



CENTRO SPERIMENTALE  
DI SVILUPPO DELLE COMPETENZE  
NELL'AREA DELLE COSTRUZIONI



La tua  
**Campania**  
cresce in  
**Europa**



# Monografie Edil-lab

**INNOVAZIONE  
TECNOLOGIA E AMBIENTE**

**Tecniche di indagine e  
diagnosi per l'efficienza  
energetica in edilizia**

**ITA**

## **Tecniche di indagine e diagnosi per l'efficienza energetica in edilizia**

Il progetto è stato promosso dall'ATI Edil-lab: mandataria CFS Napoli; mandanti STAMPA Soc. Coop. a r.l., Istituto Tecnico Statale "Della Porta - Porzio", STRESS scarl, Consorzio TRE, AMRA – Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambiente S.c.ar.l., ACEN - Associazione Costruttori Edili di Napoli, S.I. Impresa – Azienda Speciale della CCIAA di Napoli, Brancaccio Costruzioni spa, Credendino Costruzioni spa, Edildovi snc, Iterga Costruzioni Generali Appalti spa, RR Costruzioni Generali spa.

L'ideazione dell'iniziativa "Monografie Edil-lab" è delle imprese Brancaccio Costruzioni spa, Credendino Costruzioni spa, Edildovi snc, Iterga Costruzioni Generali Appalti spa, RR Costruzioni Generali spa.

L'elaborazione della monografia è a cura del prof. Filippo De Rossi, il prof. Giuseppe Peter Vanoli, l'arch. Monica Cannaviello, l'ing. Rosa Francesca De Masi.

Elaborazioni grafiche: Edizioni Graffiti srl

Si ringraziano per gli apporti tecnici: Roberta Ajello, Federica Brancaccio, Aldo Checchi, Ester Chica, Antonio Credendino, Mattia D'Acunto, Giancarlo Di Luggo, Marco Ferra, Antonio Giustino, Angelo Lancellotti, Massimo Maresca, Gabriella Reale, Barbara Rubertelli, Gaetano Troncone, Francesco Tuccillo, Diego Vivarelli von Lobstein, nonché gli uffici dell'ANCE.

Si ringrazia, inoltre, il Comitato Tecnico Esecutivo di Edil-lab nelle persone di: Paola Marone, Ennio Rubino e Stefano Russo.

Si ringraziano inoltre: l'Assessore alla Formazione della Regione Campania, Chiara Marciani, il Dirigente dell'UOD Formazione Professionale, Prospero Volpe, il Funzionario Titolare di P.O., Gerardo de Paola, ed il coordinatore amministrativo del Progetto Valerio Iacono.

editing: Giovanni Aurino

impaginazione: Emma Di Lauro

Edizioni Graffiti srl

Napoli. aprile 2017



## **Indice**

1. Normativa europea e nazionale	pag 02
2. Diagnosi energetica: definizione, normativa di riferimento, requisiti	pag 06
3. La caratterizzazione del sistema: analisi del sito e dell'utenza	pag 14
4. La caratterizzazione del sistema: analisi dell'involucro edilizio	pag 17
5. La caratterizzazione del sistema: descrizione degli impianti	pag 19
6. Caratterizzazione del sistema edificio-impianto: utilizzo di fonti rinnovabili	pag 22
7. Schema di procedura per il reperimento dei dati necessari alla diagnosi energetica	pag 23
8. Modalità operative: indagini strumentali e determinazione del fabbisogno energetico	pag 30
9. Miglioramento della prestazione energetica: possibili interventi	pag 42
10. Caso studio: simulazioni prestazionali, economico/finanziarie	pag 46
Bibliografia	pag 59

## 1. NORMATIVA EUROPEA E NAZIONALE

La tabella riporta una breve cronistoria della normativa europea ed italiana sull'efficienza energetica degli edifici.

La Direttiva 2002/91/CE, “Energy Performance of Buildings Directive” (EPBD), aggiornata e sostituita dalla Direttiva 2010/31/UE, “Energy Performance of Buildings, EPBD- recast” del 19 maggio 2010 è considerata la direttiva cardine per gli obiettivi di efficienza energetica in edilizia.

**Tabella 1: Efficienza energetica degli edifici: cronistoria legislativo**

Direttiva Europea	Decreti legislativi	Decreti attuativi	Sintesi dei contenuti
2002/91/CE	D.Lgs. 192/2005 D.Lgs. 311/2006	D.P.R. 59/2009 D.M. 26/06/2009	Requisiti di prestazione energetica per edifici di nuova costruzione e per quelli sottoposti a interventi di ristrutturazione
2009/28/UE	D.Lgs. 28/2011		Obblighi relativi all'integrazione di fonti rinnovabili negli edifici
2010/31/UE	D.L. 63/2013 L. 90/2013 D.L. 145/2013	D.M. 26/06/2015	Nuovi requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici di nuova

		costruzione e per quelli sottoposti a interventi di ristrutturazione
2012/27/UE	D.Lgs. 102/2014	Obblighi di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio pubblico Obbligo di diagnosi energetiche per grandi imprese ed imprese energivore

In Italia tale direttiva è stata recepita con il decreto legislativo 192/2005<sup>1</sup> e s.m.i. Questo decreto disciplina l'applicazione dei requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche e la metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici. Il 4 giugno 2013 è stato emanato il decreto-legge, n. 63, coordinato con la legge di conversione 3 agosto 2013, n. 90, recante: "Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché' altre disposizioni in materia di coesione sociale".

La legge 90/2013 ha l'obiettivo di promuovere il miglioramento della prestazione energetica degli edifici tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne,

<sup>1</sup>Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192 - Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia

nonché' delle prescrizioni relative al clima degli ambienti interni e all'efficacia sotto il profilo dei costi.

Principali novità introdotte dal D.L. 63/2013 :

- obblighi per gli edifici di nuova costruzione: Nearly Zero Energy Building;
- definizione di prestazione energetica di un edificio;
- metodologia per la determinazione dei requisiti minimi e per l'analisi degli interventi di efficienza energetica: Cost-Optimal methodology.

A giugno 2015 sono stati emanati i decreti attuativi della legge 90/2013:

- D.M. 26.6.2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici";
- D.M. 26.6.2015 "Schemi e modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto ai fini dell'applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi di prestazione energetica negli edifici";
- D.M. 26.6.2015 "Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici".

La Direttiva 2009/28/UE, sulla promozione dell'uso di energia da fonti rinnovabili è stata recepita in Italia dal D.Lgs. 28/2011, anche noto come "Decreto rinnovabili". Tale decreto ridefinisce in maniera organica gli strumenti, i meccanismi, gli incentivi e il relativo quadro istituzionale/finanziario, ribadendo, tra l'altro, il ruolo complementare e sinergico delle politiche di efficienza energetica. Fissa inoltre gli obblighi di integrazione per le rinnovabili termiche ed elettriche all'interno degli edifici.

Il più recente provvedimento in materia di efficienza energetica è la Direttiva 2021/27/EU sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/C. Un aspetto rilevante ai fini dell'argomento trattato è l' articolo 8: *Audit energetici e sistemi di gestione dell'energia*. In quest'articolo viene prescritto che le grandi imprese dovranno iniziare a dotarsi di audit energetico, entro dicembre 2015; tale audit da effettuarsi ogni 4 anni, deve essere svolto in modo indipendente da esperti accreditati. Gli Stati membri dovranno adottare misure per promuovere la disponibilità, per tutti i clienti finali, di audit energetici di elevata qualità, efficaci in rapporto ai costi.

La Direttiva 2012/27/UE richiede all'Italia un risparmio nazionale cumulato di energia finale da conseguire nel periodo compreso dal 1 gennaio 2014 al 31 dicembre 2020 pari a 25.58 Mtep. Il D.Lgs. 102/2014, che recepisce la direttiva suddetta, stabilisce un programma per rendere più efficiente il patrimonio edilizio pubblico e prevede che, a partire dall'anno 2014 e fino al 2020, siano realizzati interventi sugli immobili della Pubblica Amministrazione centrale, in grado di conseguire la riqualificazione energetica almeno pari al 3% annuo della superficie coperta utile climatizzata o che, in alternativa, comportino un risparmio energetico cumulato nel periodo 2014-2020 di almeno 0.04 Mtep.

## **2. DIAGNOSI ENERGETICA: DEFINIZIONE, NORMATIVA DI RIFERIMENTO, REQUISITI**

La diagnosi energetica rappresenta uno strumento indispensabile per individuare gli interventi più opportuni da eseguire per la riqualificazione energetica degli edifici esistenti, non solo in funzione della fattibilità tecnica, ma anche in funzione del tempo di ritorno degli investimenti e quindi in funzione della fattibilità economica.

La Diagnosi Energetica degli edifici è definita dal D.Lgs. 115 del 2008 e quindi dalla Norma UNI CEI /TR 11428 “Gestione dell'energia - Diagnosi energetiche - Requisiti generali del servizio di diagnosi energetica” (in vigore dal 6 Ottobre 2011), come:

*“ una procedura sistematica volta a ottenere un'adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o gruppo di edifici, di una attività o impianto industriale o commerciale o di servizi pubblici o privati, individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi – benefici, riferire al cliente in merito ai risultati”.*

La norma UNI CEI /TR 11428 introduce anche la figura del “referente della diagnosi energetica” (REDE), cioè l'esperto responsabile della realizzazione della Diagnosi.

Più in dettaglio, il D.Lgs. 115/2008, all'art.13 - *Edilizia Pubblica*- in relazione all'uso efficiente dell'energia nel settore edile, inserisce tra gli obblighi della pubblica

amministrazione, la diagnosi energetica degli edifici pubblici o ad uso pubblico, in caso di:

- interventi di ristrutturazione degli impianti termici, compresa la sostituzione dei generatori;
- ristrutturazioni edilizie che riguardino almeno il 15 per cento della superficie esterna dell'involucro edilizio che racchiude il volume lordo riscaldato.

Inoltre all'art. 18 - *Diagnosi energetiche e campagne di informazione* - prevede che siano definite le modalità con cui assicurare la disponibilità di sistemi di diagnosi energetica efficaci e di alta qualità destinati a individuare eventuali misure di miglioramento dell'efficienza energetica applicate in modo indipendente a tutti i consumatori finali.

Il D.Lgs. 102/2014, attuativo della Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, all'art. 5. - *Miglioramento della prestazione energetica degli immobili della Pubblica Amministrazione*- ha posto che le Pubbliche Amministrazioni centrali, entro il 30 giugno di ciascun anno successivo al 2014, predispongano, anche in forma congiunta, proposte di intervento per la riqualificazione energetica degli immobili dalle stesse occupati, formulate sulla base di appropriate diagnosi energetiche o facenti riferimento agli interventi di miglioramento energetico previsti dall'attestato di prestazione energetica.

E' inoltre previsto che le Regioni e gli enti locali nell'ambito dei rispettivi strumenti di programmazione energetica, concorrano al raggiungimento dell'obiettivo nazionale, attraverso l'approvazione, tra l'altro, di "provvedimenti volti a favorire l'introduzione di un sistema di gestione dell'energia, comprese le diagnosi energetiche, il ricorso alle

ESCO e ai contratti di rendimento energetico”. Infine, l’Allegato 2 del D.Lgs. 102/2014 fornisce i “Criteri minimi per gli audit energetici, compresi quelli realizzati nel quadro dei sistemi di gestione dell'energia”.

La prima norma tecnica in Italia che ha disciplinato la Diagnosi Energetica è stata la UNICEI/TR 11428: 2011 “*Gestione dell'energia – Diagnosi energetiche – Requisiti generali del servizio di diagnosi energetica*”. Tale rapporto tecnico individua come strumenti per il miglioramento dell’efficienza energetica:

- la razionalizzazione dei flussi energetici;
- il recupero delle energie disperse;
- l’individuazione di tecnologie per il risparmio di energia;
- l’ottimizzazione dei contratti di fornitura energetica;
- la gestione dei rischi tecnici ed economici;
- il miglioramento delle modalità di conduzione e manutenzione.

