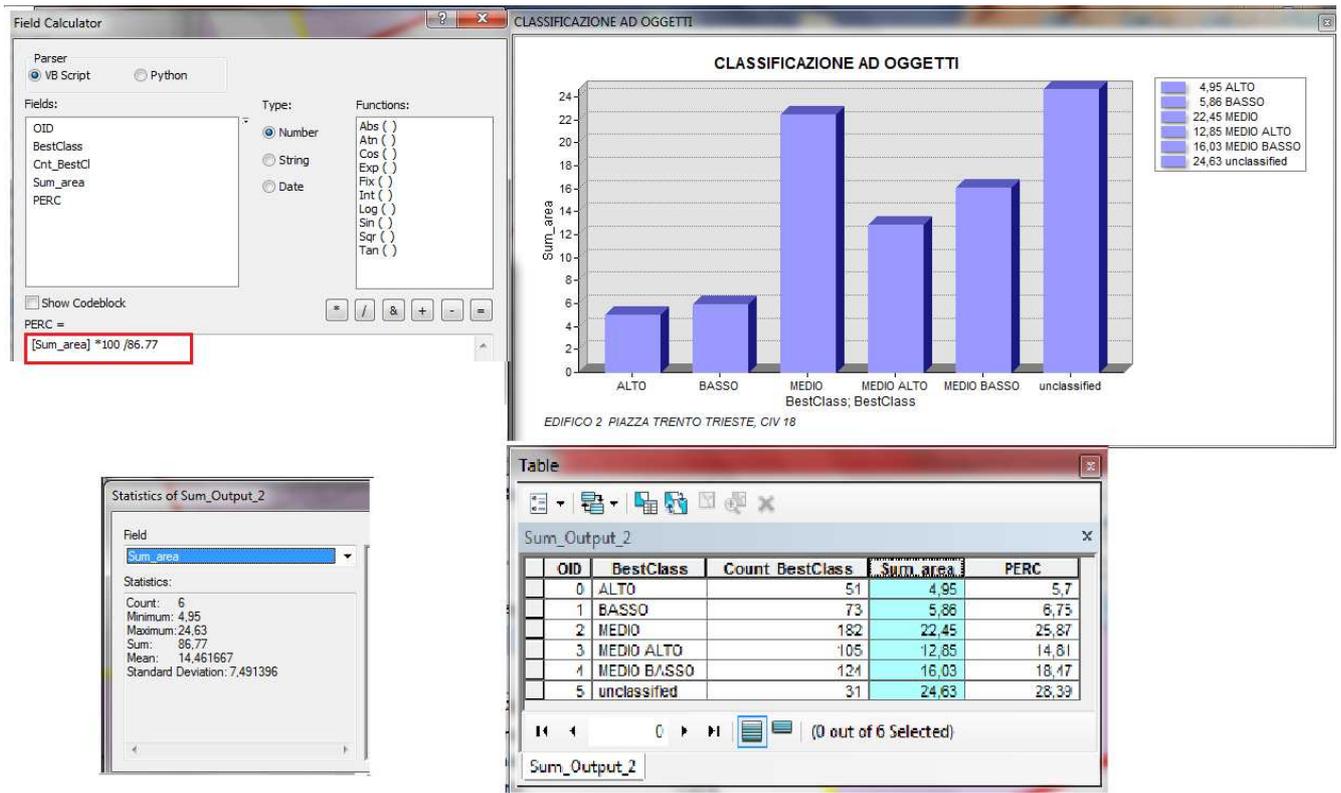


Figura 62: : tabella riassuntiva con le superfici delle classi, la percentuale di ciascuna classe e l'istogramma superficie/classe di temperatura

Da una prima analisi dell'immagine classificata si possono subito fare delle considerazioni, innanzi tutto si può notare come intorno alle aperture, soprattutto in presenza di ambienti

riscaldati, ci siano delle temperature piuttosto elevate, sintomo probabilmente di una scarsa resistenza termica dell'infisso. Inoltre vi è la presenza di un marcapiano, che potrebbe fungere da ponte termico, in questo caso si può notare come le classificazione ad oggetti esalti le geometrie che possono essere misurate e calcolate, a differenza dell'immagine termografica che per sua natura in alcuni casi tende a sfumare le geometrie.

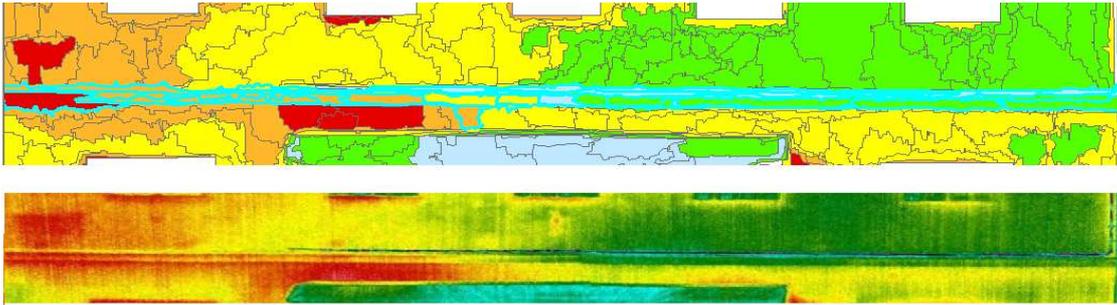


Figura 63: marcapiano da classificazione ad oggetti e da immagine termografica

Inoltre si può notare la presenza di una porzione di parete nella parte destra decisamente più calda delle zone adiacenti, il che fa presagire alla presenza di una fonte di calore e di un non esaltante isolamento della parete.

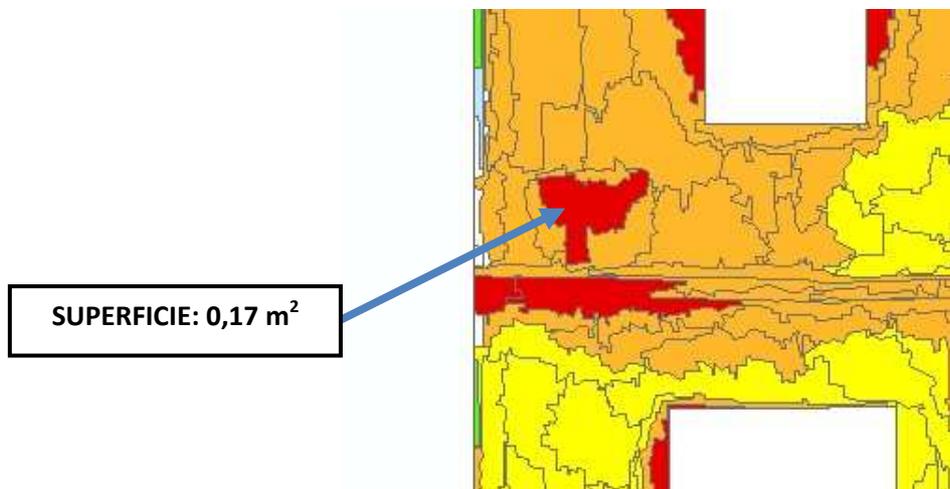


Figura 64: elevata temperatura rilevata in parete **area**

A questo punto si passa ad un analisi critica delle componenti della facciata, sulla base di cui sopra, per l'assegnazione delle classi di dispersioni dei singoli elementi costituenti la facciata:

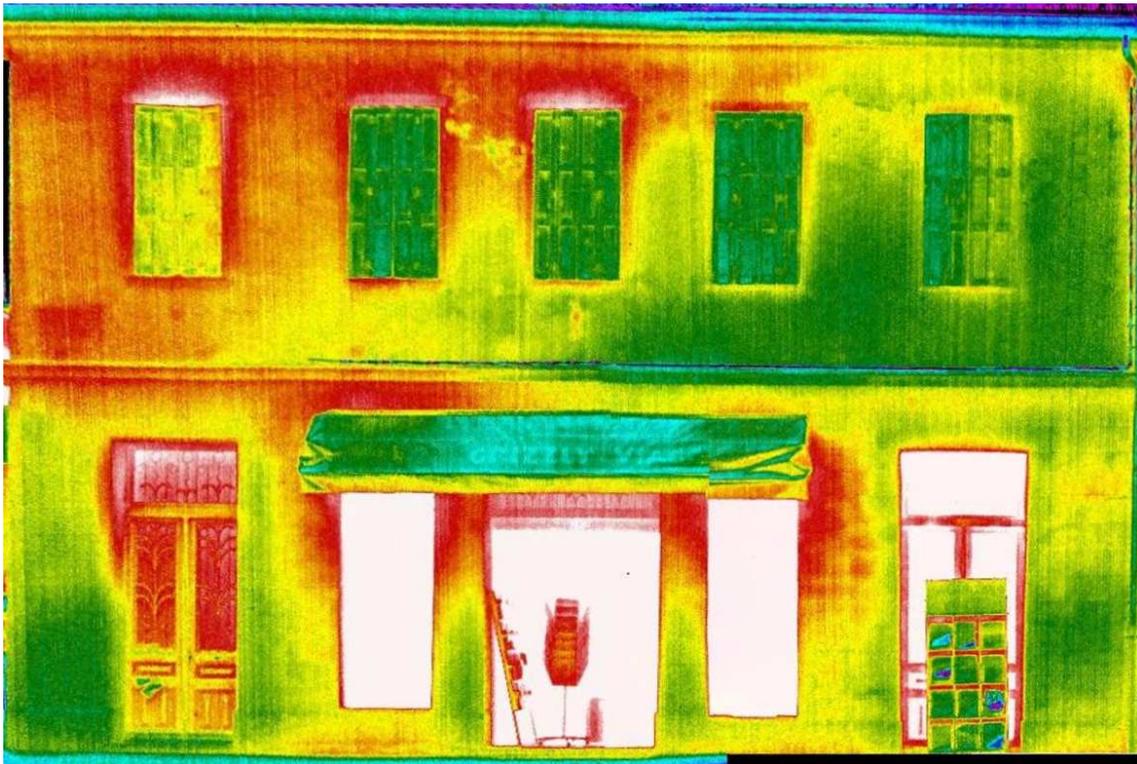


Figura 65: immagine termografica di esempio

Ponti termici: dall'immagine si può notare la loro assenza, non si denotano infatti nelle strutture verticali differenze di resistenza termica che possano far pensare ad una discontinuità di materiali. Questa ipotesi può inoltre essere giustificata dal fatto che siamo in presenza di un edificio localizzato in centro storico e quindi di non recente costruzione, per cui si ritiene che le strutture portanti possano essere in muratura o pietra portante. Vi è comunque la presenza di un marcapiano (vedi figura sottostante), che denota il solaio tra piano terra e primo, in cui si scorge una leggera discontinuità di temperatura pressoché irrilevante, in quanto in linea di massima segue l'andamento della struttura opaca verticale. Per questo motivo viene assegnato un valore pari a **0**

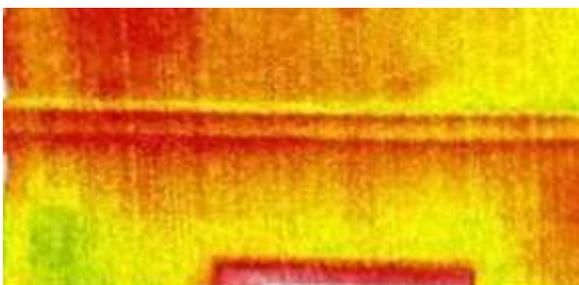


Figura 66: ingrandimento del marcapiano della facciata, l'andamento delle temperature rimane pressoché costante

Superficie opaca: la superficie non ha un andamento costante delle temperature, andando da temperature decisamente più fredde nella parte di destra (colore verde), aumentando

di intensità (colore giallo) fino ad arrivare a temperature decisamente più elevate come si denota nella parte in alto a sinistra. Presumibilmente le zone più fredde risultano solamente non riscaldate, e nulla fa presagire ad una differenza di dispersione termica connessa alla differenza di materiale, non vi è infatti una netta e definita variazione di temperatura. Questa anzi si degrada in maniera abbastanza regolare. Si può notare anzi come il calore tenda a spostarsi verso l'alto (vedi immagine sottostante) . Vista le non elevatissime temperature degli ambienti presumibilmente riscaldati e per quanto sopra si ritiene di assegnare un valore di dispersione pari a **2**

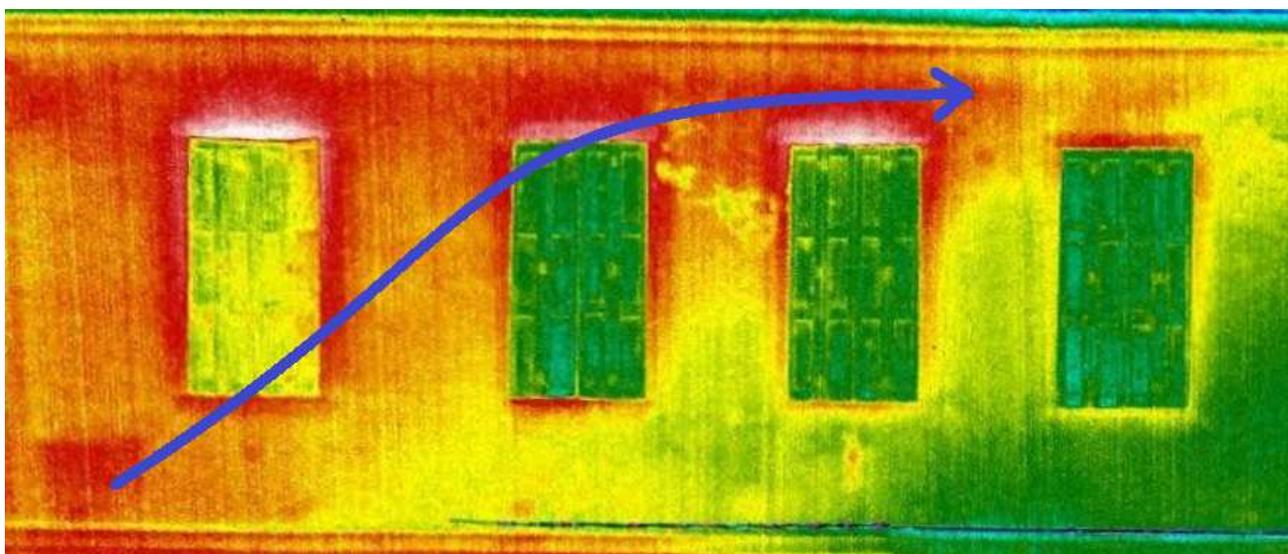


Figura 67: temperature rilevate sulla superficie opaca, la freccia blu denota la propagazione del calore

