



Università IUAV di Venezia

Dottorato in Architettura, città e design

XXXIV Ciclo

Curriculum Nuove Tecnologie e Informazione per l'Architettura, la Città e il Territorio

**RIQUALIFICAZIONE DI QUARTIERI RESIDENZIALI CON INTERVENTI DI
EFFICIENZA ENERGETICA E INTEGRAZIONE DI ENERGIE RINNOVABILI**

Dottorando Tiziano DALLA MORA

Tutor Prof. Fabio PERON

Tutor Prof. Massimiliano SCARPA

ABSTRACT

Gli edifici sono una delle principali fonti di emissioni di gas a effetto serra e risulta particolarmente impegnativa una riduzione efficace e conveniente dei consumi energetici e delle relative emissioni per il patrimonio edilizio esistente, soprattutto a causa dell'esistenza di ostacoli architettonici e tecnici. La trasformazione degli edifici esistenti in edifici a basse emissioni e a basso consumo energetico è particolarmente impegnativa nelle città, dove molti edifici continuano a dipendere troppo dalla fornitura di calore dai combustibili fossili.

Il tema della ricerca mira a studiare le strategie più economicamente convenienti per ridurre le emissioni di carbonio e il consumo di energia negli edifici su scala urbana combinando le misure di efficienza energetica con quelle per l'uso di energia rinnovabile.

In base a quanto siglato nel 2015 nell'Accordo di Parigi e all'obiettivo di intraprendere sforzi per limitare i cambiamenti climatici a un aumento della temperatura di 1.5 °C al di sopra dei livelli preindustriali, è di particolare interesse studiare strategie che consentano di raggiungere emissioni zero a costi contenuti e soluzioni basate sull'energia rinnovabile come obiettivi prefissati.

Le città, e in generale i distretti urbani, sono i maggiori centri di consumo energetico nel mondo, con più del 70% della domanda globale di energia primaria e il 40-50% delle emissioni di gas serra (GHG) attribuite alle aree urbane. La comunità europea ha raccomandato e incentivato a perseguire gli obiettivi della neutralità climatica in Europa entro il 2050 esposti nell'European Green Deal attraverso interventi di riqualificazione nei quartieri e nell'edilizia residenziale pubblica.

Considerati i limiti dovuti alle risorse finanziarie disponibili e alla grande quantità di investimenti necessari per trasformare il consumo energetico delle città negli edifici, l'identificazione di strategie economicamente vantaggiose è importante per accelerare la necessaria transizione verso i distretti urbani a basse emissioni e a basso consumo energetico.

Sono fissati diversi obiettivi di ricerca.

L'obiettivo principale è la **definizione** e la **gestione di un sistema di district energy** basato su misure e tecnologie a basso consumo energetico e basso impatto ambientale per il settore residenziale a scala urbana e di quartiere.

Viene presentato quindi un **quadro dello stato dell'arte** sul tema effettuando una literature review, analizzando la letteratura scientifica e di settore, e in particolare vengono descritte le **best practices** e le **success stories** di progetti e programmi europei realizzati o in via di sviluppo.

Questo studio quindi intende presentare, sviluppare e verificare una **metodologia** di intervento per identificare le strategie di riqualificazione energetica efficace e conveniente.

A tale scopo vengono testati e tarati alcuni **tool di calcolo** al fine di evidenziare limiti e i vantaggi due metodologie di simulazione dinamica e semi-stazionaria degli edifici, soprattutto in funzione dell'utente che intende applicare la metodologia esposta o indagare i possibili interventi di efficienza energetica su scala urbana.

Viene effettuata un'**analisi economica** dei costi per interventi di ristrutturazione e di riqualificazione energetica di edifici residenziali nel contesto italiano, in particolare per la Regione Veneto, in relazione e in prospettiva di sistemi di rete centralizzati (ad esempio teleriscaldamento).

Ai fini della validazione della metodologia e del test su tool di calcolo e simulazione è stato selezionato un **caso studio** che fosse rappresentativo del panorama edilizio italiano in termini di tipologia edilizia, vetustà, opportunità e replicabilità di intervento. Nello specifico è stato individuato il Quartiere Santa Marta di Venezia, che rappresenta un tipo di distretto di abitazione residenziali pubbliche del primo Novecento molto diffuso nel territorio italiano.