A questa si aggiunge la norma UNI CEI EN 16247-1, “*Diagnosi energetiche - Parte 1: Requisiti generali*” che definisce i requisiti, la metodologia comune e i prodotti delle diagnosi energetiche per tutte le forme di aziende ed organizzazioni, con l'esclusione delle singole unità immobiliari residenziali.

In quanto procedura sistematica, la diagnosi energetica deve possedere i seguenti requisiti:

- *completezza*: definizione del sistema energetico comprensivo di tutti aspetti energetici significativi;

- *attendibilità*: acquisizione di dati reali in numero e qualità necessari per lo sviluppo dell'inventario energetico della diagnosi energetica e sopralluogo del sistema energetico;
- *tracciabilità*: identificazione e utilizzo di un inventario energetico, documentazione dell'origine dei dati e dell'eventuale modalità di elaborazione dei suoi dati a supporto dei risultati della diagnosi energetica, comprensivo delle ipotesi di lavoro eventualmente assunte;
- *utilità*: identificazione e valutazione sotto il profilo costi/benefici degli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica espressi attraverso documentazione adeguata e differenziata in funzione del settore, delle finalità e dell'ambito di applicazione, trasmessa al committente.
- *verificabilità*: identificazione degli elementi che consentono al committente la verifica del conseguimento dei miglioramenti di efficienza risultanti dalla applicazione degli interventi proposti.

L'esatto contenuto del rapporto deve essere appropriato allo scopo, alla finalità ed al livello di dettaglio della diagnosi energetica

- a. *Documento di sintesi*: graduatoria delle opportunità di miglioramento dell'efficienza energetica e programma di attuazione proposto;
- b. *Contesto*: informazioni generali, descrizione dell'oggetto di diagnosi e della metodologia adottata, il contesto operativo, la normativa di riferimento;
- c. *Diagnosi energetica*: descrizione, scopo, obiettivo e livello di dettaglio, arco temporale e confini della diagnosi energetica; informazioni sulla raccolta dati

(dispositivi di misura, indicazione di quali dati siano stati utilizzati, quali sono frutto di misure e quali di stime, copia dei valori chiave utilizzati e dei certificati di calibrazione ove opportuni); analisi dei consumi energetici; criteri per la messa in graduatoria delle raccomandazioni per la riduzione dei consumi;

d. *Opportunità di miglioramento dell'efficienza energetica*: azioni proposte, raccomandazioni, piano e programma temporale di implementazione; ipotesi assunte durante il calcolo dei risparmi energetici e loro impatto sull'accuratezza delle raccomandazioni; informazioni su possibili contributi e sovvenzioni; analisi economica appropriata; potenziali interazioni fra altre raccomandazioni proposte; metodi di misura e verifica che dovranno essere usati per le valutazioni post-attuazione delle opportunità raccomandate;

e. Conclusioni.

La commissione tecnica CTI – Comitato Termotecnico Italiano – congiuntamente al CEI – Comitato Elettrotecnico italiano - ha pubblicato in lingua italiana le 5 parti della UNI CEI EN 16247 in materia di diagnosi energetiche.

- UNI CEI EN 16247-1: "Diagnosi energetiche - Parte 1: Requisiti generali";
- UNI CEI EN 16247-2 "Diagnosi energetiche - Parte 2: Edifici";
- UNI CEI EN 16247-3 "Diagnosi energetiche - Parte 3: Processi" ;
- UNI CEI EN 16247-4 "Diagnosi energetiche - Parte 4: Trasporto";
- UNI CEI EN 16247-5 “Diagnosi energetiche. Parte 5: Competenze dell’auditor energetico”.

La norma UNI CEI EN 16247 -1 si applica a tutte le forme di aziende ed organizzazioni, a tutte le forme di energia e di utilizzo della stessa, con l'esclusione delle singole unità immobiliari residenziali.

Sono inoltre individuate le diverse fasi della procedura di diagnosi energetica:

1. contatti preliminari con il committente per concordare i requisiti della procedura di diagnosi;
2. riunione di apertura (incontro preliminare per ragguagliare le parti interessate in merito agli obiettivi, ambito, confini e grado di dettaglio, modalità operative);
3. raccolta dati;
4. svolgimento della diagnosi energetica;
5. analisi dei risultati;
6. report finale;
7. riunione di chiusura.

In particolare, la diagnosi energetica può essere suddivisa in due stadi fondamentali. Il primo è focalizzato sulla caratterizzazione del sistema edificio-impianto, e deve condurre alla stesura dei modelli energetici e alla valutazione dei consumi specifici attraverso una corretta ricostruzione del bilancio energetico e attraverso il confronto con tecnologie e dati di riferimento. Dalla fase precedente deve scaturire l'individuazione di eventuali interventi finalizzati ad un incremento dell'efficienza energetica del sistema edificio-impianto. Per ciascun intervento deve essere verificata la fattibilità tecnico-economica.

La norma UNI CEI EN 16247-2 è applicabile alle diagnosi energetiche specifiche per gli edifici. Essa definisce i requisiti, la metodologia e la reportistica di una diagnosi energetica relativa a un edificio o a un gruppo di edifici, escludendo le singole residenze private.

La norma UNI CEI EN 16247-3 definisce i requisiti, la metodologia e la reportistica di una diagnosi energetica nell'ambito di un processo e si applica ai luoghi in cui l'uso di energia è dovuto al processo.

La norma UNI CEI EN 16247-4 determina i requisiti, la metodologia e la reportistica specifici per le diagnosi energetiche nel settore dei trasporti.

La UNI CEI EN 16247-5 definisce la figura dell'auditor energetico e accanto alle ESCO (UNI CEI 11352) e agli EGE (UNI CEI 11339), definisce il gruppo di soggetti chiamati dal decreto citato a svolgere il servizio di diagnosi energetica per i soggetti obbligati a partire dal luglio 2016. A questi si aggiunge ISPRA per le aziende registrate EMAS. La parte 5 specifica in particolare le competenze che l'auditor energetico o un team di auditor energetici deve possedere per effettuare in maniera efficace diagnosi energetiche conformi ai requisiti della parte 1 (aspetti generali delle diagnosi) eventualmente integrata dalle parti specifiche per i settori "Edifici", "Processi" e "Trasporti". È importante infine chiarire che questa nuova figura non deve essere confusa con quella di "auditor" di sistema attiva nel mondo dei sistemi di gestione dell'energia, della qualità o dell'ambiente e che ha un ruolo completamente diverso.

A completare il quadro delle norme sulla gestione dell'energia, c'è la norma internazionale ISO 50001:2011 "*Energy Management systems - Requirements with guidance for use*".

La norma ISO 50001, che rappresenta lo sviluppo della europea UNI CEI EN 16001 "Sistemi di Gestione dell'Energia – Requisiti e linee guida per l'uso", si va ad inserire nel quadro degli strumenti volontari per l'eco-gestione, insieme dunque alla ISO 9001 per la gestione della qualità nei processi, ed alla ISO 14001 per il miglioramento delle prestazioni ambientali. Tali tipologie di norme, nate inizialmente in ambito industriale, si sono poi diffuse in altre tipologie di organizzazioni private e soprattutto pubbliche.

Il CTI ha pubblicato nel 2011 la UNI CEI EN ISO 50001, e tre anni più tardi le altre norme del pacchetto:

- ISO 50002:2014 "Energy audits - Requirements with guidance for use";
- ISO 50003:2014 – Energy management systems - Requirements for bodies providing audit and certification of energy management systems;
- ISO 50004:2014 – Energy management systems — Guidance for the implementation, maintenance and improvement of an energy management system;
- ISO 50005:2014 – Energy management systems - Measurement and verification of energy performance of organizations - General principles and guidance;
- ISO 50006:2014 – Energy management systems — Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) — General principles and guidance.

Infine, tra i riferimenti normativi c'è la UNI CEI EN 16212:2012 "*Calcoli dei risparmi e dell'efficienza energetica - Metodi top-down (discendente) e bottom-up (ascendente)*", che ha lo scopo di fornire un approccio generale per i calcoli dei risparmi e dell'efficienza energetica utilizzando metodologie standard.

### **3. LA CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA: ANALISI DEL SITO E DELL'UTENZA**

La diagnosi energetica per definire il bilancio energetico deve partire da una attenta caratterizzazione del sistema edificio-impianto.

Il primo passo è la conoscenza delle condizioni climatiche esterne relative alla località in cui è ubicato l'edificio. I dati climatici necessari riguardano prevalentemente:

- temperature esterne medie mensili;
- valori di irradianza solare globale media mensile;
- valori della velocità del vento;
- valori della pressione di vapore.

Tali dati possono essere ricavati in prima istanza dalle specifiche norme. In particolare la principale norma di riferimento è la UNI 10349 - *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici*. La nuova versione, pubblicata nel 2016 consta di 3 parti:

- UNI 10349-1:2016 "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio

e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata”;

- UNI 10349-2:2016 “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 2: Dati di progetto”;
- UNI 10349-3:2016 “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici”.

La norma UNI 10349 fornisce, per ciascuna località, la media storica delle grandezze climatiche rilevanti ai fini del progetto termico di un edificio; tali valori, essendo medi non sempre corrispondono ai dati relativi alle specifiche annualità prese in esame.

Poiché la diagnosi energetica si basa su una valutazione del tipo *tailored rating* (cioè adattata all'utenza - come definite per l'Italia dalla specifica tecnica UNITS 11300), è preferibile quindi fare riferimento alle temperature esterne medie mensili reali rilevate da stazioni meteo presenti nell'area di ubicazione dell'edificio e relative alle annualità di cui si dispone delle fatture energetiche e a dati di irraggiamento rilevati da stazioni meteo nell'area di ubicazione all'edificio riferite sempre alle annualità prese in esame. E' inoltre necessaria l'analisi del contesto circostante, attraverso il rilievo degli edifici adiacenti, per ciascuna esposizione, con stima delle relative altezze totali e della distanza dal fabbricato oggetto dell'audit (il rilievo delle altezze può essere desunto dal numero di piani).

Il passo successivo è l'analisi dell'utenza e dei profili di utilizzo dell'edificio. In questo senso devono essere individuate le destinazioni d'uso dei locali che l'edificio

comprende al fine di delineare le diverse zone termiche dell'edificio. Per zona termica si intende, in linea generale ogni porzione di edificio, climatizzata ad una determinata temperatura con identiche modalità di regolazione, e servita dal medesimo impianto di generazione.

Per ciascuna zona termica si devono definire le condizioni interne di calcolo considerando:

- temperatura di interna di progetto invernale ed estiva;
- numero di persone e profilo di occupazione dell'edificio;
- apporti interni (numero medio di occupanti ed apparecchiature presenti);
- numero di ricambi d'aria;
- potenze elettriche installate (per illuminazione e per apparecchiature elettriche elettroniche) e profilo di accensione;
- giornate annue di utilizzo degli impianti presenti e orari di accensione giornaliera;
- modalità di gestione delle chiusure oscuranti e delle schermature mobili.

Devono essere differenziate le zone termiche diversamente riscaldate e/o raffrescate dal punto di vista delle temperature e/o degli intervalli giornalieri e mensili di riscaldamento;

Come indicato dalla UNI 11300:2, e come riportato nel paragrafo precedente se lo scopo della valutazione energetica è la Diagnosi Energetica e/o la programmazione di interventi di riqualificazione la valutazione deve essere “adattata all’utenza” e quindi deve essere *“effettuata in condizioni effettive di utilizzo sulla base dei dati relativi*

*all'edificio ed all'impianto reale come costruito; per le modalità di occupazione e di utilizzo dell'edificio e dell'impianto, si assumono i valori effettivi di funzionamento nelle condizioni reali di intermittenze dell'impianto.”*

#### **4. LA CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA: ANALISI DELL'INVOLUCRO EDILIZIO**

L'analisi del sistema edificio-impianto richiede l'acquisizione di una serie di informazioni, necessarie per caratterizzare l'edificio e valutare il fabbisogno energetico. In particolare si devono determinare i dati inerenti l'anno di costruzione e la tipologia costruttiva (muratura portante, telaio in calcestruzzo armato e tamponamenti a cassa vuota etc). E' altresì importante sapere se l'edificio è stato sottoposto negli anni ad interventi di ristrutturazione che hanno comportato modifiche significative rispetto alla conformazione originaria.