Superficie trasparente: le superfici finestrate, si trovano sia al piano terra che al piano primo, quest'ultime però risultano non visibili in quanto le persiane sono chiuse. Al piano terra invece la presenza di vetrine, fa notare come siano decisamente elevate le dispersioni di temperature dovute alle vetrate raggiungendo una colorazione bianca, in presenza di locali riscaldati. Si nota inoltre che nella parte in basso a sinistra, il portone d'ingresso si trova in una zona presumibilmente non riscaldata, vista la colorazione verde intorno ad esso; nonostante ciò le vetrate costituenti il portone risultano di una colorazione rossa (vedi immagine sottostante). Per tali motivi si ritiene di assegnare un valore di dispersione pari a **3**

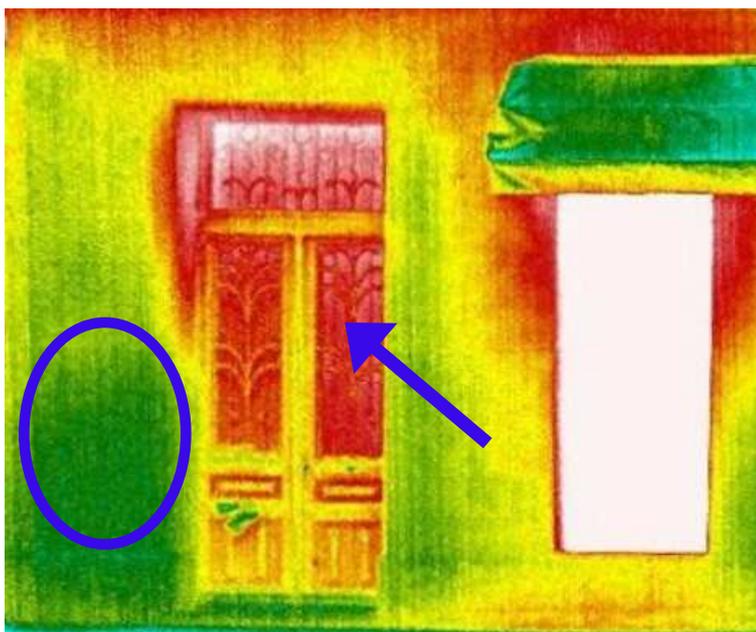


Figura 68: la freccia blu indica la vetrata del portone d'ingresso, su cui viene rilevata un'elevata temperatura nonostante il locale risulti non riscaldato (ovale blu)

Serramenti: la valutazione viene fatta in particolare analizzando le temperature nel perimetro esterno delle aperture. In questo caso si può notare come le aperture siano contornate da una colorazione piuttosto accesa che fa presagire a serramenti non molto isolanti. Nella finestra in alto a sinistra (vedi immagine sotto) le temperature analizzate sono decisamente elevate, ma vista la colorazione della persiana (giallo) si presume che la finestra sia aperta. Nelle aperture a fianco in cui si presume che le finestre siano chiuse, vista la colorazione "più fredda", si nota una colorazione tendente al rosso nel perimetro dell'apertura fino ad una colorazione bianca nella parte sommitale, l'apertura. Da queste analisi si propone di assegnare un valore di dispersione parti a **3**

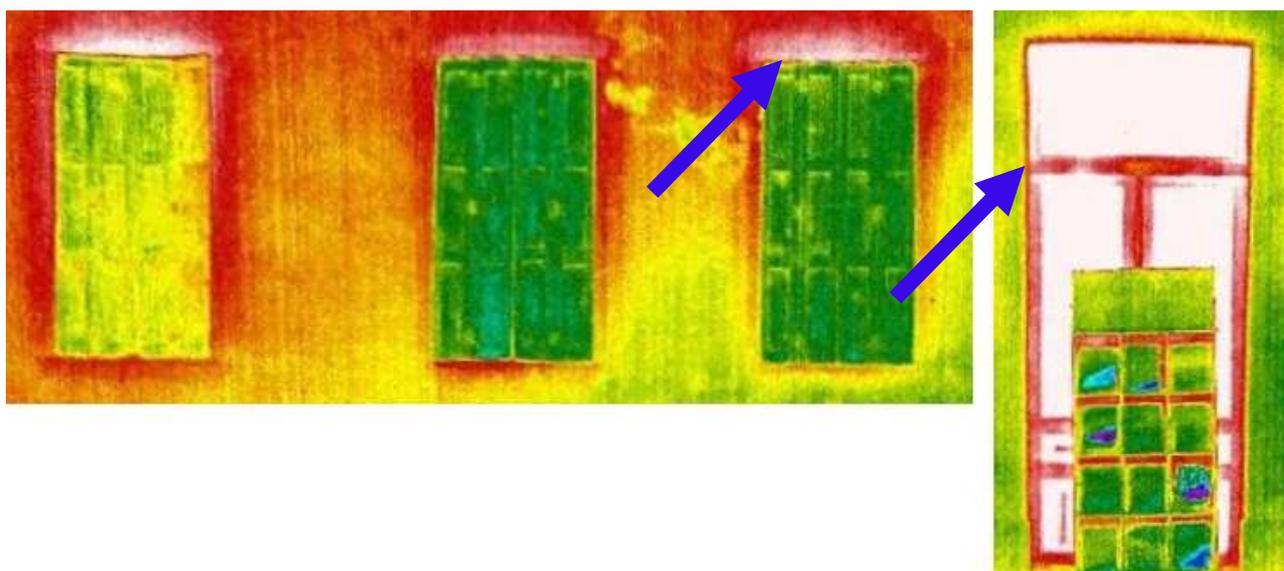


Figura 69: con le frecce blu vengono indicate le temperature rilevate in prossimità dei serramenti

Sulla base di quanto sopra, si riporta la tabella riassuntiva delle dispersioni della facciata con assegnazione della classe di dispersione.

	PONTE TERMICO	SUPERFICIE OPACA	SUPERFICIE TRASPARENTE	SERRAMENTI	MEDIA ARITMETICA PONDERATA	CLASSE DI DISPERSIONE
<i>Piazza Terento e Trieste Civico n 18</i>	0	2	3	3	2,26	ALTO
<i>PESO ELEMENTO</i>	9	47	25	19		

Figura 70: tabella per il calcolo del valore di dispersione della facciata

7.1.5. Costruzione della mappa tematica

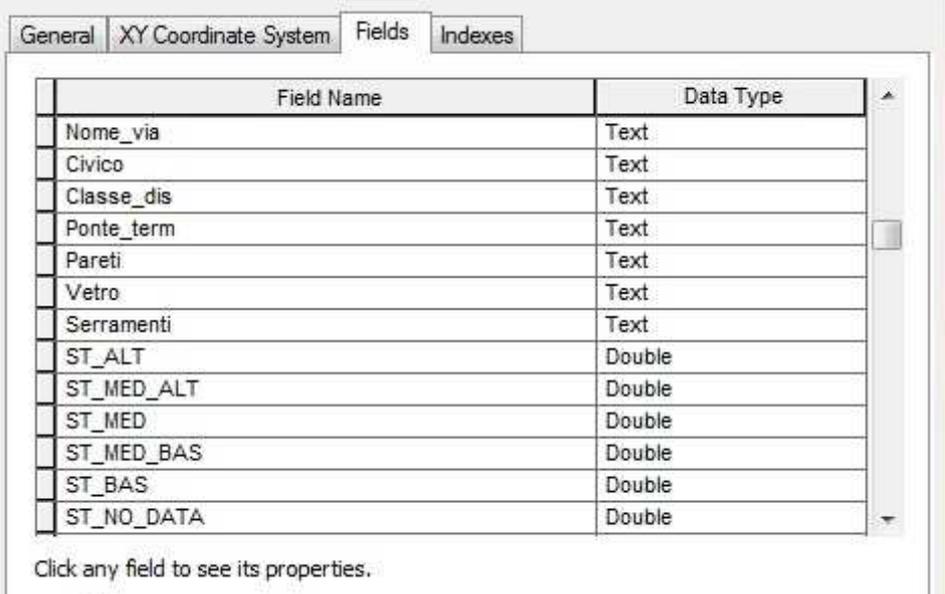
Per la generazione della mappa tematica, come prima cosa si è partiti da una cartografia di base. La cartografia di base potrebbe essere o una base catastale in formato vettoriale oppure una carta tecnica regionale. Nel Nostro caso si è impiegata la carta tecnica regionale 1:5000 della Regione Veneto utilizzata anche dal SIT del Comune di Feltre . La mappa risulta essere georeferenziata nel sistema geodetico Roma 40, con proiezione conforme di Gauss-Boaga fuso Ovest.

La mappa tematica sarà invece costituita da POLYLINE, che rappresenteranno il valore assegnato alla facciata, sulla base della procedura di classificazione di cui al paragrafo precedente. Verrà inoltre assegnata una colorazione alle diverse polyline sulla base dei valori di dispersione. In particolare si è pensato al seguente schema:

COLORE POLYLINE	CLASSE DI DISPERSIONE
	ALTO
	MEDIO
	BASSO
	NON DEFINITO

Come già detto la geometria impiegata sarà una polyline, denominata *Dispersione.shp* alla quale sarà collegata una tabella contenete i seguenti valori:

- ID: identificativo univoco della geometria
- NomeVia: Nome della via o Piazza
- N_Civico: Numero civico
- Dispersione: Classe di dispersione della facciata
- Ponte_termico: valore attribuito al ponte termico della facciata
- Pareti: valore attribuito alle superfici opache della facciata
- Vetro: valore attribuito alle superfici trasparenti della facciata
- Serramenti: valore attribuito ai serramenti della facciata
- ST_ALT: superficie rilevata della parete a cui è stato assegnato il valore di temperatura ALTO a seguito di classificazione ad oggetti
- ST_MED_ALT: superficie rilevata della parete a cui è stato assegnato il valore di temperatura MEDIO-ALTO a seguito di classificazione ad oggetti
- ST_MED: superficie rilevata della parete a cui è stato assegnato il valore di temperatura MEDIO a seguito di classificazione ad oggetti
- ST_MED_BAS: superficie rilevata della parete a cui è stato assegnato il valore di temperatura MEDIO-BASSO a seguito di classificazione ad oggetti
- ST_BAS: superficie rilevata della parete a cui è stato assegnato il valore di temperatura BASSO a seguito di classificazione ad oggetti
- ST_NO_DATA: superficie non rilevata
- TSM3D: contenete il percorso del file .Kmx per la visualizzazione 3D del Termichal City Model,



Field Name	Data Type
Nome_via	Text
Civico	Text
Classe_dis	Text
Ponte_term	Text
Pareti	Text
Vetro	Text
Serramenti	Text
ST_ALT	Double
ST_MED_ALT	Double
ST_MED	Double
ST_MED_BAS	Double
ST_BAS	Double
ST_NO_DATA	Double

Click any field to see its properties.

Figura 71: tabella dati della mappa tematica

Quindi alla geometria vengono assegnati dati riguardanti l'indirizzo. Questi dati vengono attribuiti utilizzando il file puntuale a nostra disposizione e cioè *CMFciv.shp*, contenente informazioni relative agli indirizzi degli edifici. Per assegnare al file *Dispersione.shp*, i valori di indirizzo, occorre fare alcune elaborazioni, passando per il file poligonale *Edifici.shp*

- Dato che ogni edificio può contenere più numeri civici, ai punti del file *CMFciv.shp* è stato assegnato con un operazione spaziale, l'ID del poligono *Edifici.shp* in cui ricadevano. Ai poligoni *Edifici.shp* è stato unito l'attributo del numero civico con una procedura basata sulla corrispondenza fra indici, instaurata con la precedente operazione. Ogni record della nuova colonna annessa al database del file *Edifici.shp* contiene i vari numeri civici separati da “;” .
- A questo punto tramite un operazione di unione basata sulla sovrapposizione spaziale tra *Edifici.shp* e *Dispersione.shp*, vengono aggiunte al file lineare le colonne Nome_via e Civico, con i dati derivanti dalla precedente elaborazione

FID	Shape *	Id	Nome via	Civico	Classe dis	Ponte term	Pareti	Vetro	Serramenti
0	Polyline	0	PIAZZA TRENTO E TRIESTE	18;14					

Figura 72: risultato della procedura di assegnazione dell'indirizzo al file *dispersioni.shp*

Si è ritenuto di dover assegnare alla singola polyline oltre che il valore finale della dispersione, anche i valori delle singole componenti della facciata dell'edificio, per far meglio comprendere in fase di consultazione del dato la reale condizione in cui si trovano i singoli componenti del fabbricato. Il valore finale di dispersione, è il risultato di un elaborazione matematica, dei valori assegnati alle singole componenti, per cui se una facciata di edificio ad esempio si trova classificata come MEDIA dispersione, ma il suo valore si trova al limite tra MEDIO e ALTO, questa facciata non è nella stessa condizione di una classificata come MEDIA, il cui valore si trova tra MEDIA e BASSA. Si potrebbe risolvere questo problema, aumentando il numero delle classi, ma un numero troppo elevato di classi, rischierebbe di far perdere l'attenzione e soprattutto sarebbe di minor impatto sui soggetti direttamente interessati nella consultazione, rischiando di far venir meno l'obiettivo prefissato di strumento di sensibilizzazione dei cittadini alla problematica del contenimento energetico. È per questo motivo, per ovviare a questi problemi che si è deciso di inserire in tabella anche i singoli valori delle componenti delle facciate. Inoltre in questo modo il risultato finale, risulterà più veritiero e meno approssimativo della realtà.