La tesi espone gli **scenari ottimali** di intervento a livello di involucro architettonico e impiantistico per il caso studio e ne discute i risultati con lo scopo di ricavare delle linee guida per individuare strategie e per replicare il progetto su distretti simili.

INDICE

| | |
|--|-------------|
| ABSTRACT | I |
| INDICE | III |
| LISTA FIGURE | V |
| LISTA TABELLE | VII |
| ABBREVIAZIONI | VIII |
| 1. INTRODUZIONE | 1 |
| 1.1. STRUTTURA E METODOLOGIA DELLA RICERCA. | 5 |
| 2. STATO DELL'ARTE | 7 |
| 2.1. QUADRO NORMATIVO EUROPEO E ITALIANO | 7 |
| 2.1.1. <i>Riepilogo</i> | 14 |
| 2.2. PROGETTI ED ESPERIENZE DI RIQUALIFICAZIONE URBANA IN PROSPETTIVA DI SMART CITIES | 15 |
| 2.2.1. <i>Discussione casi pilota esemplari in città italiane</i> | 19 |
| 2.2.2. <i>Riepilogo</i> | 24 |
| 2.3. UBEM, MODELLAZIONE E STRUMENTI DI CALCOLO SOFTWARE | 26 |
| 2.3.1. <i>UBEM, modellazione e simulazione energetica urbana</i> | 26 |
| 2.3.2. <i>Strumenti di calcolo per la simulazione energetica degli edifici</i> | 28 |
| 2.3.1. <i>Riepilogo</i> | 31 |
| 3. METODOLOGIA | 33 |
| 3.1. COST-OPTIMAL METHODOLOGY | 33 |
| 3.1.1. <i>Riepilogo</i> | 46 |
| 3.2. DEFINIZIONE DEI FATTORI DI CONVERSIONE, DEI COSTI ENERGETICI E DELLE EMISSIONI AMBIENTALI. | 47 |
| 3.2.1. <i>Riepilogo</i> | 60 |
| 4. STRUMENTI | 63 |
| 4.1. CALCOLO IN REGIME DINAMICO CON IL SOFTWARE CITY ENERGY ANALYST CEA | 63 |
| 4.2. CALCOLO IN REGIME DINAMICO CON IL SOFTWARE EURECA | 64 |
| 4.3. CALCOLO IN REGIME SEMI-STAZIONARIO CON FOGLIO DI CALCOLO | 65 |
| 5. CASO STUDIO – QUARTIERE SANTA MARTA A VENEZIA | 71 |
| 5.1. PROLOGO | 71 |
| 5.2. QUADRO STORICO E URBANO DELL'AREA DI SANTA MARTA DI VENEZIA | 71 |
| 5.3. TRASFORMAZIONI DELL'ASSETTO URBANO E COSTRUZIONE DEL COTONIFICIO 1867- 1913 | 73 |
| 5.4. GLI INTERVENTI DELLO IACP | 75 |
| 5.5. IL QUARTIERE SANTA MARTA | 76 |
| 5.6. LE CARATTERISTICHE ARCHITETTONICHE, GEOMETRICHE E TERMOFISICHE NELLO STATO ATTUALE | 79 |
| 5.6.1. <i>Definizione delle geometrie degli edifici</i> | 81 |
| 5.6.2. <i>Definizione delle tecnologie</i> | 83 |
| 5.7. IL QUARTIERE OGGI | 86 |
| 5.8. RIEPILOGO | 88 |
| 6. APPLICAZIONE | 89 |
| 6.1. CONFRONTO E TARATURA METODO DI CALCOLO SEMPLIFICATO E DINAMICO | 89 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6.1.1. | <i>Metodologia e settaggio delle simulazioni al computer</i> | 89 |
| 6.1.2. | <i>Risultati</i> | 93 |
| 6.1.3. | <i>Discussione</i> | 97 |
| 6.1.4. | <i>Conclusioni</i> | 98 |
| 6.1.5. | <i>Riepilogo</i> | 99 |
| 6.2. | CALCOLO DEL CASO STUDIO DEL QUARTIERE DI S. MARTA A VENEZIA | 100 |
| 6.2.1. | <i>Il caso Reference</i> | 100 |
| 6.2.2. | <i>Definizione dello schema di interventi di riqualificazione</i> | 108 |
| 6.2.3. | <i>Definizione degli interventi architettonici</i> | 109 |
| 6.2.1. | <i>Definizione degli interventi impiantistici</i> | 112 |
| 7. | RISULTATI DEL CASO STUDIO | 121 |
| 7.1. | PRESTAZIONI ENERGETICHE | 121 |
| 7.1.1. | <i>Interventi architettonici</i> | 121 |
| 7.1.2. | <i>Interventi impiantistici e rete di impianto centralizzato</i> | 122 |
| 7.2. | COSTI GLOBALI | 128 |
| 7.2.1. | <i>Interventi architettonici</i> | 128 |
| 7.2.2. | <i>Interventi impiantistici e rete di impianto centralizzato</i> | 129 |
| 7.2.3. | <i>Costo globale attualizzato</i> | 131 |
| 7.3. | INDIVIDUAZIONE RISULTATI OTTIMALI (COST OPTIMAL SOLUTIONS) | 133 |
| 8. | DISCUSSIONE | 137 |
| 9. | CONCLUSIONI | 143 |
| | PUBBLICAZIONI | 147 |
| | BIBLIOGRAFIA | 153 |