Sono necessari poi i dati geometrici planimetrici, che sono desumibili, in prima istanza, da piante, sezioni e prospetti, ma devono comunque essere verificati in sede di sopralluogo.

Per quanto attiene i dati generali dell'edificio è necessario conoscere:

- superficie utile (o netta calpestabile) dell'ambiente climatizzato ( $m^2$ );
- superficie disperdente complessiva ( $m^2$ );
- volume lordo e volume netto dell'ambiente climatizzato ( $m^3$ );
- superfici di tutti i componenti dell'involucro ( $m^2$ );

- rapporto tra superficie disperdente e volume lordo riscaldato  $s/v$  ( $m^2/m^3$ );
  - orientamenti ed esposizione di tutti i componenti dell'involucro edilizio;
  - caratteristiche geometriche di tutti gli elementi esterni (altri edifici, aggetti, etc.);
- che ombreggiano i componenti trasparenti dell'involucro.

Vanno poi valutate le caratteristiche termofisiche dei componenti opachi e trasparenti dell'involucro edilizio che confinano con l'ambiente esterno, con locali adiacenti non climatizzati e/o climatizzati ad una temperatura differente da quella della zona termica analizzata e del terreno. Tali caratteristiche sinteticamente sono:

- trasmittanza termica dei componenti opachi e trasparenti;
- trasmittanza termica periodica e capacità termica dei componenti opachi;
- fattore solare (trasmittanza di energia solare totale) dei componenti trasparenti;
- coefficienti di trasmissione lineare dei ponti termici;
- fattori di assorbimento solare delle finiture superficiali esterne dei componenti opachi dell'involucro edilizio;
- emissività delle superfici esterne dei componenti dell'involucro edilizio;
- fattori di riduzione della trasmittanza di energia solare totale dei componenti trasparenti dell'involucro edilizio in presenza di schermature fisse e/o mobili.

Molto spesso si riscontra la difficoltà di reperire dati attendibili relativi alle stratigrafie dei componenti opachi e trasparenti. In alternativa all'utilizzo di abachi che forniscono le caratteristiche generali di tipologie costruttive ricorrenti in funzione dell'epoca

costruttiva, per avere dati attendibili, è necessario ricorrere ad indagini sperimentali. Una descrizione più dettagliata è riportata nei paragrafi successivi.

## **5. LA CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA: DESCRIZIONE DEGLI IMPIANTI**

La caratterizzazione degli impianti prevede lo studio dei progetti e dei rilievi in termini di:

- analisi dei progetti, dei capitolati e della documentazione tecnica relativi agli impianti di condizionamento e di produzione di acqua calda sanitaria;
- impianti per la conversione energetica da fonti rinnovabili;
- caratterizzazione del sistema di illuminazione.

Ove possibile, è necessario reperire i libretti delle macchine costituenti gli impianti, cercando di individuare tipologia, potenza termica, e caratteristiche di efficienza. Attraverso opportuni sopralluoghi si deve verificare il numero e il tipo di terminali presenti, la loro collocazione e la presenza di eventuali sistemi di regolazione. Inoltre, è necessario valutare il regime di funzionamento previsto e il valore di set-point dei principali parametri termoigrometrici.

Per ciascun ambiente individuato attraverso le destinazioni d'uso, deve essere indicata la potenza di illuminazione, il numero e il tipo di corpo illuminante installato, riportando

ove possibile informazioni sulla qualità dell'illuminamento in misura anche delle esigenze manifestate dagli occupanti.

Un impianto termico comprende in genere:

- sistema di "produzione" del fluido termovettore caldo e/o freddo;
- sistemi di distribuzione del fluido termovettore;
- terminali di scambio termico;
- organi di regolazione e controllo.

La prestazione dell'impianto termico è valutabile attraverso il rendimento globale medio stagionale, che a sua volta è influenzato dai rendimenti dei quattro sotto sistemi di cui l'impianto è composto:

- *rendimento di generazione*: dipende dalla tipologia e caratteristiche tecniche del generatore termico (potenza nominale, rendimento utile, ecc.), e dal tipo di alimentazione (gas naturale, biomassa, ecc.);
- *rendimento di distribuzione*: dipende alla tipologia del circuito e dal posizionamento e tipo di isolamento delle tubazioni;
- *rendimento di emissione*: dipende dalla tipologia dei terminali di erogazione, dal loro posizionamento, dalla temperatura di mandata e dalla potenza nominale dei corpi scaldanti;
- *rendimento di regolazione*: dipende dalle caratteristiche del sistema adottato: regolazione manuale, climatica, ambiente, climatica e ambiente, di zona, climatica e di zona ecc.

Ad ogni sotto sistema sono associate delle perdite, ed è quindi necessario inserire tutti i dati relativi all'impianto per calcolare i diversi rendimenti.

Nella valutazione del fabbisogno di energia primaria devono essere considerati anche i consumi elettrici dei diversi dispositivi ausiliari connessi agli impianti termici, come ad esempio pompe di circolazione, inverter, organi di regolazione.

Analogamente si procede con l'impianto di climatizzazione estiva, se presente e con la produzione di acqua calda sanitaria. Si calcolano tutte le perdite a valle del sistema di generazione e si arrivano a definire i rendimenti dei sottosistemi.

Si procede infine con la caratterizzazione delle utenze elettriche, che contribuiscono al fabbisogno energetico globale. E' necessario quindi, soprattutto per le destinazioni d'uso diverse da quella residenziale, inserire tutti i dati relativi all'impianto di illuminazione e a tutti i dispositivi a funzionamento elettrico presenti nell'edificio.

## 6. CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO: UTILIZZO DI FONTI RINNOVABILI

Per concludere la fase di caratterizzazione del sistema edificio-impianto è necessario anche considerare gli impianti di produzione da fonti rinnovabili, se presenti.

Per la caratterizzazione degli impianti a fonte rinnovabili installati, è necessario reperire la relazione tecnica di progetto e gli schemi d'impianto. Si propone una tabella sintetica dei principali dati che dovrebbero essere raccolti.

**Tabella 2: Dati per la caratterizzazione di impianti a fonti rinnovabili**

Dati	Impianto n°
Potenza di picco	Wp
Numero ore equivalenti di funzionamento previste da progetto	h
Stima energia elettrica annua prodotta	kWh
Stima energia termica annua prodotta	kWh
Data di entrata in esercizio dell'impianto	-
Tipologia di scambio/cessione energia prodotta	-
Presenza impianto di monitoraggio	-
Acquisizione dati monitoraggio	-

Nel caso di presenza di un impianto alimentato da fonti rinnovabili per il quale non si possa disporre di modelli per il calcolo in proprio della producibilità ottenibile, va

compilata la scheda a partire dai dati di progetto o dai dati monitorati. In questo caso la presenza di una relazione tecnica di progetto risulta fondamentale per determinare la producibilità.

Infine per ciascuna tipologia di impianto è necessario valutare dati tecnici dei componenti dell'impianto come ad esempio per gli impianti fotovoltaici i dati relativi al tipo di silicio utilizzato (monocristallino, policristallino e amorfo) e alla superficie complessiva dei pannelli, verificando se i pannelli sono ventilati. Analogamente per il solare termico è necessario verificare il tipo di collettori (piani vetrati, sottovuoto, ecc.), la superficie complessiva e la presenza di eventuali ausiliari.

## **7. SCHEMA DI PROCEDURA PER IL REPERIMENTO DEI DATI NECESSARI ALLA DIAGNOSI ENERGETICA**

L'audit è lo strumento principale per conoscere e quindi intervenire efficientemente sulla prestazione energetica di una struttura, in quanto consente di fotografare lo stato attuale dei consumi e di evidenziare le principali problematiche nonché i margini di razionalizzazione ed i miglioramenti conseguibili rispetto alla situazione attuale del sistema edificio-impianto.

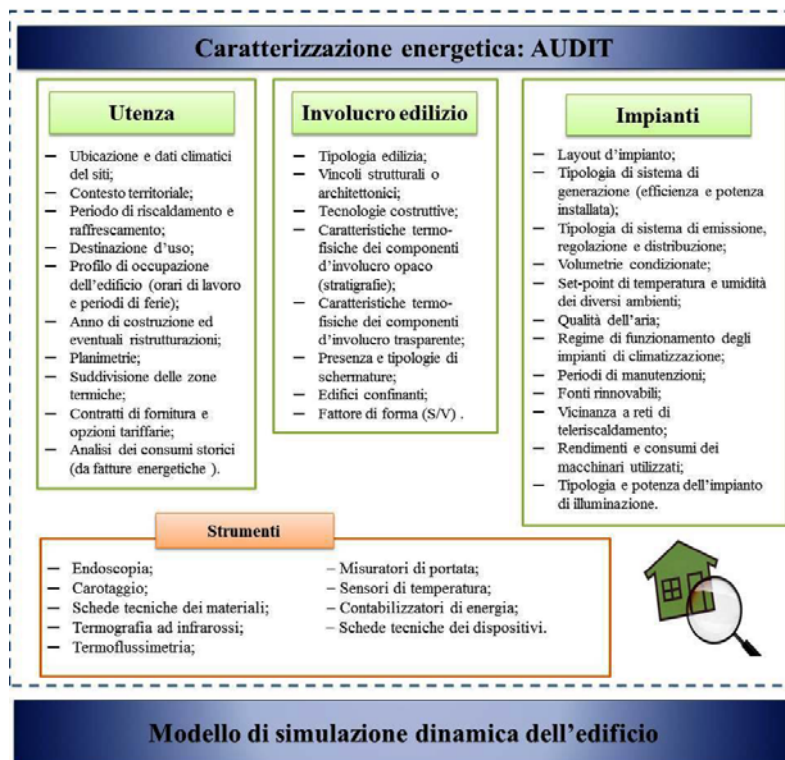


Figura 1: Schema per l'elaborazione di una diagnosi energetica

La fase di audit richiede, evidentemente, misure in situ, per stimare i parametri che condizionano significativamente i flussi energetici; questi in linea generale possono essere suddivisi in quattro categorie:

- misure di parametri che definiscono il comfort ambientale;
- misure sull'involucro;
- misure sull'impianto;
- misure climatiche esterne.

Come evidenziato nel sottogruppo relativo alla caratterizzazione dell'utenza, in una sorta di "firma energetica", è necessario ricostruire gli andamenti mensili o annuali delle richieste energetiche, operando anche eventuali disaggregazioni di dati stagionali non ripartiti per singolo mese.

La raccolta dei consumi energetici storici ingloba diverse operazioni, prima su tutte l'individuazione delle tipologie di fonti energetiche utilizzate e rese disponibili alla struttura e l'analisi delle distinte di fornitura di un periodo statisticamente significativo di anni (almeno 4). Per riuscire a ricostruire gli andamenti mensili o annuali, considerando che spesso il dato sui consumi in bolletta risulta aggregato, sono necessarie ulteriori informazioni relative alla tipologia di contratto di fornitura e alla gestione degli impianti. In particolare, ove possibile, si dovrebbero reperire i dati tecnici sugli impianti e informazione sugli orari e le modalità di funzionamento degli stessi. Allo stesso modo, è necessaria una raccolta dei dati sul sistema di distribuzione e sopralluoghi per verificare la tipologia dei corpi scaldanti. Evidentemente, la possibilità di monitorare direttamente i flussi energetici almeno di utenze selezionate consentirebbe un'analisi più puntuale e precisa con riferimento ad andamenti orari o giornalieri dei fabbisogni.