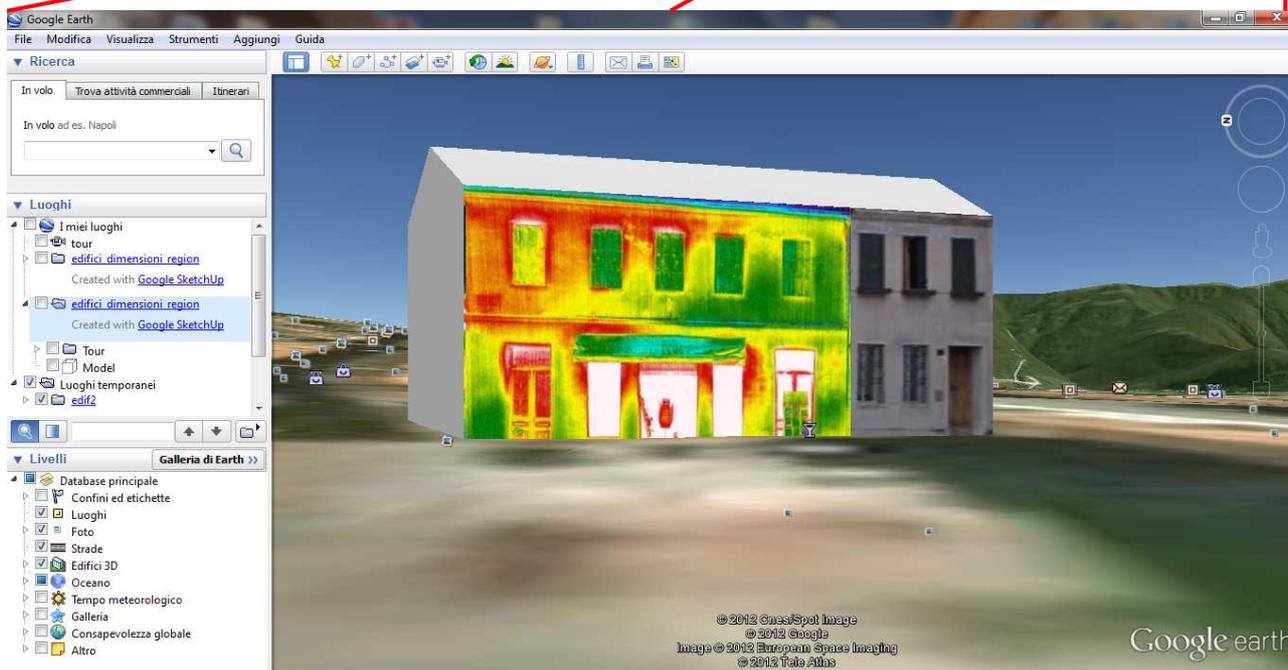
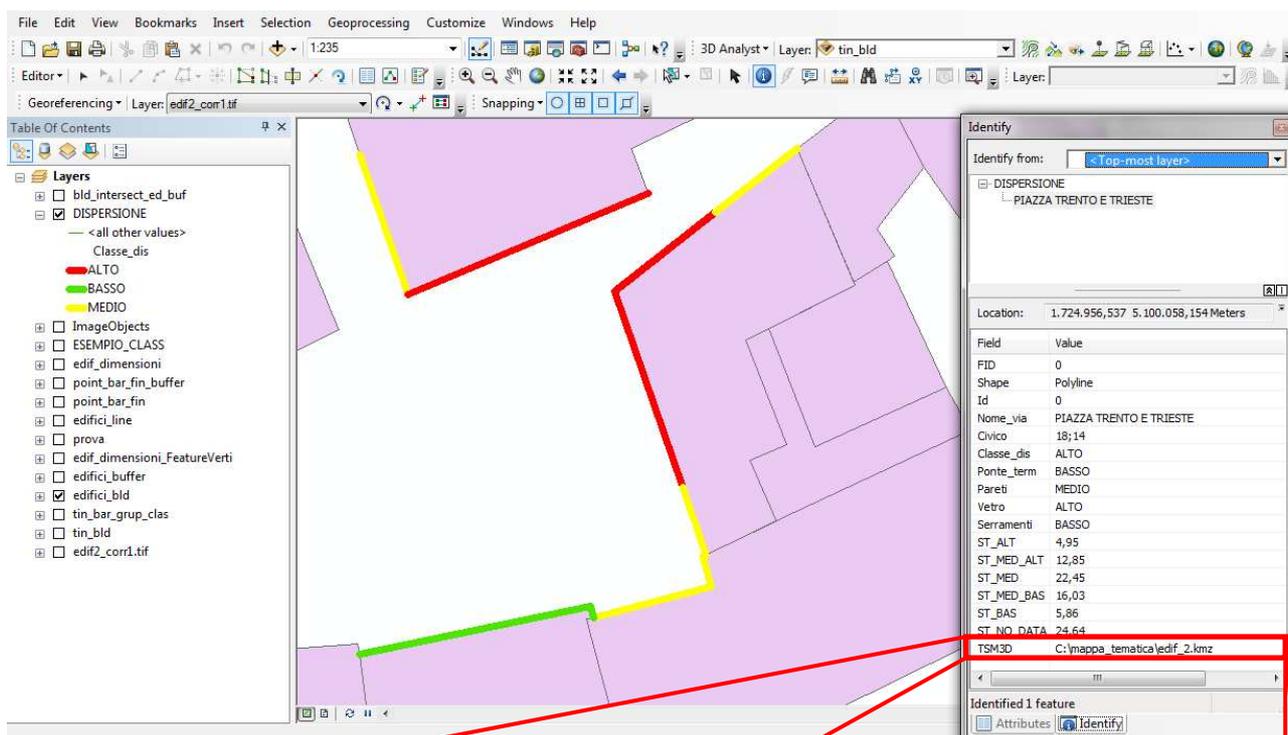


Figura 73: tabella associata alla geometria contenente i valori di dispersione dei singoli elementi costituenti la facciata dell'edificio e le superfici delle varie classi desunte da classificazione ad oggetti dell'immagine termografica. Inoltre si evidenzia l'assegnazione del percorso per il riferimento al modello termografico 3D. Nel esempio viene assegnato un percorso in locale, ma in ambito web, vi è la possibilità di assegnare un indirizzo URL

7.1.6. Modellazione 3D

A questo punto per la conclusione del processo di elaborazioni, si passa al procedimento di modellazione dei dati desunti da rilevamento LIDAR avionico, partendo dai punti xyz. Di seguito verranno descritte le varie procedure effettuate per la creazione di un modello 3D dell'area urbana in questione.

Le procedure di modellazione 3D si possono raggruppare in due parti:

- Procedure di elaborazione 2D degli edifici e degli scheletri delle coperture e assegnazione di attributi geometrici quali quote e altezze indispensabili per la successiva modellazione 3D
- Procedure di modellazione 3D

Procedure di elaborazione 2D

Partendo dai punti LIDAR, già divisi per coperture e terreno, dopo essere stati convertiti da .las a .shp, è stato creato il TIN delle coperture e successivamente delineati i contorni degli isolati.

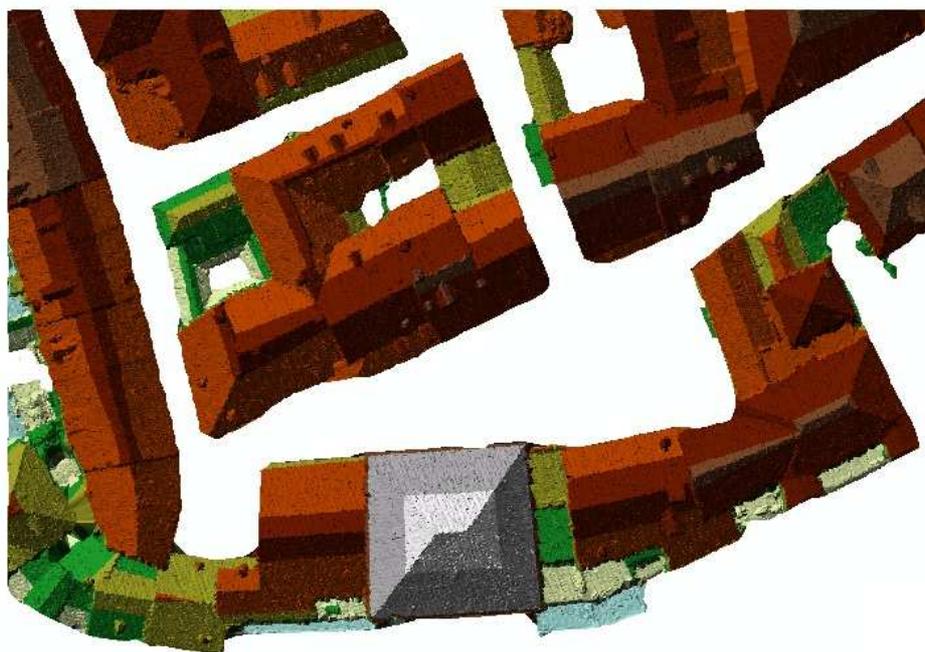


Figura 74: generazione TIN e perimetrazione dell'isolato

Il TIN è stato successivamente convertito in triangoli vector, con associata una tabella contenente i campi con le caratteristiche del TIN.

OID *	Shape *	Slope Deg	Aspect	Hillshade	Tri Index	Shape Length	Shape Area
1	Polygon Z	36,257114	154,222369	150	106856	4,937293	0,111
2	Polygon Z	27,049196	156,133056	170	138039	1,500899	0,0484
3	Polygon Z	23,23378	160,078044	178	22600	1,259395	0,0513
4	Polygon Z	16,679779	156,600303	190	140550	0,72652	0,01345
5	Polygon Z	63,613771	119,741295	90	140551	0,208489	0,0012
6	Polygon Z	43,24341	21,429196	218	140552	0,252878	0,0016
7	Polygon Z	26,333551	118,232541	170	140541	0,642367	0,0141
8	Polygon Z	25,967956	160,817888	173	140538	1,010612	0,0475
9	Polygon Z	7,023927	151,158119	207	140542	0,794671	0,0185
10	Polygon Z	18,625268	172,437249	190	141463	1,006254	0,0473
11	Polygon Z	20,716413	140,290449	180	141435	0,912822	0,0385
12	Polygon Z	14,571702	137,534245	192	140539	0,570815	0,01225
13	Polygon Z	23,942026	158,650687	177	140546	0,853283	0,0266
14	Polygon Z	37,242676	127,871798	145	140543	0,731422	0,01425
15	Polygon Z	25,240752	98,112618	178	140549	0,31195	0,00225
16	Polygon Z	32,312361	161,569214	161	140561	0,393901	0,00525
17	Polygon Z	27,257603	236,32338	216	140566	0,401664	0,0049
18	Polygon Z	23,616234	145,600922	175	140563	0,79812	0,0255
19	Polygon Z	23,612266	145,591681	175	140560	0,952912	0,0427
20	Polygon Z	23,325809	161,565051	179	140562	0,791203	0,0231
21	Polygon Z	27,540189	173,566559	175	140559	0,685893	0,02055
22	Polygon Z	46,998502	133,776219	123	140554	0,342432	0,00155
23	Polygon Z	21,01327	229,423392	214	140557	0,301281	0,0024
24	Polygon Z	22,840787	205,964824	199	140558	0,353401	0,00515
25	Polygon Z	16,288513	148,392498	190	22595	1,099708	0,03135

Figura 75: tabella associata al TIN desunto da punti LIDAR

A questo punto si passa ad una prima fase di segmentazione, uno sfoltimento dei dati che viene eseguita sulla base di due proprietà del TIN, pendenza e perimetro.

pendenza: in questo caso vengono eliminati tutti i triangoli il cui piano di appartenenza

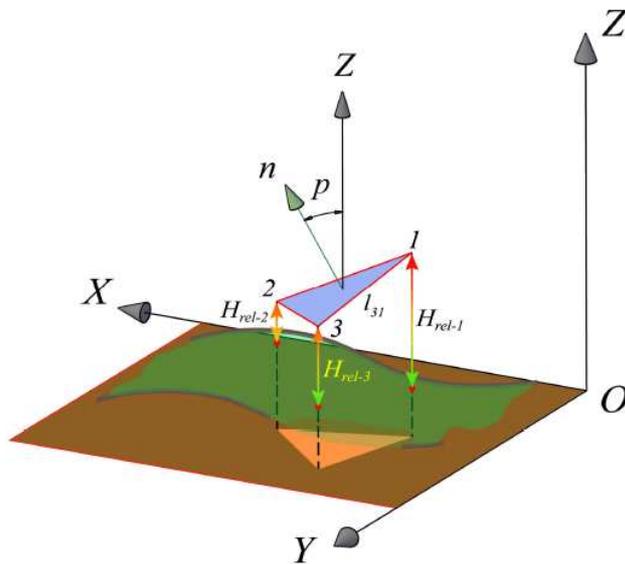


Figura 76: parametri di segmentazione del generico triangolo del TIN

formi, con il piano orizzontale, un angolo p superiore ad una soglia prestabilita, nel nostro caso è stato scelta una soglia limite con pendenze minore a 15° e superiori a 70° . Tale filtro è stato utile per eliminare piccoli comignoli e antenne, inoltre in questo modo si è iniziata ad avere una prima segmentazione tra i vari edifici, in quanto per differenze di altezze sopra una certa soglia tra le coperture di edifici adiacenti, i triangoli che si

formano tra di essi, vengono eliminati (come da figura sottostante).

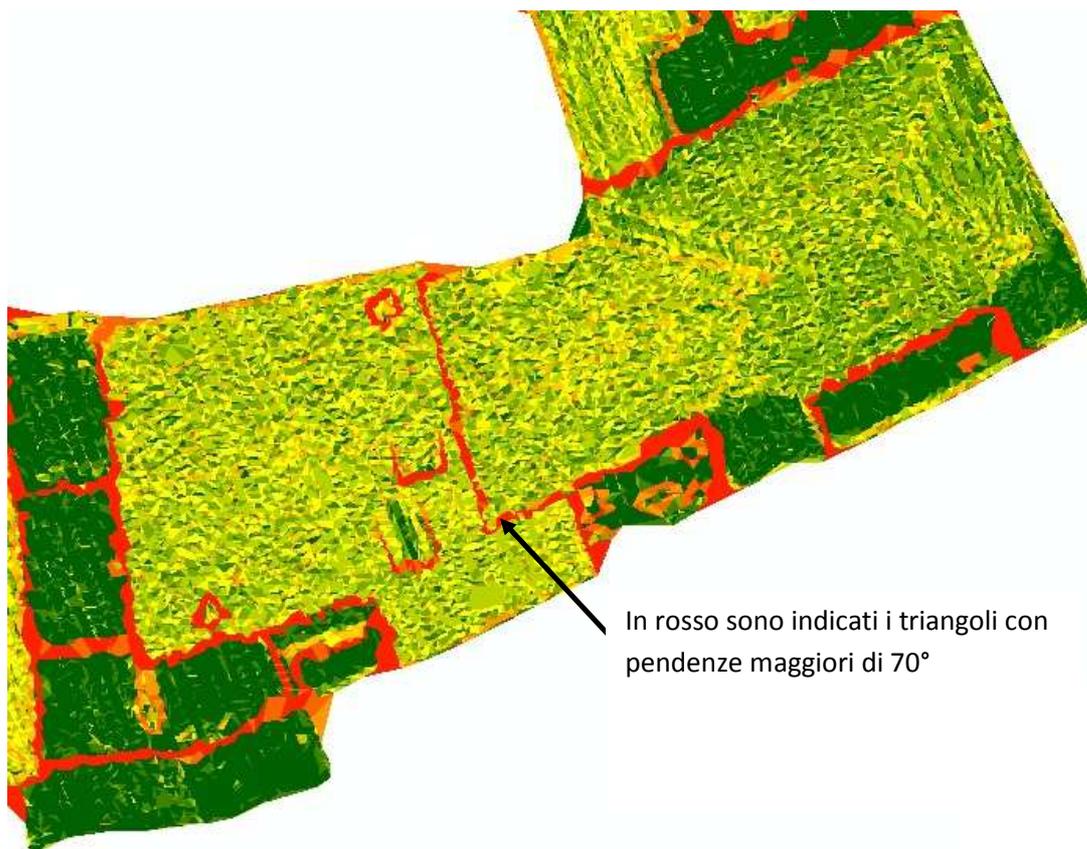


Figura 77: primo sfooltimento basato sulla pendenza

Perimetro: in questo caso vengono eliminati i triangoli con un perimetro superiore ad una certa soglia. In questo caso occorre fare molta attenzione al valore scelto. In questo caso vengono eliminati i triangoli che nella precedente fase di delineazione del TIN non erano stati eliminati, come ad esempio le corti degli edifici, inoltre in questo medio viene eseguito