Lista figure

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Allocazione delle risorse PNRR alle Missioni. | 13 |
| Figura 2 – Approcci di modellazione UBEM | 27 |
| Figura 3 – Schema delle voci che compongono il Costo Globale. | 35 |
| Figura 4 – descrizione grafica dell'attualizzazione dei prezzi annuali. | 35 |
| Figura 5 – Distribuzione dei costi globali per vari interventi di riqualificazione energetica. | 36 |
| Figura 6 – Panoramica della corrispondenza tra fabbisogno e consumo di energia primaria. | 38 |
| Figura 7 – Classificazione dei costi secondo il quadro metodologico della Direttiva EU EPBD recast [19]. | 40 |
| Figura 8 – Panoramica dei flussi di denaro relativi ai costi energetici e ai costi di manutenzione/operativi. | 41 |
| Figura 9 – Panoramica dei confini di sistema e degli scambi di energia (RES – Renewable Energy Sources; FF – Fossil Fuels). | 43 |
| Figura 10 – Andamento del prezzo dell'energia elettrica e del gas naturale per un consumatore domestico tipo in maggior tutela. Si fa riferimento a condizioni economiche di fornitura per una famiglia con 3 kW di potenza elettrica impegnata e 2.700 kWh di consumo annuo per l'elettricità, mentre per il gas naturale a riscaldamento autonomo e consumo annuale di 1.400 m ³ (Fonte: ARERA, Eurostat database). | 49 |
| Figura 11 – Scenario dell'andamento dei prezzi dei vettori energetici espresso in €/kWh per il periodo di service life dal 2020 al 2050. | 50 |
| Figura 12 – Serie storica del prezzo PUN energia elettrica medio mensile, espresso in €/MWh, dal 2004 al 2021 (Fonte: Pricepedia). | 52 |
| Figura 13 – Serie storica del prezzo della CO ₂ , espresso in euro per tonnellata, dal 2017 al 2021. | 53 |
| Figura 14 – Dinamica del prezzo mensile del gas naturale quotato al TTF olandese, espresso in EUR/MWh, e con scenario di previsione ipotizzato da fine 2021 a fine 2023. | 54 |
| Figura 15 – Scenario ipotizzato fino al 2023 con previsione del prezzo mensile del gas naturale quotato al TTF olandese, espresso in EUR/MWh (Fonte: Trading Economics) | 55 |
| Figura 16 – Previsione andamento del PUN energia elettrica, espresso in €/MWh, dal dicembre 2021 a fine 2024 (Fonte: Pricepedia). | 55 |
| Figura 17 – Concentrazione di livelli di particolato PM2.5 medio annuale, relativo a misurazioni dell'aria del 2019 e 2020 nelle 400 stazioni di monitoraggio in EU (Fonte: EEA). | 57 |
| Figura 18 – Concentrazione di livelli di particolato PM10 medio giornaliero, previsione ENEA. | 57 |
| Figura 19 – Concentrazione di particolato PM10, espresso in Gg, rilevato in Italia nel periodo 2005- 2019 e suddiviso per categorie di impatto. | 58 |
| Figura 20 – Emissioni di PM10 equivalente in Emilia Romagna. La larghezza della banda è proporzionale al "PM10 equivalente (Fonte: La qualità dell'aria in Emilia-Romagna. Edizione 2018 di ARPAE). | 58 |
| Figura 21 – Emissioni di particolato PM10, espresso in t/mese, rilevato nel 2019 nel Comune di Torino e nella Regione Piemonte (Fonte: ARPAV Piemonte). | 59 |
| Figura 22 – Processo di calcolo di City Energy Analyst (CEA). | 63 |
| Figura 23 – Schema della rete termica 5R1C [47]. | 64 |
| Figura 24 – Jacopo de' Barbari (1460/70 – 1516), 1,315 x 2,818 metri sei pannelli, Veduta di Venezia del 1500, Museo Correr, Venezia. Con inquadramento dell'area di Santa Marta. | 72 |
| Figura 25 – Catasto Napoleonico 1808-1811, Sestiere Dorsoduro | 72 |
| Figura 26 – Catasto Austriaco 1838-1842, Sestiere Dorsoduro | 73 |
| Figura 27 – Catasto Austro-Italiano 1867-1913, Sestiere Dorsoduro | 73 |
| Figura 28 – Vista aerea del quartiere di Santa Marta (anni Trenta) | 74 |
| Figura 29 – L'area portuale di Santa Marta in una foto storica degli anni '60 (a) e come si presenta attualmente (b). | 75 |
| Figura 30 – La figura mostra la mappa del centro storico di Venezia in cui sono evidenziati in verde gli edifici popolari per famiglie a basso reddito all'interno dei Sestrieri. | 76 |
| Figura 31 – Vista satellitare e visualizzazione 3D del quartiere di Santa Marta a Venezia | 76 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 32 – Edificio rappresentativo del primo gruppo costruito tra il 1920 e il 1928, con una forma rettangolare regolare. Vista aerea da Google Earth, mappa 3D e planimetrie [202].</i> | 77 |