La ricostruzione dei profili di consumo attuali è una fase molto importante della diagnosi energetica, poiché i dati acquisiti potranno essere utilizzati per diversi scopi:

- calibrare il modello di simulazione energetica dell'edificio;
- utilizzare i dati rilevati per studi scientifici di settore, confrontando le prestazioni con quelle di analoghe strutture o in funzione delle destinazioni d'uso degli ambienti in modo da individuare le attività a maggior richiesta energetica ed impostare opportune strategie di controllo o razionalizzazione;

- archiviare dati e informazioni su cui basare analisi statistiche.

Note le caratteristiche energetiche reali dell'edificio, si può poi mettere a punto e calibrare un modello di simulazione termo-energetica dell'edificio tale da poter riprodurre numericamente i consumi termici ed elettrici.

Come riportato nello Standard ASHRAE "*Measurement of Energy and Demand Savings*" per calibrare un modello di simulazione energetica di un edificio si possono utilizzare i dati mensili di fabbisogno desumibili dalle distinte di fornitura relative a ciascun vettore energetico asservito all'edificio attraverso opportune elaborazioni. Questi dati, insieme alle informazioni sulle modalità di utilizzo delle varie apparecchiature, permettono una affidabile taratura del modello. Lo stesso standard individua come ulteriore metodo di calibrazione il confronto con dati di consumo orari, se disponibili, rilevati o a livello globale sull'edificio o attraverso monitoraggio su utenze opportunamente selezionate.

I due indici che il documento individua per determinare l'efficacia della calibrazione sono:

- hourly mean bias error (MBE);
- coefficient of variation of the root mean squared error (CV(RMSE)).

Il MBE è un errore percentuale calcolato su base mensile o annuale. Questo è definito come il rapporto tra la differenza tra il fabbisogno misurato/stimato da bolletta e quello ricavato dal modello di simulazione, rispetto al fabbisogno misurato/stimato. Tale indice, però, può essere affetto da errori di compensazione. Pertanto, come indice aggiuntivo si utilizza il CV(RMSE) che rappresenta il coefficiente di variazione dello

scarto quadratico medio e cioè il rapporto tra lo scarto quadratico medio riferito ad un certo periodo e il valor medio dei dati misurati nello stesso periodo. L'indice è espresso generalmente su base mensile e annuale. Si ritengono accettabili modelli in cui l'indice MBE rientri in un range del  $\pm 10\%$  e il CV(RMSE) entro  $\pm 30\%$  se si utilizzano dati orari per la calibrazione; se i dati di riferimento sono mensili (fatture di fornitura) allora il valore di tolleranza per i due indici diventa rispettivamente  $\pm 5\%$  e  $\pm 15\%$ .

La figura seguente riassume lo schema concettuale per la costruzione del modello di simulazione numerica dell'edificio e dunque dell'intera metodologia di diagnosi proposta.

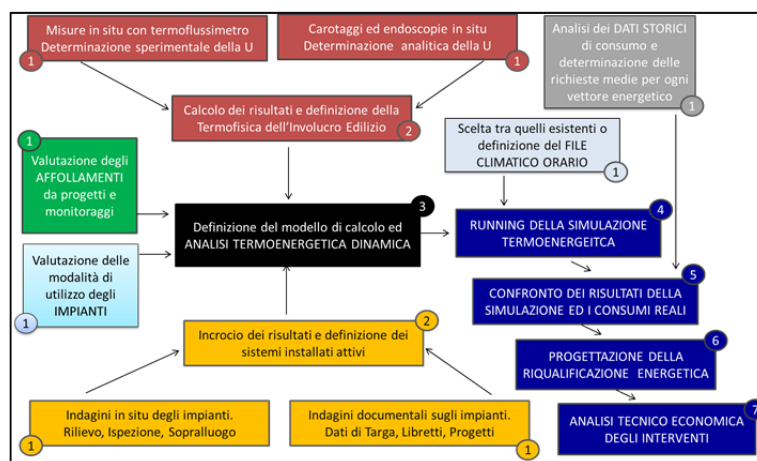


Figura 2: Schema concettuale per la costruzione del modello di simulazione

Una volta calibrato il modello, e tenendo conto delle indicazioni rilevate durante l'audit, la simulazione del rendimento energetico del sistema edificio/impianti consente

risposte precise sugli effetti dovuti all'installazione di tecnologie efficienti e/o alla sostituzione dei componenti impiantistici.

Pertanto, fatto ciò, la progettazione della riqualificazione energetica dell'edificio passa attraverso l'analisi energetica ed economica dei diversi scenari d'intervento ipotizzabili, tali da permettere di determinare l'intervento che più soddisfa la richiesta e le necessità dell'eventuale committente.

La selezione degli interventi di riqualificazione energetica deve avvenire non solo in relazione alla fattibilità tecnica ma anche di quella economica.

Gli indicatori economici maggiormente utilizzati in fase di diagnosi energetica per valutare gli interventi sono:

- TR (tempo di ritorno semplice) o SPB (simplepayback time);
- VAN (valore attuale netto);
- TIR (tasso interno di rendimento) o IRR (internal rate of return);
- IP (indice di profitto);
- TRA (tempo di ritorno attualizzato);

Affinché un intervento di riqualificazione energetica risulti economicamente fattibile, è necessario che siano innanzitutto verificate le seguenti condizioni:

- $TR < \text{vita utile prevista dell'intervento}$ ;
- $VAN > 0$ .

Il tempo di ritorno semplice è definito dal rapporto tra l'importo dell'investimento ed il flusso di cassa previsto.

$$TR=I_0/FC$$

Dove:

- $I_0$  rappresenta il costo dell'intervento di riqualificazione energetica;
- FC rappresenta il flusso di cassa, cioè il risparmio sui costi di esercizio annui.

È l'indicatore economico forse più diffuso, e in molti casi la sua determinazione è sufficiente per definire la redditività dell'intervento proposto.

Per contro il suo uso indiscriminato può fornire in alcuni casi delle risposte sbagliate e fuorvianti, in quanto troppo ottimistiche; infatti il TR non tiene conto della vita dell'investimento, dell'interesse, dell'inflazione e della deriva del costo del bene prodotto.

Il VAN (valore attuale netto) definisce il valore attuale di una serie di flussi di cassa, non solo sommandoli contabilmente, ma attualizzandoli sulla base del tasso di rendimento.

Può essere espresso come:

$$VAN = (FC) \times (FA) - I_0$$

Il termine FA rappresenta il Fattore di Annualità e ha lo scopo di "attualizzare" i benefici, economici (positivi o negativi) che scaturiscono a valle dell'intervento nei vari anni di durata dell'investimento.

Il TIR (tasso interno di rendimento) è un indicatore rappresentativo della redditività dell'intervento ed è molto usato in alcune circostanze a complemento del VAN; a differenza del VAN, che esprime la convenienza globale estesa a tutta la vita dell'investimento, il TIR esprime la convenienza per anno di vita. Il TIR rappresenta

proprio il valore dell'interesse (che rappresenta il costo del capitale) per cui il VAN si annulla. Se il TIR risulta superiore all'interesse di calcolo assunto, vuol dire che l'investimento proposto è conveniente rispetto all'attuale remunerazione del capitale.

## **8. MODALITÀ OPERATIVE: INDAGINI STRUMENTALI E DETERMINAZIONE DEL FABBISOGNO ENERGETICO**

La procedura di rilievo dei dati in campo per la caratterizzazione dell'involucro edilizio e dei componenti trasparenti è articolata in diverse fasi.

Prima di tutto, è necessario individuare l'epoca di costruzione dell'edificio, ponendo particolare attenzione alla composizione strutturale, alle caratteristiche architettoniche ed ad eventuali ampliamenti o ammodernamenti effettuati in epoche successive. Allo stesso tempo, si determinano eventuali vincoli o peculiarità rispetto all'importanza storica dell'edificio e si tiene nota di ristrutturazioni eventualmente già programmate, relative sia all'edificio che agli impianti, al fine di integrare i possibili nuovi interventi proposti.

Relativamente all'audit d'involucro edilizio, considerando le problematiche relative alla reperibilità di informazioni certe circa le stratigrafie nel caso di edifici esistenti e alla mancata corrispondenza con i valori teorici di progetto, per cause quali, ad esempio, la degradazione della struttura, una valutazione teorica delle caratteristiche termofisiche risulta molto difficile, ed è quindi importante combinare l'approccio analitico a quello

sperimentale, attraverso opportune misure in situ e monitoraggi delle grandezze termofisiche di interesse.

A proposito della composizione strutturale dell'edificio, in generale si possono avere tre situazioni:

- il progetto architettonico illustra con chiarezza la tecnica ed i materiali utilizzati;
- le caratteristiche dell'edificio possono essere assimilate a quelle di uno noto;
- la stratigrafia non è nota e in questo caso si applicano procedimenti intrusivi (es. endoscopia, estrazioni con carotaggi) per giungere alla individuazione della tipologie di materiali impiegati e degli spessori.

In questi casi, per caratterizzare la termofisica dell'involucro in termini di trasmittanza termica, si fa riferimento alla norma UNI EN ISO 6946:1999, "Componenti e elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo". Diversamente, quando non si conoscono le caratteristiche dell'edificio o si vuole evitare l'uso di prove distruttive (endoscopie), si fa riferimento alla norma ISO 9869 ("*Thermal insulation – Building elements –in-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*") con l'impiego dei termoflussimetri.

Infine, le prove per la valutazione della trasmittanza termica possono essere condotte sia in regime stazionario, seguendo le indicazioni della norma EN 1934 ("*Thermal performance of buildings. Determination of thermal resistance by hot box method using heat flow meter. Masonry*"), per la misura in laboratorio e, per la misura in situ, della ISO 9688, sia in regime variabile secondo il pr EN 12494, ("*Building components and elements. In situ measurement of the surface-to-surface thermal resistance*").

La norma ISO 9869 descrive il metodo per la misurazione delle proprietà di trasmissione termica dei componenti piani negli edifici mediante impiego di termoflussimetri.

La strumentazione, conforme alla norma, si compone di uno strumento di misura, data-logger, di un sensore di flusso termico e di quattro termocoppie per la misura delle temperature superficiali delle pareti interne ed esterne. Il sistema è di solito collegato ad un computer ed è gestito da un software per l'acquisizione e la registrazione dei dati.

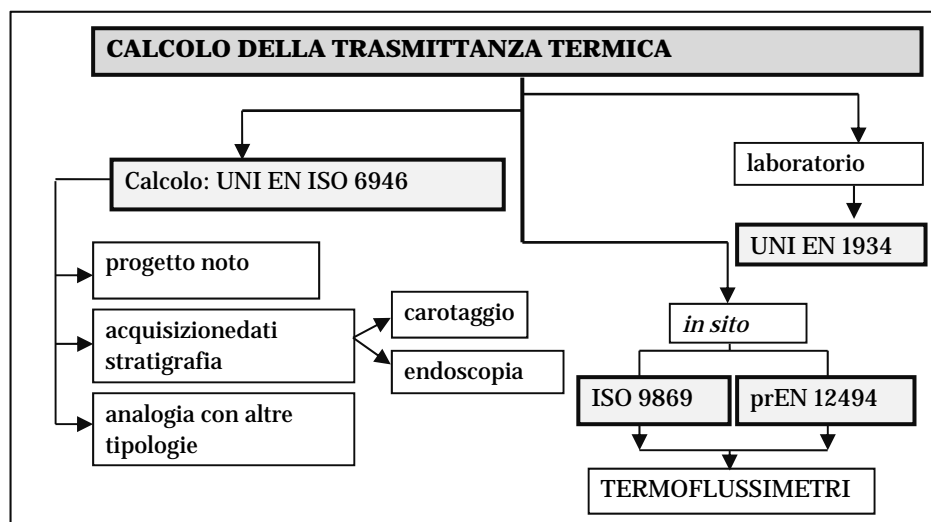


Figura 3 : Metodi per la determinazione della trasmittanza termica

La configurazione tipica consiste nel posizionare il sensore di flusso sulla superficie interna della parete e due o più sensori di temperatura sulla superficie interna e sulla superficie esterna della parete. L'uso di più sensori di temperatura permette di mediare

i valori, riducendo l'errore di misura in caso di costruzioni non sufficientemente omogenee.