Figura 78: a sinistra visualizzazione 3D dopo il processo di delineazione del TIN desunto da punti LIDAR, a destra visualizzazione 3D dopo il primo processo di elaborazione

un ulteriore sfooltimento dei triangoli per la definizione dei singoli edifici

Ora si eseguirà una procedura di raggruppamento dei triangoli sulla base delle adiacenze, per la classificazione degli edifici in gruppi tramite comandi di aggregazione, verranno eliminati successivamente i gruppi con una superficie inferiore ad un certa soglia, che potrebbero rappresentare residui di vegetazione, oppure residui di porzioni di superfici piane che precedentemente non erano state completamente eliminate. Ad ogni gruppo verrà assegnato un numero identificativo e verrà comunque creato un nuovo shape file

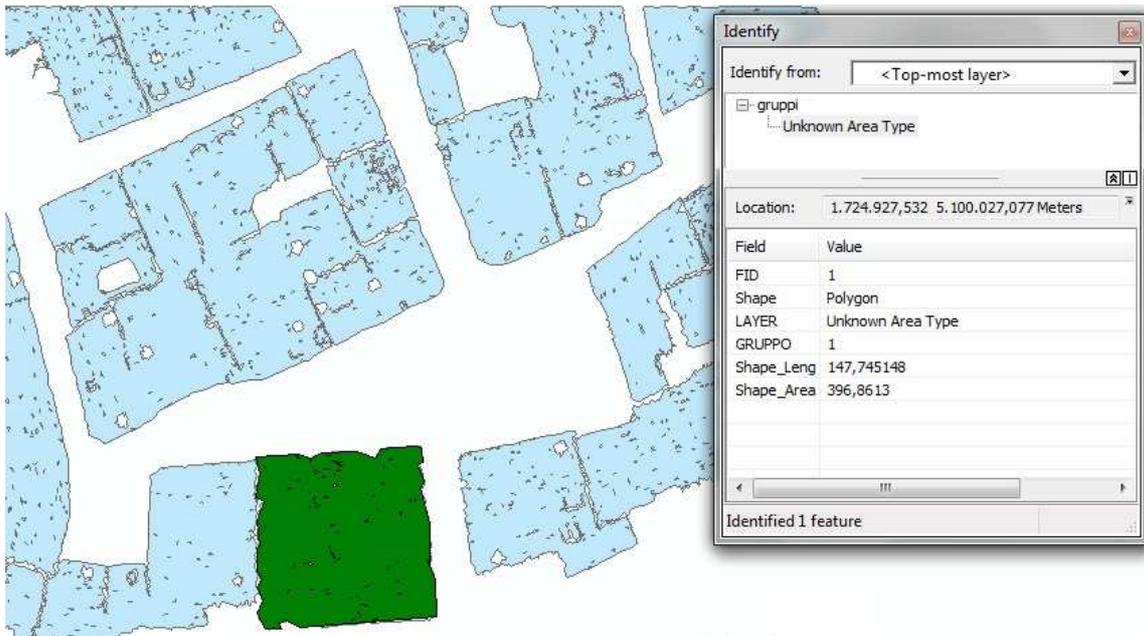


Figura 79: suddivisione in gruppi

Tramite una join spaziale verrà associato ad ogni triangolo il gruppo spazialmente coincidente e verranno eliminati i triangoli con valore del gruppo pari a "NULL"

Si procederà ad una classificazione sulla base degli *aspect* (orientamento) per ogni gruppo, impiegando l'algoritmo di classificazione Natural break o algoritmo delle interruzioni naturali, questo metodo (jeank's) utilizza un algoritmo per minimizzare la somma della varianza interna a ciascuna classe. Le sue caratteristiche sono quelle di:

- Minimizzare le differenze interne alle classi
- Enfatizzare le differenze tra le classi

In questo modo ad ogni triangolo sarà associato il gruppo di appartenenza e la classe di orientamento.

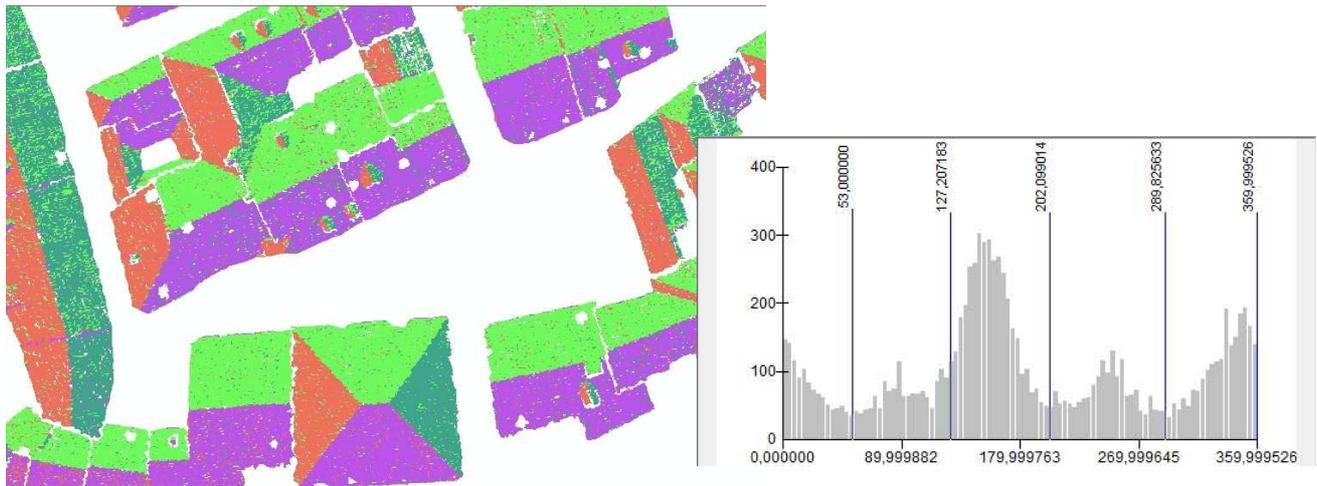


Figura 80: risultato della classificazione e grafico associato

Verranno ora calcolati i baricentri dei singoli triangoli e generato un nuovo TIN sulla base dei nuovi punti *TIN_bar*.

Si procederà inoltre ad un nuovo filtraggio dei dati sulla base:

perimetro: vengono eliminati i triangoli con un perimetro inferiore alla metà della soglia precedentemente impiegata per il primo filtraggio

pendenza: si utilizzerà la stessa soglia impiegata precedentemente per il filtraggio dei dati

area: verranno filtrati i triangoli del *TIN_bar* la cui area è superiore ad una soglia calcolata con la seguente formula:

$$a_{tol} = \frac{\sum a_i}{n} + 3\sigma$$

Dove:

atol: area limite

a_i: area del *i*-esimo triangolo del *TIN_bar*

n: numero totale dei triangoli

σ : scarto quadratico medio delle aree del *TIN_bar*

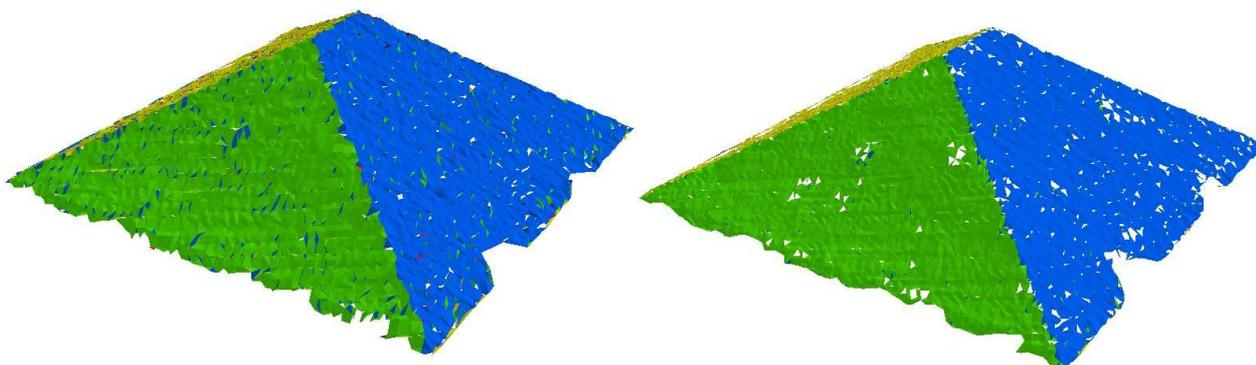


Figura 81: differenza tra la e la seconda fase di filtraggio

Verrà eseguito successivamente un *dissolve* per classi di esposizione e per gruppi ed eliminazione di triangoli rimasti fuori dalla procedura di dissolve con una superficie inferiore ad una certa soglia. Come risultato finale si avranno dei poligoni rappresentanti le varie falde delle coperture, che dovranno successivamente essere corretti tramite operazioni di generalizzazione e semplificazione dei poligoni.



Figura 82: risultato a seguito delle operazioni di dissolve e classificati per gruppi

Per fare ciò si potrebbero impiegare due tecniche:

- La prima, (che è stata sperimentata nel caso specifico) prevede una rasterizzazione del dato contenente i poligoni suddivisi in gruppi di edifici e a loro volta suddivisi in classi di esposizione. Una volta rasterizzati i poligoni, questi vengono sottoposti ad un processo di generalizzazione, tramite il comando *Boundary Clean*, che consiste

in operazioni di *smoothes* (levigazione) del confine delle varie zone. Successivamente il risultato viene riesportato in formato vettoriale (polygon) per poi subire ulteriori processi di generalizzazione e di semplificazione delle geometrie. Si è notato che in presenza di coperture classiche semplici come coperture a padiglione o a due falde, il risultato finale risulta abbastanza veritiero, al contrario in presenza di coperture complesse si è dovuto intervenire manualmente, in quanto il risultato finale si discostava dalla realtà

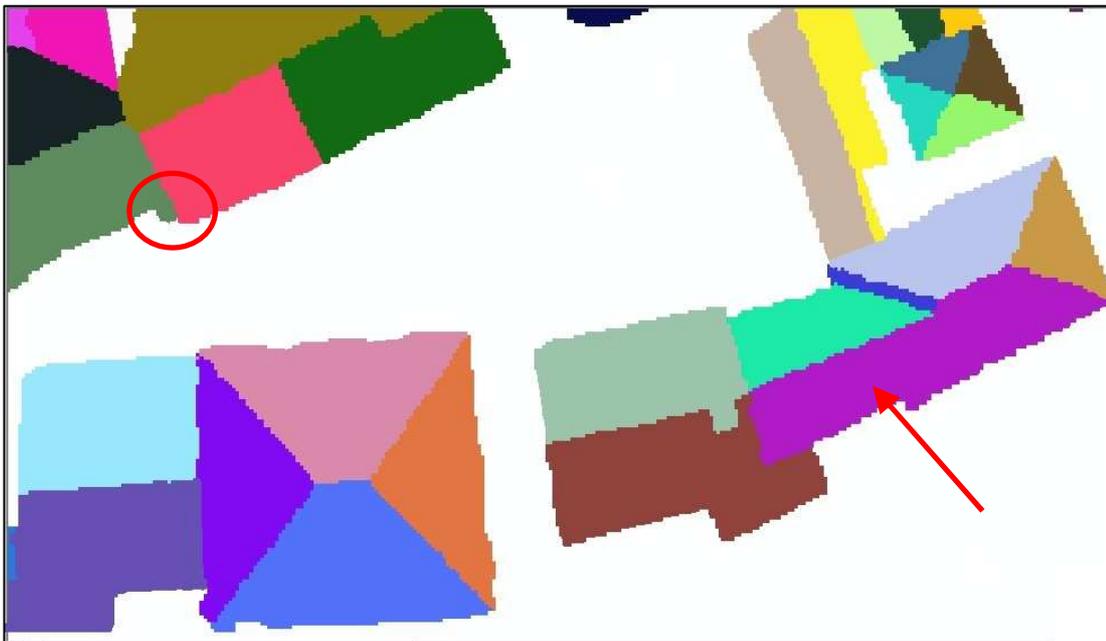


Figura 83: risultato del processo di rasterizzazione e successivo smoothes

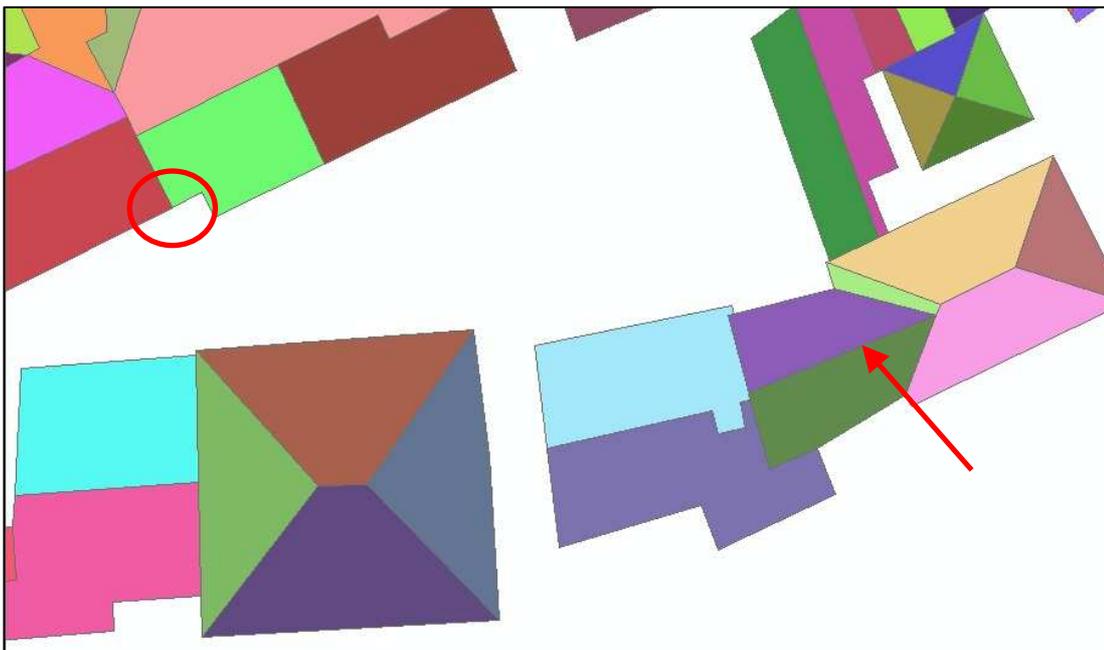


Figura 84: risultato finale del processo di elaborazione, in rosso sono indicate le incongruenze

-
- Il secondo punto è frutto di alcuni concetti desunti da una pubblicazione di S. Troisi, M. Rizzardi ed altri sulla modellazione automatica di edifici dei dati LIDAR e, prevede l'assegnazione ad ogni falda del valore di pendenza, calcolata facendo la media dei triangoli appartenenti ad uno specifico gruppo di edificio e di esposizione. Sulla base di questa, vengono creati dei piani, e dall'intersezione di questi piani, vengono create le linee di compluvio e displuvio. Ora occorrerebbe sovrapporre le linee di compluvio e displuvio con il perimetro dei vari gruppi, e procedere ad un controllo topologico per far coincidere i vertici dei perimetri dei gruppi con il limite delle linee di compluvio e displuvio ed infine convertire infine il tutto in poligoni.