| <i>Figura 33 – Edificio rappresentativo del secondo gruppo costruito tra il 1930 e il 1936, di forma irregolare, costruito intorno a un cortile centrale, simile a una "C". Vista aerea da Google Earth, mappa 3D e planimetrie [202].</i> | 78 |
| <i>Figura 34 – Vista assonometrica del quartiere Santa Marta</i> | 79 |
| <i>Figura 35 – Planimetria catastale in cui sono individuati e codificati gli edifici del quartiere secondo numero di mappale.</i> | 80 |
| <i>Figura 36 – Vista fotografica di un edificio del quartiere durante il sopralluogo.</i> | 84 |
| <i>Figura 37 – Profilo di densità di carico termico interno di un edificio residenziale durante una settimana.</i> | 92 |
| <i>Figura 38 – Stima del fabbisogno energetico per il riscaldamento dovuto alle dispersioni per trasmissione dell'involucro.</i> | 94 |
| <i>Figura 39 – Modellazione geometrica e termica dell'edificio del caso studio: a) vista in pianta, evidenziati in giallo gli edifici che presentano altezze diverse all'interno della stessa unità; b) vista 3D, focus su un edificio campione del caso di contiguità e della differenza di livelli.</i> | 95 |
| <i>Figura 40 – Valutazione del fabbisogno energetico per il riscaldamento nel periodo di riscaldamento considerando le dispersioni per trasmissione e ventilazione.</i> | 96 |
| <i>Figura 41 – Valutazione del fabbisogno energetico per il riscaldamento degli spazi nel periodo di riscaldamento considerando il contributo dei carichi interni.</i> | 97 |
| <i>Figura 42 – Analisi dei componenti edilizi dello stato di fatto: a) distribuzione percentuale delle superfici disperdenti e b) delle dispersioni termiche</i> | 103 |
| <i>Figura 43 – Fabbisogni energetici (termici ed elettrici) annui in relazione al volume lordo dell'edificio</i> | 105 |
| <i>Figura 44 – Fabbisogni energetici (termici ed elettrici) per superficie climatizzata</i> | 105 |
| <i>Figura 45 – Energia di picco annua distribuita per ciascun edificio</i> | 107 |
| <i>Figura 46 – Carico di potenza richiesto durante l'anno dal quartiere.</i> | 107 |
| <i>Figura 47 – Distribuzione dei picchi in una settimana tipo del periodo invernale.</i> | 108 |
| <i>Figura 48 – Schema delle combinazioni di intervento adottate per il caso studio.</i> | 108 |
| <i>Figura 49 – Trasmittanze termiche limite per edifici esistenti come da Decreto Minimi.</i> | 110 |
| <i>Figura 50 – Planimetria con la rete di distribuzione per impianto centralizzato, elaborazione CEA.</i> | 118 |
| <i>Figura 51 – Fabbisogni per riscaldamento in relazione alla tipologia di intervento sull'involucro edilizio.</i> | 122 |
| <i>Figura 52 – Rappresentazione della curva dei carichi di potenza (cumulativa per riscaldamento e ACS) durante il periodo di riscaldamento per ciascuna tipologia di intervento sull'involucro edilizio del distretto.</i> | 123 |
| <i>Figura 53 – Calcolo del consumo di energia primaria simulato per ciascun intervento, suddiviso per impianto e per categoria di intervento sull'involucro.</i> | 127 |
| <i>Figura 54 – Costi Globali attualizzati (€/m² a) degli interventi architettonici applicati al quartiere di Santa Marta.</i> | 128 |
| <i>Figura 55 – Costi di investimento per la realizzazione della rete di distribuzione e delle sottostazioni.</i> | 129 |
| <i>Figura 56 – Costi di investimento per gli impianti selezionati in relazione alla tipologia di intervento.</i> | 130 |
| <i>Figura 57 – Costi globali attualizzati espressi in €/m² a di superficie climatizzata; i valori suddivisi per categoria di costo sono in colore nero, i valori globali sono riportati in rosso.</i> | 132 |
| <i>Figura 58 – Grafico di individuazione della soluzione ottimale di intervento: le linee tratteggiate in orizzontale e in verticale indicano rispettivamente il margine verso il basso delle soluzioni convenienti rispetto al Reference e il margine delle soluzioni più efficienti verso sinistra rispetto alla soluzione ottimale.</i> | 133 |
| <i>Figura 59 – Grafico con rappresentazione costi globali e consumi di energia primaria selezionati solo con l'applicazione dell'EPS come materiale isolante.</i> | 135 |
| <i>Figura 60 – Confronto del rapporto costo-efficacia del pacchetto di ristrutturazione più efficace sugli involucri degli edifici studiati per vari tipi di sistemi di riscaldamento considerati, in confronto con uno scenario in cui viene sostituito solo il sistema di riscaldamento.</i> | 136 |