La norma ISO 9869 fornisce alcune indicazioni operative sul modo in cui applicare i sensori per consentire una maggiore accuratezza e affidabilità della misura. In particolare, i sensori vanno installati in una porzione di superficie rappresentativa della parete corrente che si desidera caratterizzare, ma al fine di evitare effetti di bordo, che possono introdurre errori notevoli nella misura, sono da evitare le zone vicine agli spigoli ed ogni altra zona della parete in cui si presentino delle anomalie di carattere fisico o geometrico.

Pertanto, per una diagnosi accurata, per ciascuna porzione rappresentativa dell'edificio è necessario individuare e caratterizzare i singoli ponti termici di forma e/o di struttura. Questa analisi può essere fatta mediante ricorso alla termografia ad infrarossi. La termografia è una mappatura termica ottenuta tramite l'utilizzo di una termocamera in grado di rilevare l'emissione infrarossa. L'elaborazione tramite software specifico fornisce dettagliate informazioni sulla prestazione termica dell'involucro.

Nell'utilizzo dei termoflussimetri, occorre molta cautela nella posa delle termocoppie e, poiché è necessario anche il loro posizionamento sul lato esterno, bisogna evitare che queste siano investite direttamente dalla radiazione solare. In questo caso è opportuno scegliere, quando possibile, una parete orientata verso nord o nord-est, oppure collocare il sensore in una zona di parete soggetta ad elevato ombreggiamento.

Per quanto riguarda il posizionamento del sensore di flusso, la norma prevede di posizionarlo sul lato interno della parete, poiché è necessario evitare che esso sia

investito direttamente dalla radiazione solare. In caso contrario, si possono avere sensibili errori di misura.

La presenza dei sensori provoca disturbi al fenomeno da misurare e quindi errori di misura, dovuti non solo alle sue diverse caratteristiche spettrali, ma anche all'aggiunta di resistenze che hanno come conseguenza la distorsione delle isoterme e le deflessioni che si verificano ai lati della sonda a causa degli effetti di bordo. Tuttavia, l'errore dovuto alla distorsione delle isoterme può essere ridotto riducendo lo spessore dei sensori. Diversamente, l'errore dovuto alle deflessioni può essere ridotto applicando una guardia ovvero un materiale di riempimento non sensibile intorno alla parte sensibile del sensore.

Inoltre, occorre assicurare un buon contatto termico tra superfici della parete e sensori, in quanto un significativo errore di misura può essere dovuto al fatto che il contatto tra la superficie del sensore e quella della parete è discontinuo in conseguenza della rugosità caratteristica delle superfici delle pareti; a causa di ciò, la superficie di contatto risulta minore di quella apparente geometrica e le cavità presenti sono riempite di aria (che offre una resistenza termica elevata, se in quiete).

Un altro aspetto da prendere in considerazione, allo scopo di evitare errori di misura, è l'influenza delle condizioni al contorno. E' buona norma, infatti, effettuare la sperimentazione durante un periodo di tempo caratterizzato da forti differenze di temperatura fra ambiente interno ed esterno. A tale riguardo, il valore ottimale di  $\Delta t$  è di circa 10°C. Questa condizione garantisce di rilevare le grandezze, specie i flussi termici, nelle condizioni in cui essi assumono valori più alti. In tal modo si opera con segnali in uscita dai trasduttori più elevati, cosicché il sistema risulta essere meno sensibile ai

disturbi esterni e gli strumenti di misura siano in condizioni operative sensibilmente maggiori della soglia minima di rilevazione.

I dati possono essere analizzati impiegando due metodi; uno è quello delle medie progressive (molto semplice), l'altro, dinamico, detto black box, risulta più laborioso ma con una qualità dei risultati finali migliore. La differenza tra i metodi consiste nel numero di misure necessarie per compiere valutazioni affidabili.

Qualora le condizioni termiche alle quali la parete in esame è sottoposta fossero caratterizzate da regime stazionario, la trasmittanza termica si potrebbe ricavare per via sperimentale semplicemente attraverso la misura istantanea del flusso specifico ( $q$ ) e delle temperature interna ( $T_i$ ) ed esterne ( $T_e$ ).

Diversamente, gli edifici nelle condizioni operative reali, sono soggetti a condizioni al contorno fortemente variabili nel tempo, e pertanto le procedure di misura in opera dovranno prevedere una elaborazione dei dati sperimentali tale da gestire gli effetti transitori indotti dal regime termico variabile. Ciò induce nella pratica ad utilizzare al posto delle grandezze istantanee i valori medi, valutati ad istanti di tempo discreti ("n" campioni), su un periodo sufficientemente lungo.

Il metodo delle medie progressive consiste, pertanto, nel calcolare la trasmittanza utilizzando, ad ogni istante, anziché i valori istantanei di flusso e temperatura, la media progressiva dei valori di flusso e di temperature su tutti gli istanti precedenti. In questo modo, il valore calcolato tende ad approssimare asintoticamente quello che meglio rappresenta il comportamento della struttura. Mediante questa semplificazione, la trasmittanza termica viene calcolata secondo l'equazione:

$$U = \frac{\int q \cdot dt}{\int (T_i - T_e) \cdot dt} \cong \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{i,j} - T_{e,j})}$$

Nella pratica, è più agevole e affidabile effettuare il rilievo in opera della conduttanza della parete piuttosto che della trasmittanza, adottando, in seguito, coefficienti di adduzione interno ( $h_i$ ) esterno ( $h_e$ ) secondo valori previsti dalla normativa tecnica. Di conseguenza, si effettua il calcolo:

$$C = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{pi,j} - T_{pe,j})}$$

Nella equazione posta, il delta T è rappresentato dalla differenza tra le temperature superficiali interne ed esterne, misurate dai sensori di flusso applicati sulla parete.

Evidentemente, se il metodo di elaborazione scelto è quello delle medie progressive, l'accuratezza della misura aumenta all'aumentare del numero di dati raccolti.

La norma, pertanto, prevede che la rilevazione possa essere interrotta solo quando sono verificate tutte le seguenti condizioni:

- la durata del test ha superato le 72 ore;
- il valore di resistenza alla fine del test non deve differire di più del  $\pm 5\%$  rispetto al valore ottenuto dalle 24 ore precedenti;

- il valore di resistenza ottenuto, analizzando i dati per un periodo di tempo pari a  $INT(2 \times DT/3)$  giorni, non deve differire di più del  $\pm 5\%$  rispetto ai valori ottenuti nell'ultimo periodo di tempo della stessa durata; dove: DT è la durata in giorni; INT è la parte intera del numero;
- la variazione di energia accumulata è maggiore del 5% rispetto al flusso termico diretto.

La termografia è una tecnica di indagine non invasiva né distruttiva che consente di ricavare la distribuzione superficiale di temperatura di un oggetto a seguito di una sollecitazione di origine termica. Il metodo si basa sul rilevamento delle onde elettromagnetiche nella banda dell'infrarosso emesse dai corpi in funzione della loro temperatura.

La norma di riferimento è la UNI EN 13187:2000 - *“Prestazione termica degli edifici - Rivelazione qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri edilizi - Metodo all'infrarosso”*.

Una termocamera è un dispositivo che visualizza l'energia infrarossa non a contatto e la converte in segnale elettrico. Questo segnale viene poi processato per produrre un'immagine su un monitor per ottenere una misura di temperatura.

I principali parametri da impostare sono:

- il valore dell'emissività dell'oggetto da mappare: o con il metodo della temperatura di riferimento, o con il metodo dell'emissività di riferimento;
- il valore della temperatura riflessa;

- la temperatura ambiente e umidità relativa;
- la distanza.

Le indagini termografiche dovrebbero essere eseguite quando la struttura si trova in regime stazionario:

- per almeno 24 h prima dell'inizio della prova, la temperatura dell'aria esterna non deve essere maggiore di oltre  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ , rispetto alla temperatura all'inizio della prova;
- per almeno 24 h prima dell'inizio della prova, e durante la prova stessa, la differenza di temperatura dell'aria attraverso l'involucro edilizio non deve essere minore del valore numerico di  $3/U$ , e comunque mai minore di  $5^{\circ}\text{C}$ ;
- per almeno 12 h prima dell'inizio della prova e durante la prova, le superfici dell'involucro in esame, non dovrebbero essere esposte alla radiazione solare diretta;
- durante la prova, la temperatura dell'aria esterna ed interna non devono variare, rispetto ai valori rilevati all'inizio della prova, di oltre  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  e  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  rispettivamente.

Le condizioni ideali di misura quindi sono:

- condizioni atmosferiche stabili;
- cielo nuvoloso prima e durante la misura (per misure all'aperto);
- assenza di luce solare diretta prima e durante la misura;
- assenza di precipitazioni;
- superficie dell'oggetto di misura asciutta e priva di fonti termiche d'interferenza (es. assenza di foglie sulla superficie);
- assenza di vento o correnti d'aria.

Per quanto concerne la caratterizzazione dell'involucro trasparente, per ciascun componente si individua il tipo di vetro, di infisso e la presenza e tipologia di eventuali schermature. Per il vetro, si specifica se si tratta di vetro singolo o vetrocamera; se il materiale ha particolari proprietà (ad esempio, se è un vetro colorato assorbente, riflettente, di materiale traslucido e isolante trasparente, con pellicole a bassa emissività o elettrocromici). Una volta definite anche le caratteristiche del serramento, è possibile valutare la trasmittanza termica. Molto importante per stabilire la classe di tenuta all'aria/stato di manutenzione dei serramenti è l'analisi mediante Blower door test, attraverso la metodologia codificata dalla UNI EN 13829/2002, "Prestazione termica degli edifici - Determinazione della permeabilità all'aria degli edifici - Metodo di pressurizzazione mediante ventilatore".

Tutti gli indicatori energetici, e quindi i vari fabbisogni annui di energia primaria, richiesti per unità di superficie o di volume e calcolati per ogni uso energetico (riscaldamento invernale, raffrescamento e climatizzazione estiva, illuminazione artificiale degli ambienti, fabbisogno di energia per la produzione dell'acqua calda ad uso igienico-sanitario), se valutati assumendo, per il calcolo, condizioni al contorno convenzionali e non reali (temperature costanti per 24 h al giorno all'interno degli ambienti, condizioni di occupazione standardizzate, ecc.), consentono la semplice definizione di certificati energetici espressivi di una prestazione relativa e non reale, risultando funzionali al mero confronto tra prestazioni di edifici diversi, resi confrontabili proprio perché esaminati fissando condizioni di calcolo uguali anche se non veritiere.

Strumento operativo indispensabile per una diagnosi verosimile ed accurata delle prestazioni attuali e potenziali degli edifici risulta essere la simulazione termo-energetica dinamica, tipologia di analisi che supera i limiti dell'approccio stazionario basato su dati di riferimento convenzionali. Tali analisi numeriche consentono, pertanto, le necessarie valutazioni sia di tipo qualitativo (capacità di controllo dei parametri microclimatici da parte delle soluzioni impiantistiche studiate) che di tipo quantitativo (richieste energetiche), superando i limiti dello studio in condizioni di progetto, avvalendosi di dati climatici orari e variazione temporale, anche fortemente impulsiva, dei carichi endogeni. Le numerose informazioni fornite da questo tipo di analisi consentono di inquadrare problematiche e fornire soluzioni, permettendo valutazioni relative alla rispondenza di molte e diverse soluzioni progettuali, sia per quanto riguarda l'involucro edilizio (composizione delle strutture, grado di isolamento, capacità termica e parametri termofisici dinamici) che relativamente agli impianti (consentendo di confrontare diverse soluzioni progettuali, dalle configurazioni più diffuse in funzione della destinazione d'uso considerata a quelle di maggiore interesse tecnologico per quanto concerne l'aspetto di innovazione).