Una volta trattati definitivamente i poligoni ed individuate le falde di ogni singolo edificio, occorrerà assegnare degli attributi geometrici ai singoli poligoni, per questo motivo si esporta il *TIN_bar* già sfoltito e raggruppato per gruppi di edifici e classi di esposizione, in punti 3D (non vengono impiegati i punti originali desunti da LIDAR in quanto la presenza di comignoli e antenne potrebbe generare valori non congrui con le nostre finalità) verrà eseguita una join spaziale tra i poligoni e i punti delle coperture del *TIN_bar* e del terreno in modo da assegnare ad ogni poligono il valore della quota massima, minima e media. Per eseguire la join spaziale, viene preventivamente eseguito un buffer di qualche decina di centimetri dal perimetro esterno degli edifici (classificati come oggetti), per eliminare i punti a margine degli edifici, in modo da evitare che punti appartenenti ad un edificio, si sovrappongano ad un altro.

Infine vengono create tre colonne nella tabella attributi, contenete il valore delle altezze delle facciate calcolate sottraendo la quota della linea di gronda alla quota massima e minima del terreno, e la differenza tra quota massima di gronda e quota minima. Questi dati saranno utili nella successiva fase di elaborazione 3D. Verrà inoltre eseguito un controllo sulle altezze delle facciate, e sui dislivelli delle coperture inserendo una soglia minima, per valutare eventuali anomalie.

FID	Shape	FID 1	gruppo	Avo ELEVAT	Min ELEVAT	Max ELEVAT	Avg Z Grou	Min Z Grou	Max Z grou	Hmaz	Hmin	disliv
3	Polygon ZM	3	0	282,422052	290,410004	296,359985	270,775697	267,98999	273,399994	22,42	17,01	5,95
4	Polygon ZM	4	1	283,511926	282,459991	284,809998	270,884306	270,190002	272,929993	12,27	9,53	2,35
5	Polygon ZM	5	1	283,457405	282,440002	284,73999	270,884306	270,190002	272,929993	12,25	9,51	2,3
6	Polygon ZM	6	1	284,094736	282,459991	285,570007	270,884306	270,190002	272,929993	12,27	9,53	3,11
7	Polygon ZM	7	1	284,035193	282,660004	285,559998	270,884306	270,190002	272,929993	12,47	9,73	2,9
8	Polygon ZM	8	1	284,825677	283,130005	286,130005	270,884306	270,190002	272,929993	12,94	10,2	3
9	Polygon ZM	9	1	284,773646	282,760001	286,149994	270,884306	270,190002	272,929993	12,57	9,83	3,39
10	Polygon ZM	10	2	280,794706	279,75	282,329987	269,676569	268,119995	271,609985	11,63	8,14	2,58
11	Polygon ZM	11	2	282,252	280	284,369995	269,676569	268,119995	271,609985	11,88	8,39	4,37
12	Polygon ZM	12	2	280,927767	279,910004	282,980011	269,676569	268,119995	271,609985	11,79	8,3	3,07
13	Polygon ZM	13	2	283,610864	281,160004	286,070007	269,676569	268,119995	271,609985	13,04	9,55	4,91
14	Polygon ZM	14	2	283,763221	281,589996	286,029999	269,676569	268,119995	271,609985	13,47	9,98	4,44
15	Polygon ZM	15	4	284,470672	281,940002	287,119995	272,7825	267,940002	274,089996	14	7,85	5,18
16	Polygon ZM	16	4	284,94227	283,100006	287,220001	272,7825	267,940002	274,089996	15,16	9,01	4,12
17	Polygon ZM	17	5	282,655176	281,820007	283,540009	274,266541	274,070007	274,790009	7,75	7,03	1,72
18	Polygon ZM	18	5	282,629788	280,73999	283,549988	274,266541	274,070007	274,790009	6,67	5,95	2,81

Figura 85: tabella associata ai poligoni degli edifici, contenete quote massime minime e medie delle coperture e del terreno ed altezze degli edifici e dislivello delle coperture

Procedure di modellazione 3D:

Una volta generato uno .shp delle coperture con associati tutti i valori di altezze si procederà alla modellazione 3D.

Per le nostre finalità risulterebbe sufficiente una modellazione basata sull'estrusione di ogni edificio sulla linea di gronda, in quanto le immagini termografiche risultano riferite alle sole facciate e non alle coperture. In questo caso tramite il software ArcScene, si avrebbe la possibilità di generare in automatico un city model, partendo dai vari poligoni degli edifici. Nell'esempio viene rappresentato il processo che porta a questo primo risultato. Vengono raggruppati i singoli edifici sulla base dell'identificativo del gruppo di edificio, successivamente viene assegnata la quota del terreno a cui il modello dovrà riferirsi ed infine verrà assegnata il valore della linea di gronda precedentemente calcolata e sulla base di questa il modello verrà estruso.

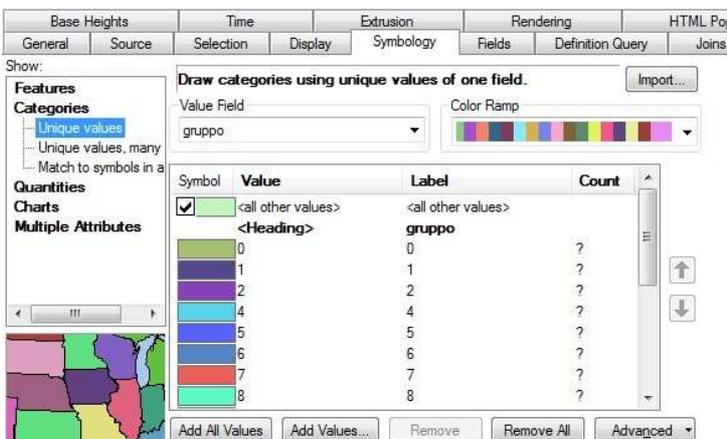


Figura 86: classificazione sulla base dell'identificativo del gruppo di edificio

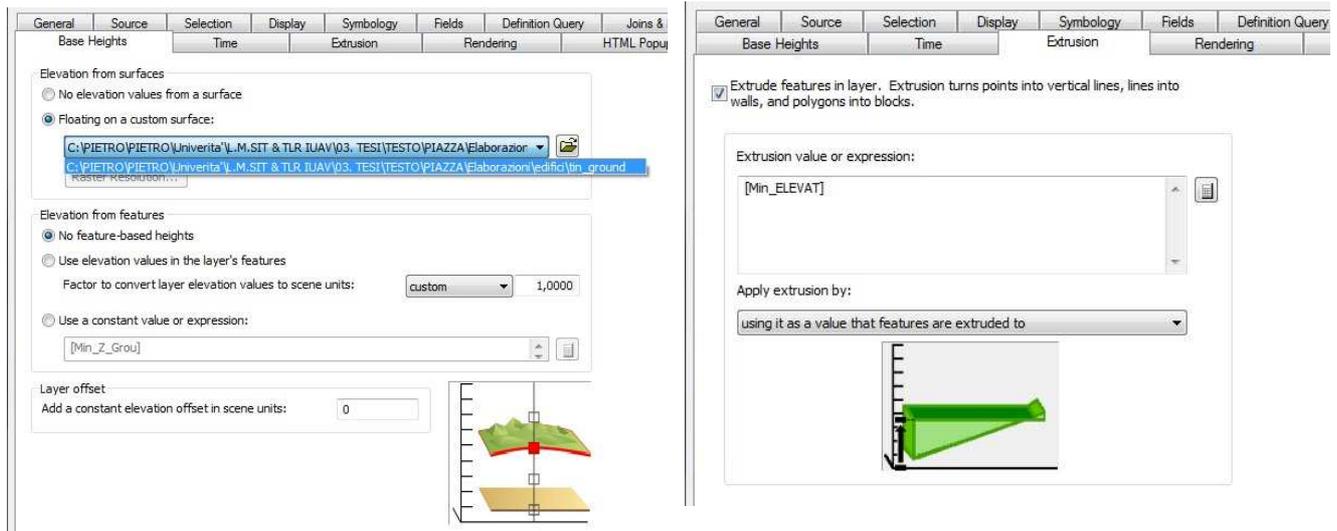


Figura 88: assegnazione della base degli edifici per l'estrusione, la base viene spalmata sul TIN del terreno generato da LIDAR (TIN_ground)

Figura 88: assegnazione del valore della linea di gronda, per individuazione del limite massimo di estrusione dello shape degli edifici

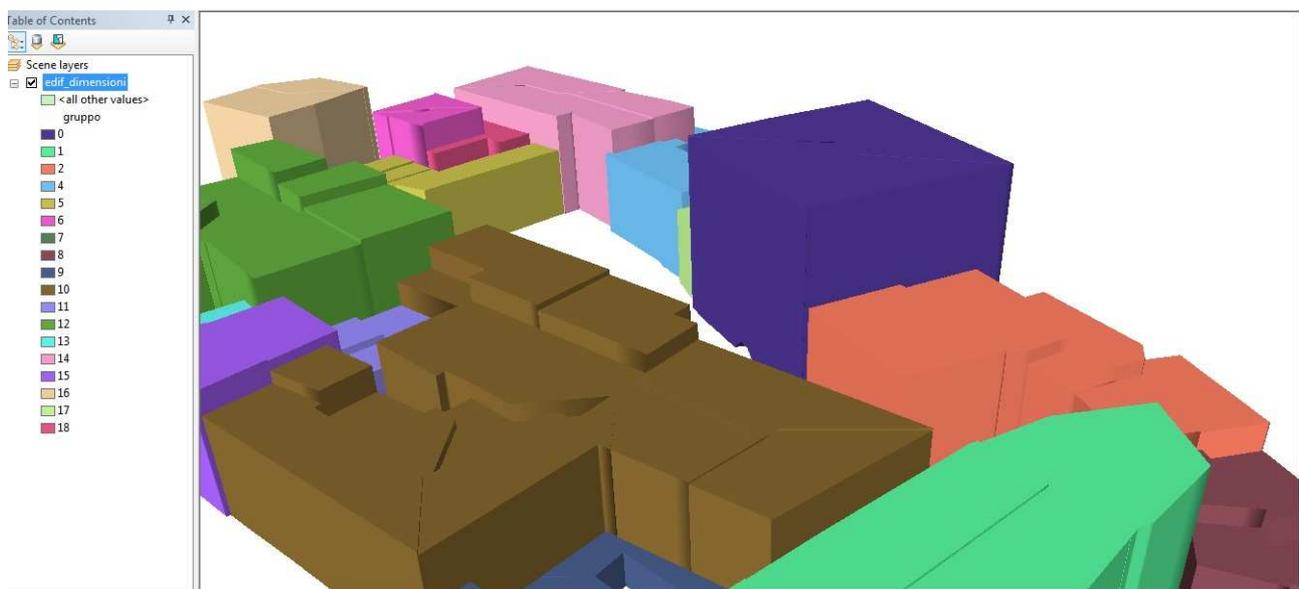


Figura 89: risultato finale del processo di elaborazione 3D sulla linea di gronda

A questo punto è possibile tramite comandi di conversione dei dati esportare gli shape con associato il valore di altezza (ed estrusi tramite ARCSce in modello 3D), in geometrie 3D, in particolare si esegue tramite il comando → Layer 3D To Feature Class da 3D Analyst toolbox la conversione in Multipatch feature. Ora il 3D Multipatch, viene convertito a COLLADA, che è un formato in grado di essere importato in Google SketchUp → Multipatch To COLLADA, un tool all'interno di Conversion Toolbox

In previsione di un futuro sviluppo del modello si propone un'ulteriore metodologia, per il completamento e l'aumento delle informazioni del 3D city model, tramite l'impiego di apposito software di modellazione in questo caso si utilizzerà il programma Google SketchUp 8.

Come prima cosa verrà esportato il file .shp in .dwg. Tramite software CAD, verranno esportati i poligoni 3D in Facce 3D o Regioni.

A questo punto le Facce 3D delle coperture verranno importate in Google SketchUp 8.

La modellazione avverrà estrudendo le Facce 3D, utilizzando i valori calcolati nella tabella finale associata ai poligoni delle coperture.

Di volta in volta verrà valutato il valore di altezza dell'edificio da impiegare per la prima estrusione, in modo da formare una copertura piana, successivamente si ripasserà alla modellazione del colmo del edificio utilizzando il valore del dislivello tra gronda e colmo della copertura. Si è notato che durante la modellazione 3D, in presenza di coperture piuttosto complesse, i dati calcolati nello .shp definitivo delle coperture non sono sufficienti, in questo caso occorrerà impiegare altri strumenti per la modellazione tridimensionale oltre al semplice comando di estrusione.

Dopo aver generato i modelli 3D, verranno associate alle facciate dei fabbricati le relative termografie ed in assenza di queste si assoceranno le immagini delle facciate desunte da Google Street View.

Infine il modello verrà georeferenziato sempre tramite comandi di Google SketchUp, per poter essere sovrapposte direttamente alla cartografia di Google Earth.

Verrà esportato il file in .kmz, in modo da poter essere salvato in una cartella e collegato tramite percorso alla tabella associata alla mappa tematica delle dispersioni.