Una simulazione energetica del modello dinamico dell'edificio può considerarsi articolata nelle seguenti fasi:

- scelta dell'intervallo di simulazione e dei parametri di controllo del sistema;
- definizione della località e definizione dell'orientamento dell'involucro;
- costruzione del modello geometrico e dei componenti di involucro;
- caratterizzazione dei sistemi impiantistici asserviti all'edificio;

- definizione dei parametri di attività e di funzionamento del sistema edificio/impianti.

In particolare, per creare un modello dell'edificio aderente alla realtà, è necessario riportare l'esatta geometria e forma di tutte le superfici opache e trasparenti che costituiscono l'involucro edilizio, caratterizzando ciascun elemento in funzione dei dati ricavati attraverso l'audit.

Per riprodurre con accuratezza i fabbisogni reali, poi, è necessario creare tante zone termiche quante sono le effettive destinazioni d'uso censite, in modo da valutare i diversi fenomeni di trasmissione del calore e bilancio energetico in ambienti con caratteristiche sensibili spesso molto differenti sulle prestazioni globali del sistema edificio/impianti.

L'analisi dei risultati che derivati dal calcolo del fabbisogno energetico, deve consentire di ricostruire il bilancio dei flussi energetici connessi al sistema edificio-impianto, quantificando le diverse tipologie di dispersione energetica e l'incidenza di ognuna di esse rispetto al fabbisogno totale. Ciò ovviamente da la possibilità di individuare dove è più opportuno intervenire.

## 9. MIGLIORAMENTO DELLA PRESTAZIONE ENERGETICA: POSSIBILI INTERVENTI

Una volta costruito il modello energetico, e dopo averlo confrontato con i dati reali, si passa alla fase di simulazione degli interventi di riqualificazione energetica.

L'obiettivo di riduzione del fabbisogno energetico può essere raggiunto sia intervenendo sull'involucro edilizio, sia intervenendo sull'impianto. Conviene comunque partire dalle criticità riscontrate nella fase precedente per individuare gli interventi di riqualificazione energetica più appropriati.

Per quanto riguarda l'involucro edilizio, un elenco non esaustivo degli interventi è il seguente:

- Isolamento termico dei componenti opachi:
  - isolamento delle pareti esterne (cappotto termico, parete ventilata, isolamento dall'interno, ecc.);
  - isolamento della copertura;
  - isolamento del pavimento su terreno o su locali non riscaldati.
  
- Isolamento termico dei componenti trasparenti:
  - sostituzione dei componenti trasparenti;
  - sostituzione degli infissi;
  - installazione di una serra solare.

- Riduzione della trasmittanza termica periodica per migliorare le prestazioni in regime estivo:
  - isolamento con materiali a bassa diffusività;
  - utilizzo di materiali a cambiamento di fase (PCM);
  - incremento dell'inerzia dei componenti opachi per i divisori;
  - tetto verde e parete verde;;
  - pareti e coperture ventilate.
  
- Controllo della radiazione solare attraverso i componenti trasparenti:
  - sistemi di schermatura esterni;
  - sistemi di schermatura interni;
  - sostituzione dei vetri esistenti con vetri spettralmente selettivi;
  - applicazione di pellicole a controllo solare.
  
- Controllo della radiazione solare sui componenti opachi:
  - utilizzo di materiali riflettenti per il rivestimento della copertura (cool roof);
  - utilizzo di finitura superficiale esterna delle pareti caratterizzata da basso coefficiente di assorbimento solare;
  - tetto verde e parete verde;
  - pareti e coperture ventilate.

Per quanto riguarda gli interventi sugli impianti, anche in questo caso è preferibile individuare prioritariamente le criticità, in modo da selezionare gli interventi in funzione del sottosistema impiantistico che maggiormente li necessita.

Ad esempio, se l'obiettivo è migliorare il rendimento di generazione, è possibile:

- sostituzione del/i generatori per numero, tipo, potenza, rendimento;
- sostituzione dei bruciatori;
- adozione di sistemi di recupero del calore sensibile dei fumi;
- sostituzione del tipo di alimentazione.

Se le criticità riguardano invece il rendimento di distribuzione, è possibile:

- isolamento delle tubazioni e/o delle canalizzazioni;
- spostamento del percorso all'interno dei locali riscaldati.

Per migliorare il rendimento di emissione si può:

- intervenire sostituendo i terminali esistenti con altri più efficienti;
- cambiare la posizione dei corpi scaldanti.

Per migliorare il rendimento di regolazione si può:

- utilizzare sistemi di regolazione sui gruppi di generazione e distribuzione in centrale termica;
- utilizzare dispositivi di regolazione sui corpi scaldanti (Valvole termostatiche, Sensori di controllo, Controller sui ventilatori);

- utilizzare dispositivi di regolazione sulla distribuzione (Valvole a due vie, Valvole a tre vie).

Negli impianti ad aria caratterizzati da elevate portate di aria esterna è preferibile prevedere dei recuperatori di calore sull'aria espulsa.

Per evitare il funzionamento al massimo carico anche in orari di mancata utilizzazione dei locali è possibile utilizzare timer e motori a doppia polarità per il comando dei ventilatori nelle zone a occupazione prevedibile.

Per ottimizzare le prestazioni energetiche dell'impianto di illuminazione è possibile:

- utilizzare apparecchi di illuminazione ad alto rendimento;
- sostituire le lampade esistenti con altre che hanno maggiore efficienza luminosa;
- utilizzare sistemi di controllo della presenza;
- utilizzare sistemi di controllo della luce naturale;
- utilizzare sistemi di regolazione del flusso luminoso.

## **10. CASO STUDIO: SIMULAZIONI PRESTAZIONALI, ECONOMICO/FINANZIARIE**

Il caso studio proposto è *Palazzo Ex-INPS*, sede amministrativa e didattica del Dipartimento d'Ingegneria dell'Università del Sannio. L'edificio ha subito, nel secolo scorso, diverse modifiche e cambiamenti di destinazione d'uso a seguito della riprogettazione del centro cittadino, a partire dal 1926. Pur non essendo oggetto di vincoli storico-architettonici, l'edificio è un interessante caso studio poiché il contesto in cui è inserito, il centro storico di Benevento, è un esempio di "conservation area", cioè un'area il cui valore storico/artistico comporta che nulla del carattere estetico/formale dei suoi edifici possa essere mutato. Una diagnosi energetica finalizzata al retrofit della struttura è dunque interessante e articolata, ma d'altra parte - poiché l'edificio in oggetto è un edificio pubblico - in ogni caso si devono rispettare le prescrizioni circa il "ruolo esemplare degli edifici degli enti pubblici (Art. 6)", in accordo alla Direttiva 2012/27/UE.

Per sua stessa definizione, la diagnosi energetica integra dati raccolti sul campo (a seguito di sopralluoghi) con strumenti di calcolo (elaborazione di un modello matematico dell'edificio/impianti), attraverso cui individuare e analizzare interventi di riqualificazione energetica dell'edificio, sulla base dell'analisi del reale fabbisogno.

Sulla base di tali argomentazioni, pertanto, si possono individuare diverse fasi necessarie per l'esecuzione dell'analisi:

- a. caratterizzazione energetica dell'edificio;

b. simulazione tramite modello energetico dell'edificio.

Seguendo lo schema presentato nella sezione precedente si ottiene:

### Analisi dell'utenza

Nella sua configurazione attuale, l'edificio - che presenta un portico sul lato nord-est - ha una pianta rettangolare con ingombro massimo di 17.9 m × 34.0 m e altezza complessiva di 13 m.

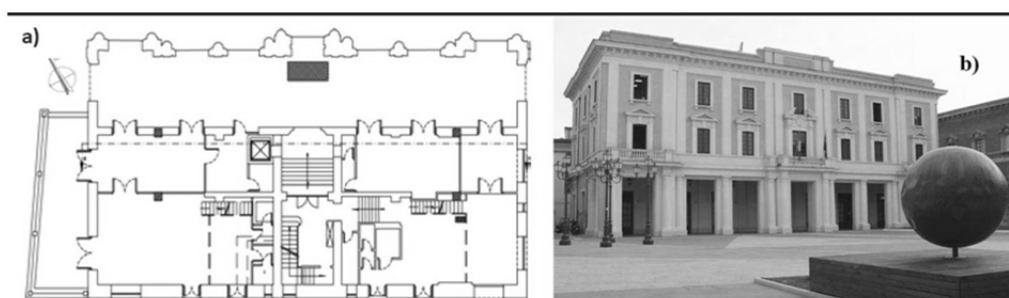


Figura 4: a) pianta del piano tipo; b) facciata principale dell'edificio (Piazza Roma)

La Tabella mostra i principali dati geometrici e la percentuale della superficie vetrata per esposizione. La superficie netta climatizzata è pari a circa 1311 m<sup>2</sup> e il “rapporto di forma” (S/V) è pari a 0.40 m<sup>-1</sup>.

**Tabella 3: Principali dati geometrici**

	Totale	Nord	Est	Sud	Ovest
Superficie Laterale totale [m <sup>2</sup> ]	1314.5	439.9	212.8	448.9	212.8
Superficie trasparente [m <sup>2</sup> ]	204.4	75.1	30.1	70.7	28.5
Rapporto finestrato-opaco [%]	15.6	17.1	14.2	15.7	13.4

Relativamente alla destinazione d'uso, al piano terra dell'edificio i locali sono adibiti ad aule universitarie, mentre al secondo e terzo piano ci sono i laboratori e gli studi dei docenti del Dipartimento di Ingegneria. Attraverso un censimento diretto, sono stati caratterizzati i dati relativi al carico interno in termini di apparecchiature elettriche e occupanti, ed è stato caratterizzato il sistema di illuminazione. Per uniformità di trattazione, i valori ricavati verranno presentati nella caratterizzazione delle zone termiche nel sotto-paragrafo relativo alla costruzione del modello di simulazione. Il profilo di occupazione, coerentemente all'utilizzo della struttura, è stato assunto dalle 9:00 alle 18:00, tutti i giorni ad eccezione del fine-settimana e dei periodi festivi. Ad agosto, si è considerato come periodo non lavorativo i 10 giorni centrali del mese.

Per effettuare una diagnosi energetica, è fondamentale ricostruire il profilo caratteristico di assorbimento energetico attraverso l'analisi dei consumi storici. Tali consumi energetici sono stati dedotti, per l'edificio in esame, dall'acquisizione e dallo studio delle fatturazioni sui pagamenti relativi alle forniture elettriche degli anni 2007-2014, essendo l'energia elettrica l'unico vettore energetico che effettivamente serve l'edificio. L'elaborazione dei dati deve tenere in considerazione molti fattori, in particolare il fatto che dalle distinte dei contratti di fornitura elettrica non si evince la suddivisione del fabbisogno per le diverse voci di carico. Per riuscire a scorporare il fabbisogno elettrico destinato all'impianto di climatizzazione è necessario incrociare i dati delle fatture energetiche con i profili di utilizzo degli impianti e con le informazioni sui carichi ricavate dal censimento dei dispositivi elettrici e del sistema di illuminazione.

Con riferimento alla domanda per la climatizzazione invernale ed estiva la domanda elettrica è di 63.1 MWh<sub>el</sub>. Considerando mediamente il rendimento del parco

termoelettrico italiano pari a 0.42 e che il volume climatizzato è circa 5'790 m<sup>3</sup>, il fabbisogno di energia primaria in inverno è 23 kWh/m<sup>3</sup> e in estate 11 kWh/m<sup>3</sup>.