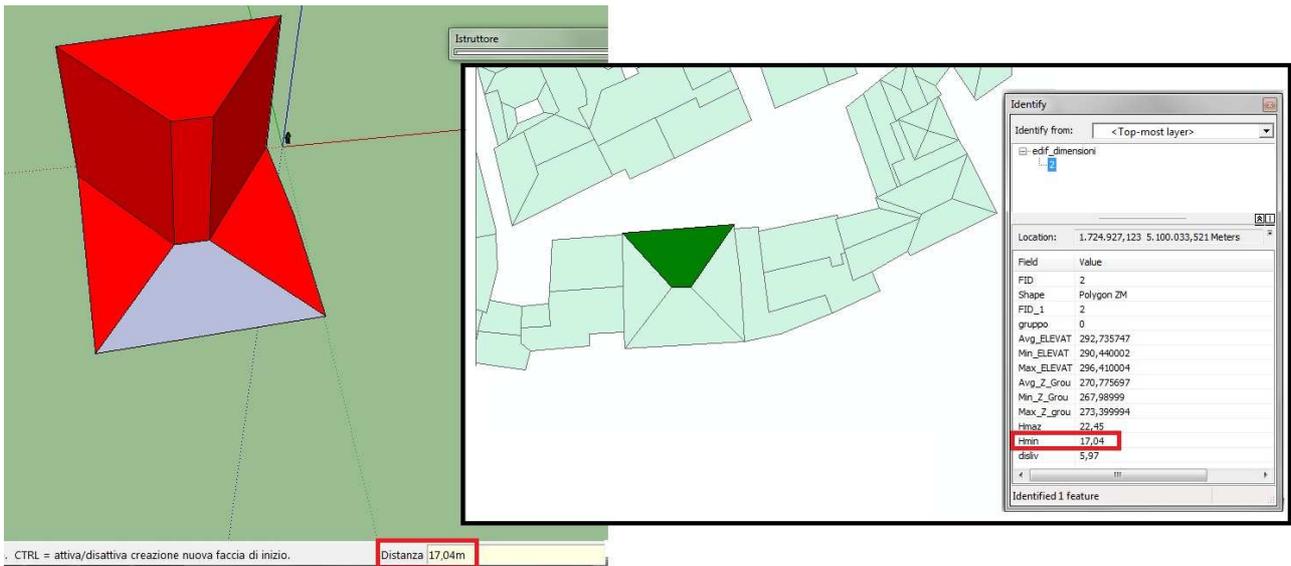


Figura 90: primo passaggio di estrusione delle pareti, utilizzando i valori desunti dallo .shp delle coperture, in rosso sono evidenziati i valori



Figura 91: secondo passaggio di estrusione del colmo, utilizzando i valori desunti dallo .shp delle coperture, in rosso sono evidenziati i valori

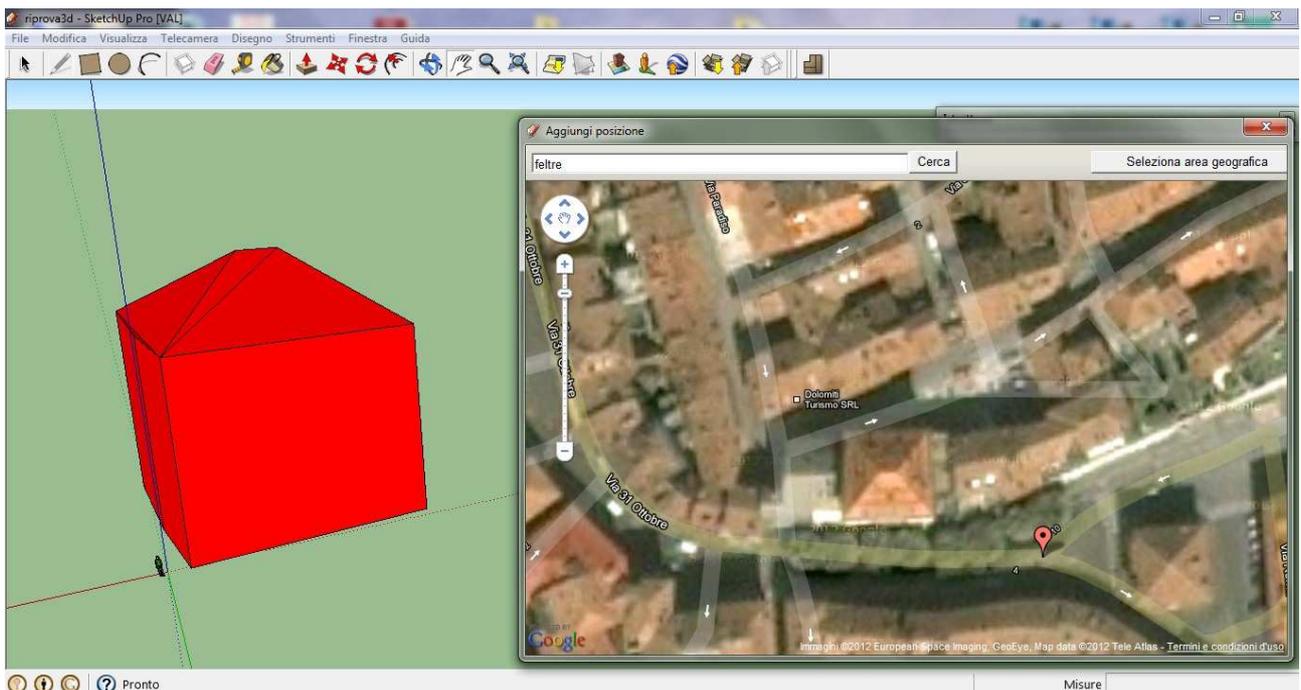


Figura 92: processo di georeferenziazione del modello 3D

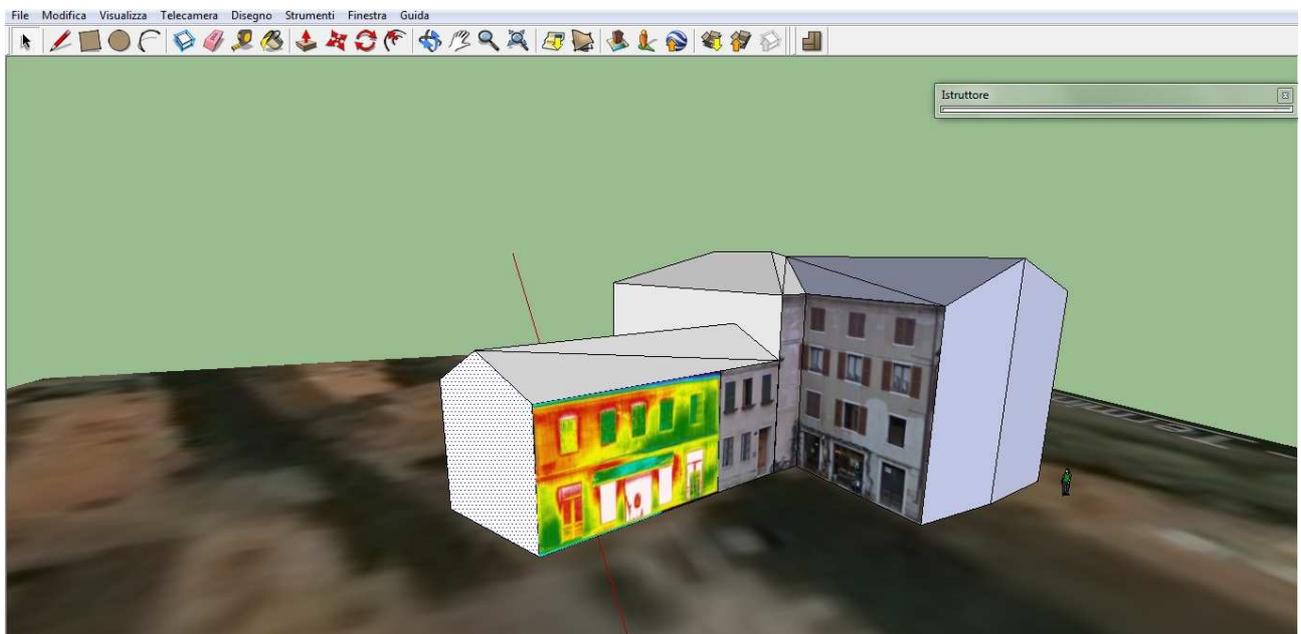


Figura 93: inserimento dell'immagine termografica al modello 3D dei fabbricati

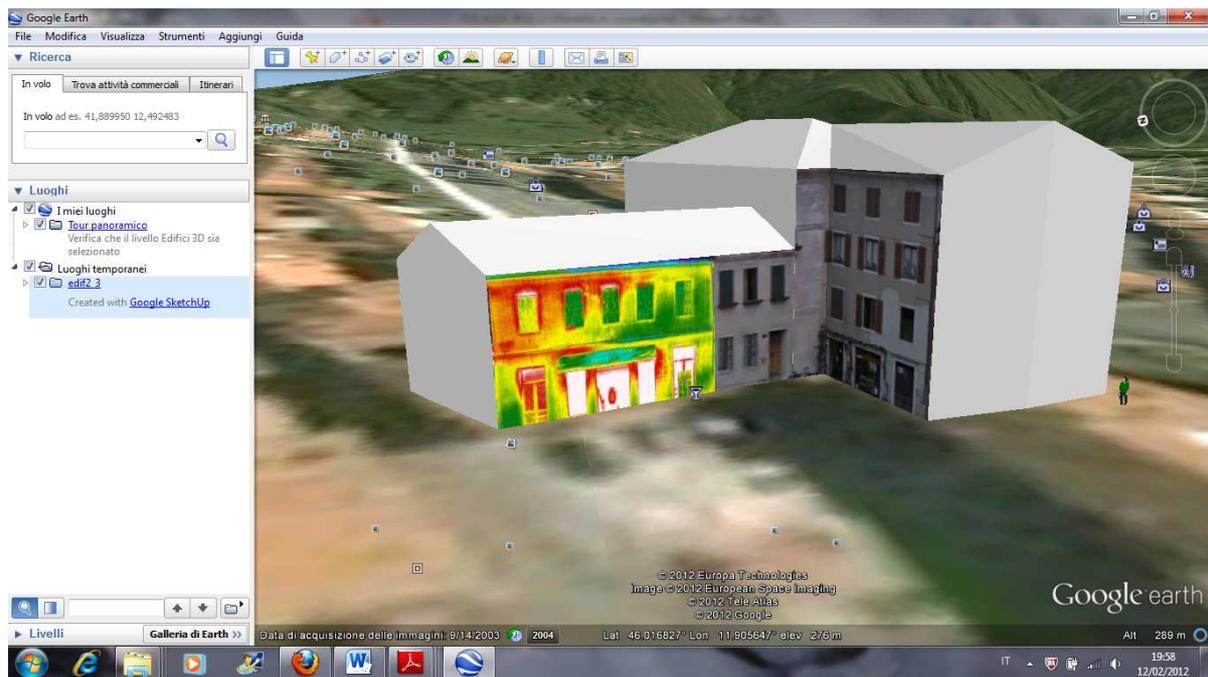


Figura 94: esportazione del modello in .kmz del Thermal City Model e visualizzazione in Google Earth



Figura 95: risultato finale dell'elaborazione 3D con associazione di immagini delle facciate (texture) desunte da Google Street View

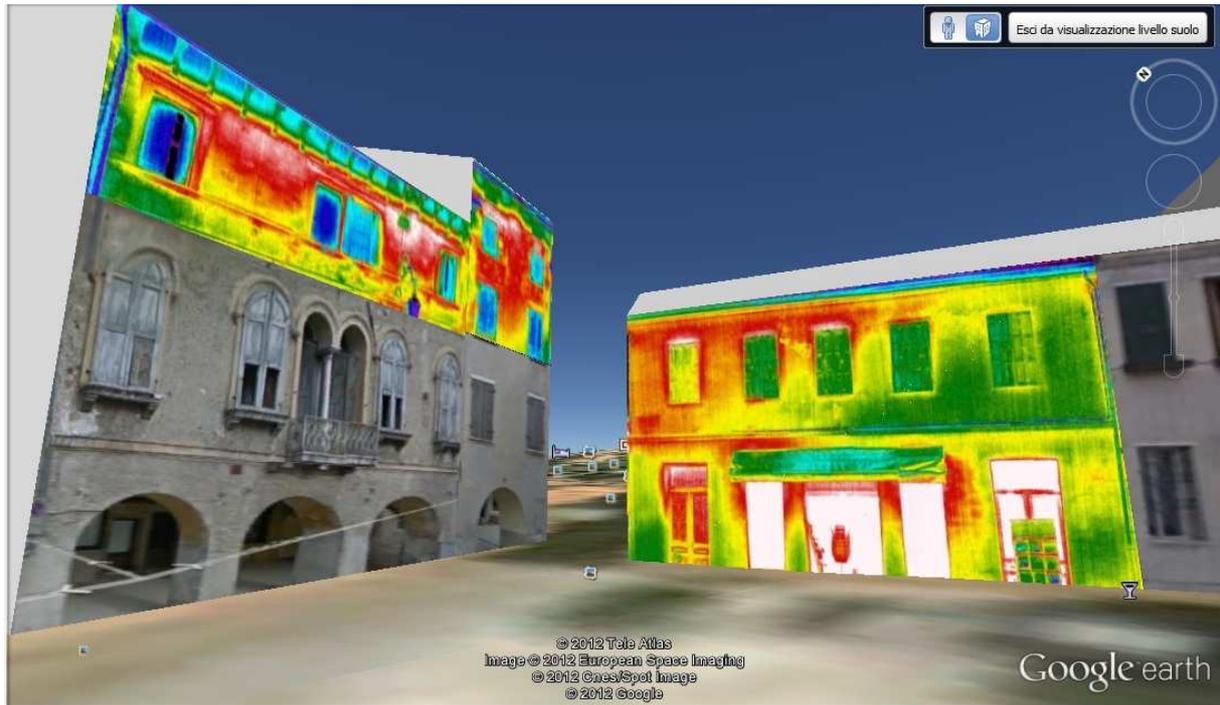


Figura 96: risultato finale della modellazione 3D con associazione di termografie, abbinata a immagini desunte da Google Street View, in assenza di immagini termografiche

8. SVILUPPI FUTURI

Il presente lavoro potrebbe essere la base di partenza per lo sviluppo di lavori futuri, in particolare si possono prevedere:

Analisi completa delle dispersioni dell'involucro edilizio ed integrazione di informazioni connesse alla tematica del contenimento energetico:

sarebbe interessante poter integrare il presente lavoro con delle termografie aree, in modo da avere una copertura totale delle dispersioni energetiche dell'intero involucro. In questo modo si potrebbe avere a livello cartografico una mappa tematica composta da poligoni che rappresenterebbero le coperture e polilinee che starebbero a rappresentare le pareti. I soggetti portatori d'interessi in particolare i titolari degli edifici (cittadini, aziende, enti), avrebbero in questo modo la possibilità di comprenderne a pieno lo stato di isolamento e poter decidere gli interventi da attuare. In particolare per gli interventi bisogna tener conto che nel nostro caso studio siamo in presenza di un centro storico, in cui tutti gli edifici risultano assoggettati alle normative dei beni culturali e del paesaggio, ai regolamenti edilizi, che ne individuano gli interventi possibili e le metodologie per la conservazione, per questo motivo si ritiene che sia fondamentale durante il processo di pubblicità e condivisione, mettere a conoscenza i soggetti portatori di interesse, gli interventi ammissibili e il risparmio stimato che da questi interventi potrebbero giovare. Sarebbe interessante poter associare, oltre i dati quali indirizzo e classe di dispersione, informazioni, sulla base dello stato di dispersione di ogni singolo elemento valutato in fase di classificazione, riguardanti gli interventi consigliati (tenendo conto del contesto in cui l'edificio è inserito, in particolare della zona omogenea o norma particolare che lo strumento urbanistico definisce per quel edificio). Di seguito si riporta uno schema esemplificativo:

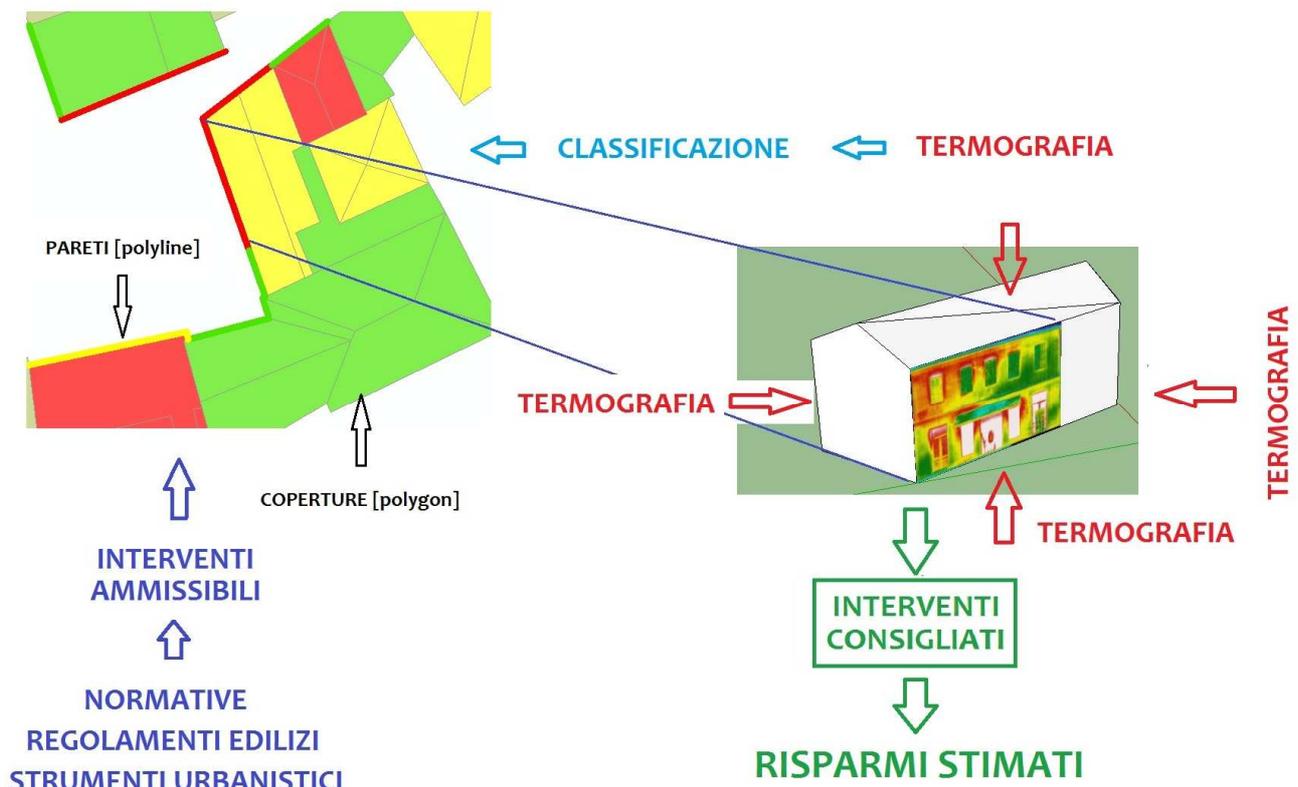


Figura 97: schema rappresentante informazioni gestibili dal sistema di progetto

Approccio metodologico per la generazione di una banca dati per la classificazione energetica degli edifici:

Un altro interessante sviluppo potrebbe essere quello connesso alla certificazione energetica degli edifici, in particolare la progettazione di un sistema per il popolamento, il reperimento e la gestione di informazioni e dati, connesse all'attribuzione della classe energetica così come previsto dal D.lgs. 311/2006.

Verrà di seguito fornita una breve descrizione delle caratteristiche e fattori che influenzano la certificazione energetica, con inserimento delle possibili fonti e tecnologie da cui accedere per il reperimento dei dati e una bozza metodologica per il raggiungimento del risultato.

La certificazione dell'efficienza energetica di un edificio prevede il calcolo del fabbisogno energetico per il riscaldamento invernale, cioè l'energia totale richiesta per mantenere la temperatura ambiente a 20 °C per l'intero periodo di riscaldamento.

Il fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale è l'energia primaria a metro quadrato necessaria per riscaldare un edificio, per un intero anno, in regime di funzionamento continuo, come stabilito dal DLgs 311/06; si misura in kWh/m²anno

L'energia primaria (Q) si calcola dall'energia termica utile (Qh), ovvero l'energia netta necessaria per riscaldare la casa (a meno delle dispersioni impiantistiche e funzione dell'involucro edilizio) aumentata dell'energia dispersa dai sottosistemi impiantistici.

La formula generale che regola il fabbisogno di energia è la seguente.

$$Q_h = (Q_t + Q_v) - \eta (Q_s + Q_i)$$

Dove:

Qh = fabbisogno di energia [MJ]

Qt = dispersioni per trasmissione [MJ]

Qv = dispersioni per ventilazione [MJ]

Qi = apporti interni [MJ]

Qs = apporti solari [MJ]

η = fattore di utilizzazione

} QI: dispersioni
 } Qg: apporti

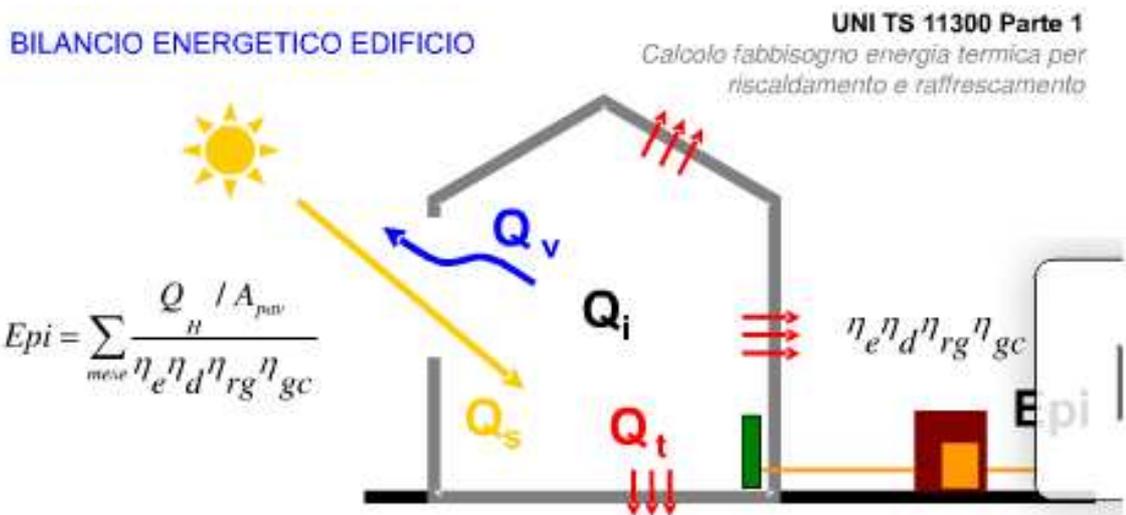


Figura 98: schema che regola il fabbisogno di energia

Le dispersioni QI sono in funzione delle dispersioni per trasmissione Qt che dipendono dall'involucro e delle dispersioni per ventilazione Qv. Entrambe le dispersioni sono in funzione di due coefficienti di dispersioni termica:

$$QI = Q_t + Q_v = (H_t + H_v) \times (T_i - T_e) \times t$$

Dove:

H_t [W/K]: Coefficiente di dispersione termica per trasmissione e dipende dalla superficie disperdente dell'involucro e dalla trasmittanza termica del singolo componente

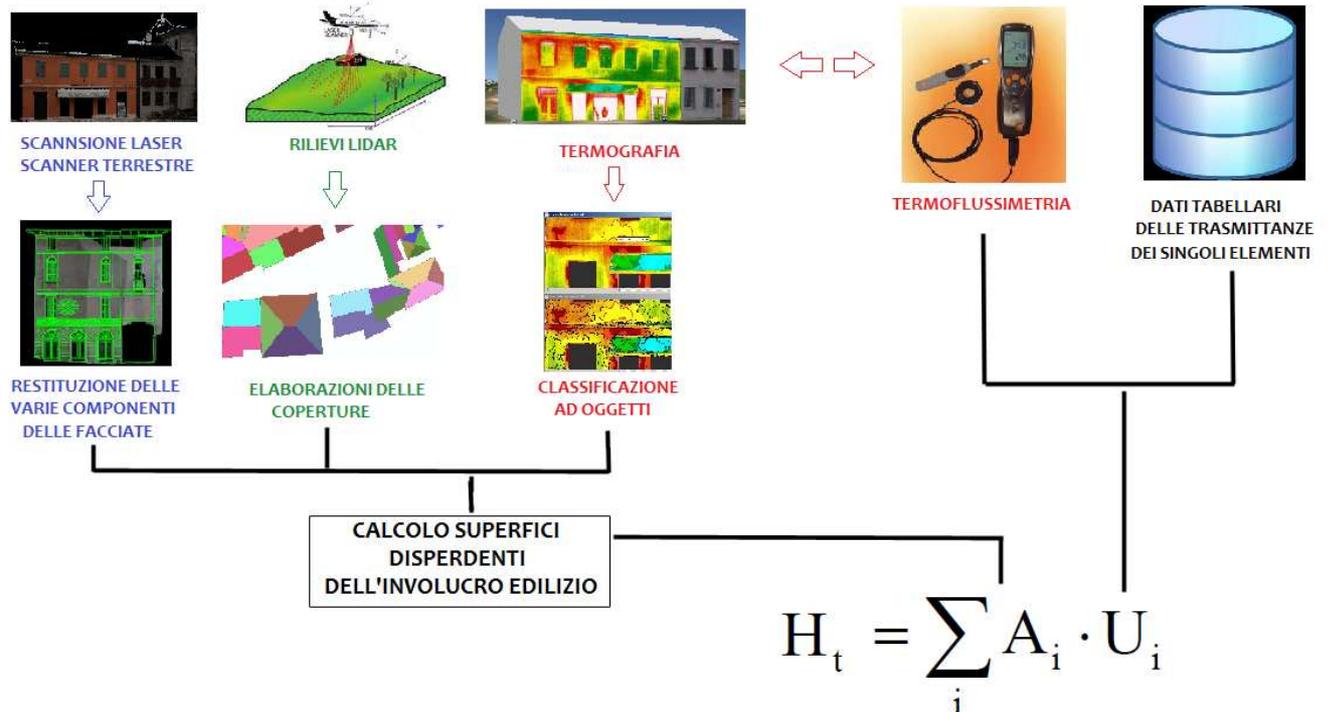


Figura 99: formula per il calcolo del coefficiente di dispersione termica per trasmissione, con indicazione delle fonti informative desumibili per il calcolo con tecniche tradizionali e innovative

Dove:

A_i [m²]= area dell'elemento *i* dell'involucro edilizio in m² (le dimensioni di finestre e porte sono assunte come le dimensioni delle aperture nelle pareti).

Tecnologie e dati: i dati per il calcolo delle superfici disperdenti possono essere desunti da classificazione delle immagini termografiche, da scansioni laser scanner terrestri, e da voli lidar (in particolare per le coperture)

U_i [W/m²K] = trasmittanza termica del componente *i* dell'involucro edilizio

Tecnologie e dati: In questo caso i dati che possono servire per il calcolo di queste componenti possono derivare da termografia accompagnata da rilievi di termoflussimetria per il calcolo della trasmittanza delle pareti, inoltre occorrerà utilizzare dati tabellari delle singole componenti disperdenti (serramenti, superfici trasparenti)

H_v [W/K]: Coefficiente di dispersione termica per ventilazione e dipende dalla portata d'aria e da indici che sono in funzione della destinazione d'uso dei vari locali interni.