### Audit d'involucro edilizio

A partire dall'analisi termografica, si è riscontrato che i componenti trasparenti sono la parte dell'involucro edilizio più disperdente; nell'edificio c'è un unico tipo di componente finestrato con singolo vetro chiaro e infisso di legno. Il valore di trasmittanza considerato per tale componente è 5.8 W/(m<sup>2</sup> K).

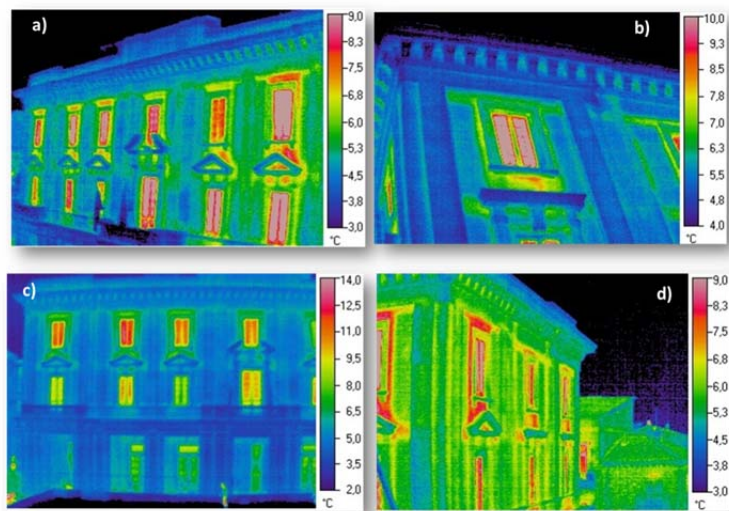


Figura 5: Termografie: a) c) Vista frontale da piazza Roma; b) Finestre lato sud; d) Facciata lato est

L'ispezione termografica inoltre ha mostrato che gli infissi non sono sempre a tenuta e le connesse infiltrazioni comportano sia un carico termico aggiuntivo in inverno che un forte discomfort localizzato, dovuto a correnti d'aria.

La medesima analisi termografica ha consentito di individuare i ponti termici e di ottimizzare il posizionamento dei sensori termoflussimetrici per il rilievo della conduttanza in opera.

In particolare, la misura è stata eseguita per cinque giorni nel mese di Marzo 2013, come riportato nella figura 6. Avendo selezionato come tempo di campionamento 1800 s, in accordo ai metodi previsti dallo standard ISO 9869, sono state elaborate 280 misure. La differenza di temperatura tra interno ed esterno è stata di circa 12°C, per cui come evidenziato nell'andamento della conduttanza riportato in Figura, superata la forte oscillazione del primo giorno, l'andamento del flusso e quindi della conduttanza, tende a stabilizzarsi per mantenersi quasi costante negli ultimi due giorni di rilevazione. La trasmittanza calcolata a regime risulta pari a 0.74 W/(m<sup>2</sup> K). La trasmittanza determinata a partire dalla misura in opera della conduttanza è stata confrontata con quella calcolata attraverso la metodologia specificata dalla EN ISO 6946. Dalle analisi condotte, si è ricavato che la tompagnatura esterna è costituita da muratura in mattoni pieni con uno spessore totale di 0.64 m, per cui dal calcolo analitico si ottiene una trasmittanza di 0.76 W/(m<sup>2</sup> K). Lo scostamento tra il valore misurato e il valore ricavato è dunque del 3%.

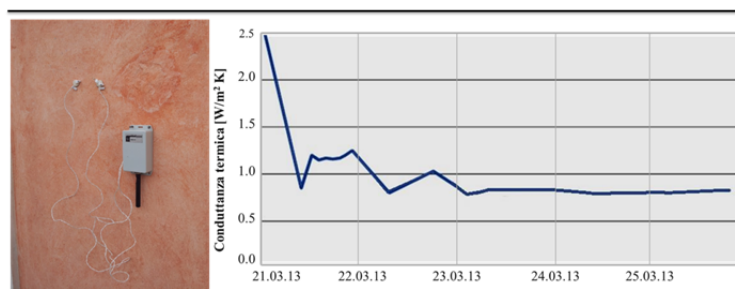


Figura 6: Misura in opera della conduttanza termica

Il solaio di terra è in calcestruzzo con uno spessore complessivo di 0.30 m, mentre la copertura ha una struttura in latero-cemento, con uno spessore totale di 0.35 m. Conoscendo la stratigrafia si è proceduto al calcolo analitico della trasmittanza, che risulta per il solaio di terra pari a  $2.71 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  e per il solaio di copertura pari a  $1.36 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

### **Anagrafe del patrimonio impiantistico**

La produzione dei fluidi termo-vettori per la climatizzazione invernale ed estiva è operata mediante utilizzo di una pompa di calore elettrica (EHP) reversibile del tipo aria/acqua, con una capacità in riscaldamento (raffrescamento) di 277 kW (245 kW). I coefficienti di prestazione della macchina, in condizioni nominali, sono pari a:

- $2.89 \text{ W}_{\text{ter}}/\text{W}_{\text{el}}$  (COP) in riscaldamento;
- $2.63 \text{ W}_{\text{ter}}/\text{W}_{\text{el}}$  (EER) in raffrescamento.

È presente un solo scambiatore refrigerante/acqua, a fascio tubiero, di tipo a più circuiti frigoriferi ad espansione diretta. Il refrigerante circola quindi all'interno dei tubi che sono disposti a pettine, mentre l'acqua circola nel lato mantello dove è opportunamente convogliata da appositi setti. Le batterie di scambio refrigerante/aria sono costruite con tubi di rame senza saldature disposti su ranghi sfalsati e meccanicamente espansi in un pacco di alette corrugate di alluminio. I ventilatori delle batterie di scambio refrigerante/aria sono direttamente accoppiati al motore e sono di tipo elicoidale con ventola dotata di pale in alluminio con profilo alare.

I circuiti frigoriferi sono realizzati con tubazioni in rame ACR; ognuno di essi è dotato di valvola a quattro vie per l'inversione del ciclo frigorifero, di valvole termostatiche di espansione con equalizzazione esterna, di valvole a solenoide e di separatori di liquido. La dotazione di ogni circuito frigorifero è completata da valvole di intercettazione lato refrigerante e lato liquido, da un filtro disidratatore o da un filtro a rete, da un vetro spia con indicatore di umidità, da un pressostato di alta pressione, da un pressostato di bassa pressione, da un pressostato differenziale dell'olio e da una valvola di sicurezza. Per quanto riguarda l'adduzione e la sottrazione di energia termica, i terminali utilizzati negli ambienti sono ventilconvettori.

### **Modello di simulazione dinamica dell'edificio**

La costruzione geometrica del modello di simulazione dell'edificio è stata fatta, attraverso Design Builder.

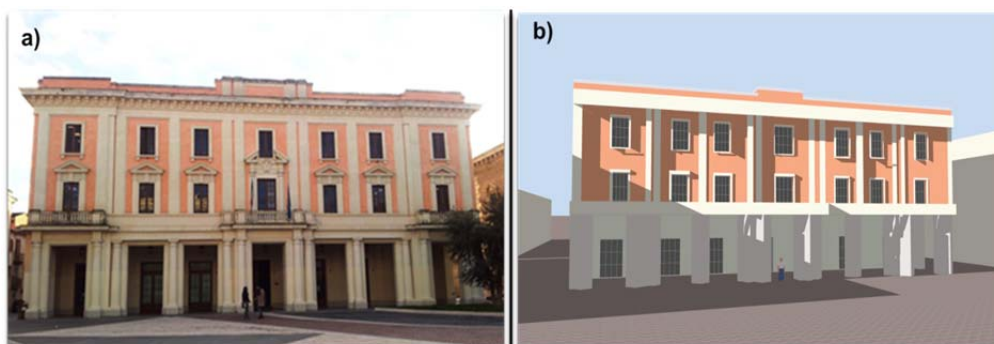


Figura 7: a) Edificio reale; b) Modello di simulazione

Definita la geometria e i principali parametri costruttivi, in accordo a quanto rilevato con l'audit d'involucro, il modello è stato esportato in EnergyPlus (v.7.2.0), dove è stato ricostruito l'impianto asservito all'edificio.

Relativamente ai carichi interni, per modellare il sistema secondo la sua reale destinazione d'uso, sono state create cinque zone termiche le cui caratteristiche principali sono riportate in Tabella. Il tasso di rinnovo dell'aria è stato fissato a 1.4 AHC.

**Tabella 4: Dati di caratterizzazione delle zone termiche**

Zona	Occupazione[m <sup>2</sup> /pers]	Carico [W/m <sup>2</sup> ]	Illuminazione [W/m <sup>2</sup> ]
Aule	5.0	7.0	8.0
Uffici	10	12.0	8.0
Laboratori	4.3	18.0	8.0
Bagni	9.4	4.0	8.0
Corridoio/scale	9.4	2.0	8.0

Il periodo di riscaldamento è quello convenzionale 15 Novembre – 31 Marzo e il periodo di raffrescamento tra il 1 Giugno e il 30 Settembre. La temperatura di set-point nel periodo invernale è stata fissata a 20°C mentre il periodo di accensione dell'impianto è stato considerato dalle 8:00 alle 18:00 dal lunedì al venerdì. Nel periodo estivo il set-point di temperatura è 26°C, e l'accensione dell'impianto è programmata dalle 10:00 alle 18:00, sempre dal lunedì al venerdì.

La scelta dei parametri impostati consente di affermare che il modello è calibrato se confrontato ai valori di tolleranza proposti dalla letteratura scientifica. Infatti l'MBE è 4% mentre il CV(RMSE<sub>mensile</sub>) è il 9.0%.

### **Retrofit energetico di Palazzo EX-INPS**

Per valutare le emissioni equivalenti, il fattore considerato è 0.523 kgCO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub>.

Con riferimento agli indicatori economici utilizzati (TRA e VAN), è stato assunto un prezzo standard per il consumo di energia elettrica così come riportato da con riferimento al 2013, pari a 0.23 €/kWh<sub>el</sub>. Poiché, come sottolineato dagli ultimi provvedimenti europei, un'analisi economica dovrebbe considerare simultaneamente l'evoluzione dei prezzi dell'energia e dei tassi di attualizzazione, per questo caso studio sono stati ipotizzati diversi scenari, al fine di valutare nel modo più verosimile possibile la convenienza economica degli interventi. Inoltre, nello studio di fattibilità, è stata valutata la possibilità di accedere agli incentivi previsti dal Decreto Ministeriale 28 Dicembre 2012, il cosiddetto "Conto Termico", che incentiva anche opere di riqualificazione su edifici pubblici e ad uso pubblico.

**Tabella 5: Tassi di attualizzazione per diversi scenari**

	Tasso di attualizzazione [%]	Incremento prezzo energia elettrica [%]	Tasso netto di attualizzazione [%]
Molto sfavorevole	5	1	4
Sfavorevole	4	2	2
Neutro	3	3	0
Favorevole	2	4	-2
Molto favorevole	1	5	-4

Gli interventi consistono in:

- **Riduzione delle infiltrazioni**

La prima misura di miglioramento è il controllo delle infiltrazione di aria esterna. L'intervento di ripristino richiede la sostituzione del blocco di ancoraggio vetro, la sostituzione o manutenzione dei telai rovinati e l'adozione di nuove guarnizioni se necessario. Per tale intervento si può stimare un costo medio di circa 40 €/m<sup>2</sup>, che significano intorno a 8'160 € per l'intero edificio.

- **Sostituzione dei componenti finestrati**

La Tabella riassume le principali caratteristiche tecniche e il costo inclusivo di messa in opera. Per tutte le tipologie di componente finestrato, si è considerato un telaio in legno e alluminio. Ancora, è stata valutata anche la possibilità di differenziare la scelta del componente finestrato per esposizione; in particolare, si è ipotizzato di installare

vetrocamera selettivi per le finestre a sud e vetrocamera basso-emissivi sulle restanti esposizioni.

**Tabella 6: Caratteristiche tecniche e costo dei componenti finestrati**

Soluzioni	Intercapedine	Uw[W/m <sup>2</sup> K]	Fattore solare [%]	Costo [€/m <sup>2</sup> ]
Vetrocamera senza rivestimento 4/16/4	Argon	2.2	76	310
Vetrocamera basso-emissivo 4/16/4	Argon	1.5	61	325
Vetrocamera a controllo solare 6/12/6	Argon	1.7	32	321
Vetrocamera selettivo 6/16/6	Argon	1.6	43	326

- **Miglioramento dell'isolamento termico dell'involucro edilizio**

Due sono gli interventi di isolamento termico dell'involucro opaco valutati: l'isolamento delle pareti verticale e l'isolamento del solaio di copertura.

La conservazione dell'attuale aspetto delle facciate esterne vincola l'intervento di isolamento all'applicazione di 5.0 cm di termo-intonaco (e annessa barriera al vapore ove necessario) sul lato interno. Il materiale utilizzato ha una conducibilità termica pari a 0.058 W/(m K), pertanto la trasmittanza termica della parete diventa 0.46 W/(m<sup>2</sup> K).

L'isolamento termico del solaio di copertura può essere incrementato senza compromettere le caratteristiche dell'edificio. In particolare, si è considerata l'applicazione di una lastra di 10 cm di polistirene espanso che consente di ottenere una trasmittanza complessiva del solaio di  $0.27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

- **Applicazione di un intonaco PCM**

L'ultimo intervento ipotizzato consiste nell'applicazione, lato interno, di un intonaco a cambiamento di fase con un punto di fusione di  $27^\circ\text{C}$  ed una entalpia latente di fusione pari a  $110 \text{ kJ}/\text{kg}$ . Avendo dunque previsto una ventilazione notturna (3 ACH).

La Tabella, con riferimento alle singole misure di efficienza energetica in esame, sintetizza i risultati dei parametri energetici, ambientali ed economici utilizzati. Da queste analisi è emerso che gli interventi più convenienti, considerando anche la vita utile stimata sono l'isolamento del solaio di copertura e la sostituzione dei componenti vetrati con infissi in legno e alluminio e vetrocamera basso-emissivo.

**Tabella 7: Risultati di simulazione**

Azione	Annuale	Inverno	Estate	Scenario neutro	
	$\Delta E \approx \Delta CO_2$ [%]			TRA [anni]	VAN [€]
<b>Termointonaco</b>	5.2%	8.2%	-2.1%	>20	-
<b>Isolamento copertura</b>	5.1%	6.2%	2.4%	19	21
<b>Infiltrazione</b>	41.2%	30.3%	4.2%	3	52'690
<b>Vetri basso-emissivi</b>	26.7%	33.3%	10.6%	11	31'849
<b>Vetrocamera chiaro</b>	25.1%	32.3%	7.7%	11	29'459
<b>Vetri selettivi</b>	23.8%	25.9%	18.8%	13	24'124
<b>Vetri a controllo solare</b>	23.5%	24.3%	21.4%	13	23'726
<b>Vetri differenziati</b>	24.1%	25.7%	20.0%	11	24'930
<b>PCM esterno</b>	2.5%	-	8.5%	>20	-
<b>PCM interno</b>	2.4%	-	8.3%	>20	-

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] European Parliament. European Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC, 25 Ottobre 2012.
- [2] European Parliament. European Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings, 16 Dicembre 2002.
- [3] European Parliament. European Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast), 19 Maggio 2010.
- [4] Parlamento della Repubblica Italiana. Decreto legislativo del 19 Agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia (G.U. n. 222 del 03.09.2005).
- [5] Parlamento della Repubblica Italiana. Legge del 3 Agosto 2013, n.90. Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63, recante disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché' altre disposizioni in materia di coesione sociale (GU Serie Generale n.181 del 3-8-2013).

[6] European Parliament. European Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, 23 Aprile 2009.

[7] European Parliament. European Directive 2009/29/EC of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading scheme of the Community, 23 Aprile 2009.

[8] Parlamento della Repubblica Italiana. Legge del 9 Gennaio 1991, n. 10. 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 (Supplemento Ordinario n. 6, GU n.13 del 16.1.1991 ).

[9] Parlamento della Repubblica Italiana. Regolamento di esecuzione D.P.R. del 26 Agosto 1993, n. 412. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della Legge 9 gennaio 1991, n. 10 (Supplemento Ordinario n. 6, GU n.242 del 14.10.1993).

[10] Parlamento della Repubblica Italiana. Decreto legislativo del 29 Dicembre 2006, n. 311. Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia (Supplemento Ordinario n.26, GU n. 26 del 1.2.2007).

[11] Parlamento della Repubblica Italiana. Regolamento di esecuzione D.P.R. del 2 Aprile 2009, n. 59. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b),

del decreto legislativo 19 Agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia (GU n. 132 del 10.6.2009).

[12] UNI - Italian Organization for Standardization. Standard UNI/TS 11300 - Parte I: Prestazione energetica degli edifici-Determinazione del fabbisogno di energia dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, 2014.

[13] UNI - Italian Organization for Standardization. Standard UNI/TS 11300 - Parte II: Prestazione energetica degli edifici-Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria, 2014.

[14] UNI - Italian Organization for Standardization. Standard UNI TS 11300 - Parte III: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva, 2010.

[15] UNI - Italian Organization for Standardization. Standard UNI TS 11300 - Parte IV: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria, 2012.

[1] UNI - Italian Organization for Standardization. Standard UNI TS 11300 - Parte V. Prestazioni energetiche degli edifici –Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili, 2016.

[2] UNI - Italian Organization for Standardization. Standard UNI TS 11300 - Parte VI: Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 6: Determinazione del fabbisogno di energia per ascensori, scale mobili e marciapiedi mobili, 2016.

[16] Decreto Interministeriale del 26 Giugno 2015. Decreto requisiti minimi.

[17] Parlamento della Repubblica Italiana. Decreto legislativo del 3 marzo 2011, n. 28. Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE (Supplemento Ordinario n. 81 GU n.71 del 28.3.2011).

[18] Parlamento della Repubblica Italiana. Decreto Ministeriale del 28 dicembre 2012. Incentivazione della produzione di energia termica da fonti rinnovabili ed interventi di efficienza energetica di piccole dimensioni (Supplemento Ordinari n. 1 GU n.1 del 2.1.2013).

[19] Comitato Termotecnico Italiano. Raccomandazione. CTI 14/2013: Prestazioni energetiche degli edifici - Determinazione dell'energia primaria e della prestazione energetica EP per la classificazione dell'edificio, 18 Febbraio 2013.

[20] UNI - Italian Organization for Standardization. UNI EN 15193: Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione, 2008 (con Errata corrige del 22-02-2011 ).

[21] UNI - Italian Organization for Standardization. UNI EN 15459: Prestazione energetica degli edifici - Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici, 2008.

[22] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Handbook – Fundamentals, Atlanta GA, USA, 2013.

[23] CEN – European Committee for Standardization. EN 15243: Ventilation for buildings - Calculation of room temperatures and of load and energy for buildings with room conditioning systems, 2007.

[24] CEN – European Committee for Standardization. EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, 2007.

[25] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 6946: Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method (ISO 6946:2007), 2007.

[26] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 13786: Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods, 2007.

[27] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 10456: Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values (ISO 10456:2007), 2007.

[28] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 10077-1: Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General (ISO 10077-1:2006), 2006.

[29] UNI - Italian Organization for Standardization. UNI 10339: Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti, 1995.

[30] UNI - Italian Organization for Standardization. UNI 10349-1: Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare

nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata, 2016.

[31] UNI - Italian Organization for Standardization. UNI 10349-2: Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 2: Dati di progetto, 2016. ;

[32] UNI - Italian Organization for Standardization. UNI 10349-3: Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 3: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici sintetici, 2016.

[33] UNI - Italian Organization for Standardization. UNI 10351: Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore, 1994.

[34] CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI EN ISO 10456: Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values, Errata corrige del 07.10.2010 alla UNI EN ISO 10456:2008.

[35] CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI CEI/TR 11428: Gestione dell'energia - Diagnosi energetiche - Requisiti generali del servizio di diagnosi energetica, 2011.

[36] CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI CEI EN 16247-1: Diagnosi energetiche - Parte 1: Requisiti generali, 2012.

[37] CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI CEI EN 16247-2: Diagnosi energetiche – Parte 2: Edifici, 2014.

[38] CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI CEI EN 16247-3: Diagnosi energetiche – Parte 3: Processi, 2014.

- [39] CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI CEI EN 16247-4: Diagnosi energetiche – Parte 4: Trasporto, 2014.
- [40] CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI CEI EN 16247-5: Diagnosi energetiche – Parte 5: Competenze dell'auditor energetico, 2014.
- [41] ISO - International Organization for Standardization. ISO 50001-1 : Energy Management systems - Requirements with guidance for use, 2011.
- [42] ISO - International Organization for Standardization. ISO 50002: Energy audits - Requirements with guidance for use, 2012.
- [43] ISO - International Organization for Standardization. ISO 50003: Energy management systems - Requirements for bodies providing audit and certification of energy management systems, 2014.
- [44] ISO - International Organization for Standardization. ISO 50004: Energy management systems — Guidance for the implementation, maintenance and improvement of an energy management system, 2014.
- [45] ISO - International Organization for Standardization. ISO 50005: Energy management systems - Measurement and verification of energy performance of organizations - General principles and guidance, 2014.
- [46] ISO - International Organization for Standardization. ISO 50006: Energy management systems — Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) — General principles and guidance, 2014.
- [47] CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI CEI EN 16212: Calcoli dei risparmi e dell'efficienza energetica - Metodi top-down (discendente) e bottom-up (ascendente), 2012.

[48] ISO - International Organization for Standardization. ISO 9869: Thermal insulation, Building elements, In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance, 1994.

[49] ASHRAE Guideline 14/2002. Measurement of Energy and Demand Savings. Approved by the ASHRAE Standards Committee, 22 Giugno 2002, and by the ASHRAE Board of Directors, 27 Giugno 2002.

[50] Ascione F., Bianco N., De Masi R.F., de' Rossi F., Vanoli G.P. Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the his-torical value. Contributo in Atti di Convegno: 49th Edition of AiCARR International Conference, Historical and existing buildings: designing the retrofit, Roma, 26-28 Febbraio 2014



Il Centro Sperimentale di Sviluppo delle Competenze nell'area delle Costruzioni "Edil Lab" è promosso dalla Regione Campania e rappresenta uno strumento innovativo di integrazione e interazione tra i diversi attori politico-istituzionali ed economici del territorio, un "luogo" aperto e funzionale a stabili attività di sviluppo del capitale umano, abilitato a programmare iniziative formative e a favorire un sempre più effettivo incontro tra domanda e offerta di lavoro nell'edilizia.

Edil Lab rappresenta un modello innovativo che mette a sistema il mondo delle imprese, l'alta formazione, gli organismi di rappresentanza, l'Università, gli istituti scolastici e la scuola di formazione del settore edile ed ha, tra le principali finalità, l'istituzione di un Osservatorio permanente al fine di monitorare il sistema delle imprese e i fabbisogni di competenze necessari per lo sviluppo e l'incremento della competitività del settore delle costruzioni in Campania.

La collana di monografie, prodotte nell'ambito del Progetto Edil Lab, di cui la presente è parte, costituisce in tal direzione un insieme di vademecum di supporto alle finalità di aggiornamento e sviluppo delle competenze in edilizia.

La presente pubblicazione fa parte di una più ampia produzione – una vera e propria “collana” - di monografie multidisciplinari relativa all’edilizia, realizzata dalle imprese partners del Progetto Edil-lab, che costituisce, nell’insieme, un utile strumento di aggiornamento professionale per gli operatori attivi nel settore delle costruzioni.



Edizioni Graffiti

ISBN 978-8886 98 381 5



9 788886 983815