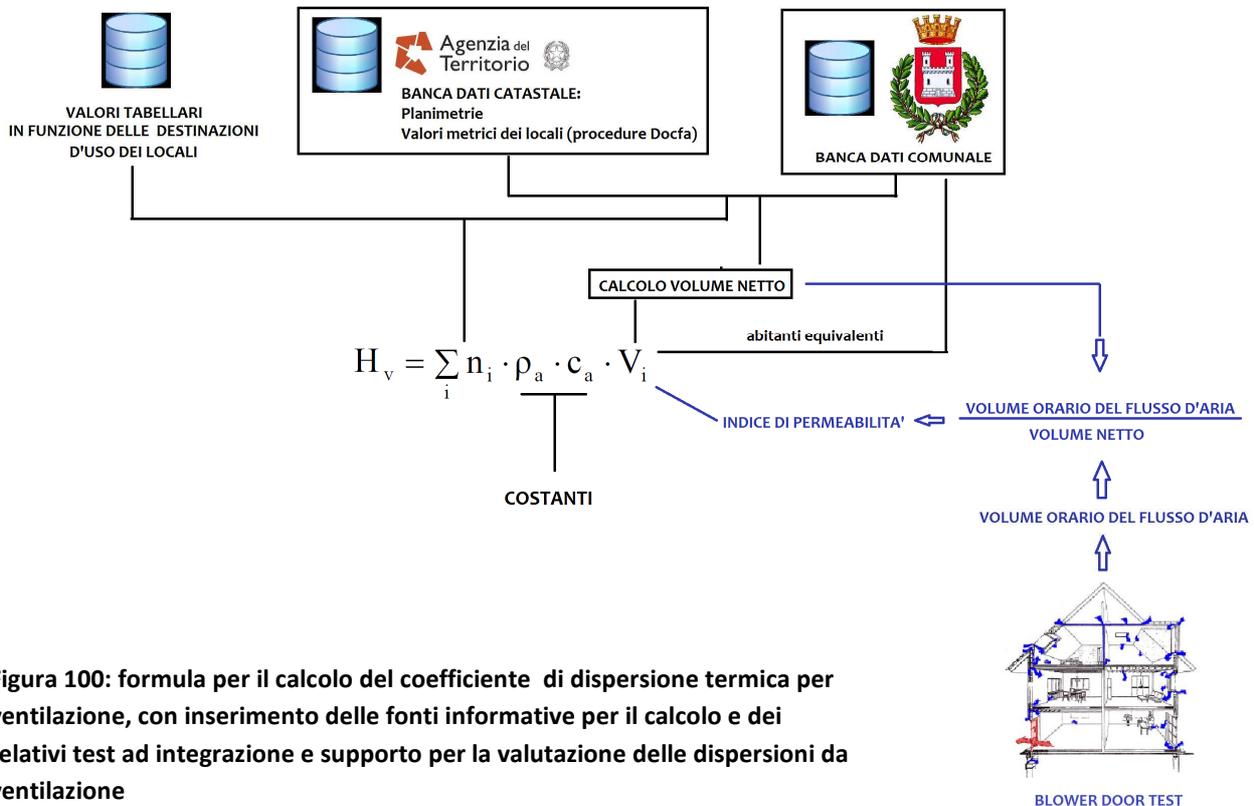


Figura 100: formula per il calcolo del coefficiente di dispersione termica per ventilazione, con inserimento delle fonti informative per il calcolo e dei relativi test ad integrazione e supporto per la valutazione delle dispersioni da ventilazione

Dove:

ρ_a : peso specifico dell' aria (costante)
 c_a : capacità termica specifica dell' aria

$$\rho_a \cdot c_a = 0,33 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$$

n [1/h]: indice di ricambio d' aria

Tecnologie e dati: i valori da assumere dipendono dalla destinazione d'uso dei locali, a cui sono associati valori tabellari. Le destinazioni d'uso e i calcoli metrici utili possono derivare sia dalle banche dati catastali, che dalle banche dati comunali.

V_i : portata d'aria da rinnovo

Tecnologie e dati: dipende dalle superfici utili dei locali, dalle destinazioni d'uso, dal volume utile dell'ambiente riscaldato e dagli abitanti equivalenti. Le fonti informative possono derivare sia da banche dati catastali (planimetria e calcolo delle superfici utili, desunte da archivio prodotto con procedura Docfa), sia da banche dati comunali. È inoltre possibile integrare i dati di cui sopra con valori derivanti da Blower Door Test, il quale ha la

funzione di valutare le dispersioni da “spifferi” dell’edificio, fornendo il volume netto del flusso d’aria da cui si può calcolare l’indice di permeabilità del edificio.

Ti [°C]: è la temperatura interna, di solito si tiene un valore di 20°C

Te [°C]: Temperatura media esterna mensile e dipende dai dati climatici della zona

Tecnologie e dati: esistono delle tabelle contenute i dati mensili necessari, suddivisi per zona climatica

t: tempo inteso come 24 ore

Per il calcolo degli apporti, questi vengono sommati in due categorie:

Qi: Apporti interni, questi dipendono dalla tipologia e potenza dell’impianto di riscaldamento e/o presenza di fonti rinnovabili.

Tecnologie e dati: i dati riguardanti le caratteristiche possono essere reperiti o nelle Banche dati comunali, nel caso di progetti di impianti termici depositati, o da soggetti certificatori, in molti casi, in presenza soprattutto di edifici storici, in cui molto non si hanno pratiche edilizie riguardanti gli impianti di riscaldamento, occorrerà fare dei sopralluoghi al fine di valutare le caratteristiche degli impianti.

Qs: Gli apporti solari dipendono dall’insolazione normalmente disponibile nella località interessata, dall’orientamento della superficie di raccolta, dalla presenza di ombreggiatura, dalla trasmittanza solare, e dalle caratteristiche di assorbimento delle superfici soleggiate.

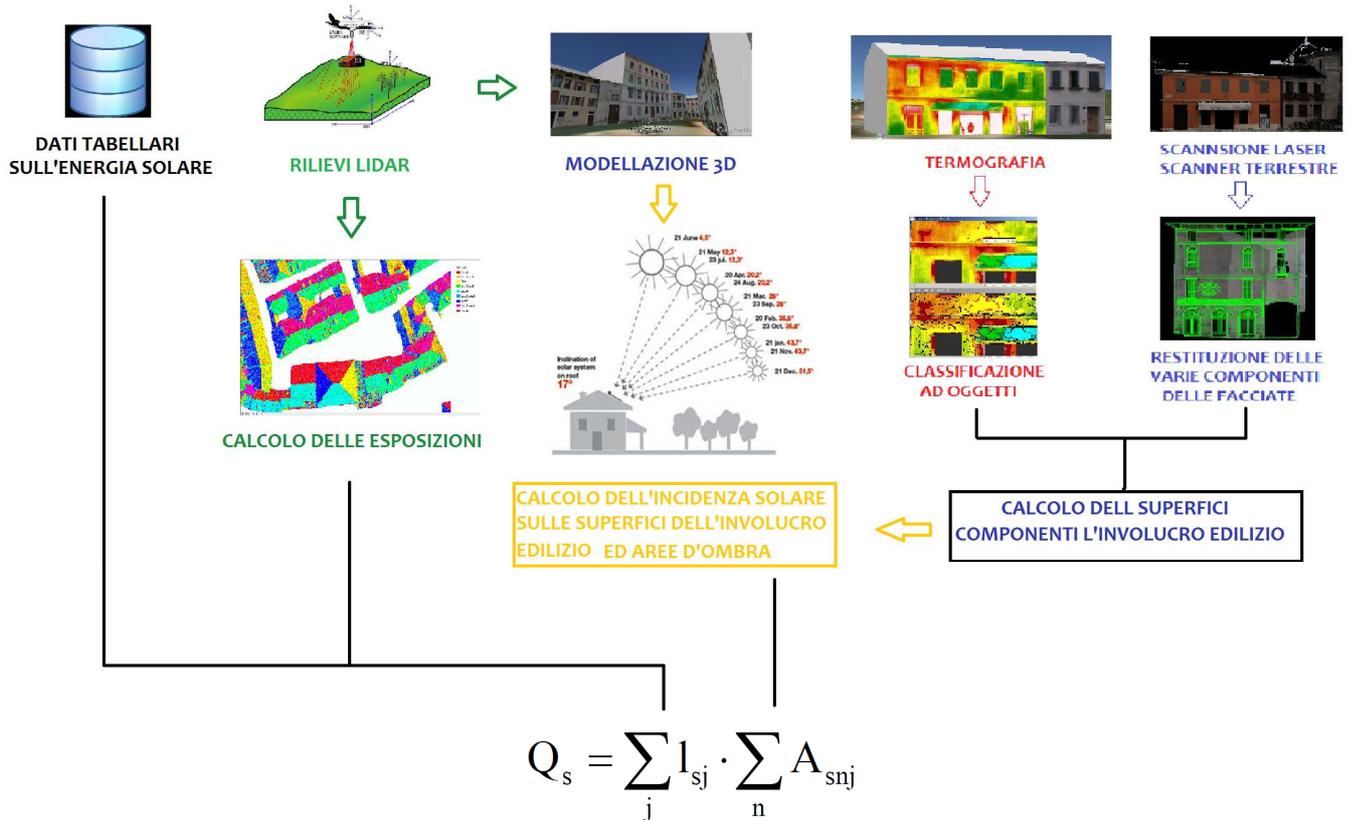


Figura 101: formula per il calcolo degli apporti solari, vengono rappresentati schematicamente le tecnologie e le fonti informative per il calcolo dell'apporto

dove la prima sommatoria è estesa a tutte le esposizioni, j , e la seconda a tutte le superfici, n , esposte alla radiazione solare, e:

I_{sj} [MJ/m²]: energia totale della radiazione solare globale su una superficie unitaria avente esposizione j durante il periodo di calcolo;

Tecnologie e dati: l'energia totale della radiazione solare deriva da dati tabellari che sono in funzione dell'esposizione, che può essere desunta da elaborazione di dati LIDAR

A_{snj} [m²]= è l'area effettiva della superficie di raccolta n con esposizione j , ed è equivalente all'area di un corpo nero che ha lo stesso apporto solare della superficie considerata.

Tecnologie e dati: le superfici incidenti dell'involucro edilizio esposto al sole, possono essere calcolate, inizialmente tramite l'ausilio di classificazione ad oggetti di immagini termografiche e tramite la restituzione tramite CAD di scansioni Laser Scanner. Sulla base di queste e sulla base della modellazione 3D, è possibile calcolare le superfici effettivamente irraggiate durante un determinato periodo dell'anno.

9. CONCLUSIONI

Il presente lavoro rappresenta una metodologia per la produzione di uno strumento di sensibilizzazione alla problematica delle dispersioni energetiche degli edifici, utilizzando metodologie di rilievo ad alta precisione e fuori dalle tecniche tradizionali. La procedura di elaborazione per l'ottenimento dell'obiettivo voluto è risultata piuttosto complessa, in particolare per la parte della modellazione 3D, in cui il risultato finale è molto influenzato dai dati inseriti in fase di elaborazione, inoltre i risultati e le procedure sono fortemente influenzate dalla disponibilità di strumentazione software, che per motivi di licenze in alcuni casi (es. scansioni laser) si trattano di semplici visualizzatori con funzionalità piuttosto ridotte che limitano l'automaticità delle procedure, per contro invece il risultato sembra perseguire perfettamente gli obiettivi risultando uno strumento di grande impatto e soprattutto di facile lettura anche da parte di chi non è esperto del settore.

Questo strumento potrebbe essere la base per lo sviluppo di lavori futuri, in particolare per lavori di grande interesse soprattutto dal mercato immobiliare, se si pensa alla certificazione energetica ormai divenuta obbligatoria, per tutti gli atti di compravendita di immobili.

BIBLIOGRAFIA

AA.VV. Strumenti e concetti di Pianificazione Energetica Locale, energy action & system

AA.VV. VEGA-IUAV Industrial phd 'Smart Cities';

AA.VV. (2008) Guida tascabile sulla termografia, TESTE AG, Settimo Milanese (MI)

AA.VV. (2008) Sviluppo sostenibile, tutela dell'ambiente e della salute umana, *atti del 10° Congresso Ciriaf*, Perugia

AA.VV. Applicazione del decreto legislativo n. 311/2006: rendimento energetico in edilizia, RDB spa, Pontenure, PC

AA.VV. Piano energetico regionale, Regione Emilia – Romagna

Ackermann, S ed al. Modellazione automatica degli edifici da dati Lidar, università degli studi di Napoli "Parthenope"

Alvighini, P. (2011) Efficienza e risparmio energetico, dalla legge 10/1991 a oggi, *Il Sole 24 ORE*

ANCE Lombardia, Legambiente (2007) Costruire città sostenibili: *Decalogo per un'attività edilizia a qualità, rispettosa del territorio e vicina ai cittadini*

Bornaz, L. (2004) I sistemi a scansione laser, *la tecnica del laser scanner terrestre*, Udine

Carbonari, A. Il sistema città e l'uso appropriato dell'energia, *appunti del corso di Fisica Tecnica*; IUAV facoltà di Architettura.

Caserini, S. (2008) A qualcuno piace caldo: *errori e leggende sul clima che cambia*, Edizioni Ambiente

Cavallero, A. (2011) La termografia a infrarosso negli apparecchi elettrici e elettronici, Padova

Corrado, V. e Serraino M. (2007) Il nuovo quadro legislativo italiano sull'efficienza energetica degli edifici, Dipartimento di energetica, Politecnico di Torino

Donvito, D. e Laporta G. (2010) La certificazione energetica degli edifici, *inquadramento normativo*

Fico, B. & Beinat, A. Definizione automatica da rilievi LIDAR di attributi geometrici per il GIS 3D urbano, Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università di Udine

Gomasca, M. (2009) Basics of Geomatics, Casa Editrice Springer

Lanzoni, D. (2010) L'efficienza degli edifici si misura con la termografia

Lora, C. et al. (2006) Determinazione dell'effetto Isola di Calore Urbana " *in una città alpina mediante utilizzo di reti di sensori a basso costo*"

Lucchi, E. (2009) Termografia a infrarosso, progetto energia, Politecnico di Milano

Mazza, G. (2009) Applicazioni del telerilevamento termico in ambito urbano, Bologna

Shav, R. ed al. TPCA (2007) Climate change adaptation by design, *a guide for sustainable communities*, London

TTC Trading Corp. Consulting (2006): Operation thermographie, *Dossier de Presse*, Gap

Tudico L. La climatizzazione degli ambienti. *Manuale pratico*

SITOGRAFIA

<http://www.energiaspiegata.it>

<http://www.urbanolab.com/smart-city.html>

<http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/energia-ambiente-e-innovazione-1/anno-2011/n.%204-5%202011%20Luglio-ottobre2011/SmartCity>

<http://www.portfoliomagazine.it/view.php?s=322>

<http://www.meteoparma.com/cat.html?cat=100>

<http://www.mondoecoblog.com/2011/11/16/video-citta-futuro>

http://www.consumieclima.org/modulo1/conclusioni_corretto.html

<http://www.wikipedia.org>

http://www.imper.it/schede/foglio_notizie/Foglio_Notizie_n1_010%20copia.pdf

<http://geographygems.blogspot.com/2011/09/urban-climates.html>

<http://www.eurosportelloveneto.it>

<http://building.dow.com/europe/it/applications/walls/term.htm>

<http://www.zclima.it>

<http://www.infobuildenergia.it/approfondimento.php?id=19>

<http://www.cipra.org/>

http://www.apiuenergy.com/upload/download/Linee_guida_x_edilizia_sostenibile.pdf

<http://www.nextvill>

<http://www.touringclub.com/localita/veneto/belluno/feltre.asp>

<http://www.mygreenbuildings.org/2011/01/01/risparmiare-energia-impianti-riscaldamento-condizionamento.html>

<http://www.esri.com/news/arcuser/0111/3dcity.html>