Lista tabelle

| | |
|--|------------|
| <i>Tabella 1 – Riepilogo dati dei casi studio italiani.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Tabella 2 – Fattori di conversione in energia primaria dei vettori energetici come riportato nel D.M. 26/06/2015.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Tabella 3 – Fattori di conversione in energia primaria, prezzi ed emissioni dei vettori energetici adottati nella ricerca e applicati nel caso studio.</i> | <i>49</i> |
| <i>Tabella 4 – Confronto fra i fattori di emissione (emissione per unità di combustibile bruciato, espressa in giga Joule di energia) di diversi inquinanti prodotti dagli apparecchi a legna e da altri combustibili usati per riscaldamento domestico (Fonte: Inventario INEMAR).</i> | <i>59</i> |
| <i>Tabella 5 – Dimensioni dei volumi del quartiere.....</i> | <i>81</i> |
| <i>Tabella 6 – Valori dimensionali elaborati dai dati rilevati</i> | <i>82</i> |
| <i>Tabella 7 – Stratigrafia chiusura verticale - parete perimetrale.....</i> | <i>84</i> |
| <i>Tabella 8 – Stratigrafia chiusura orizzontale - solaio a terra.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Tabella 9 – Stratigrafia chiusura superiore – copertura.</i> | <i>85</i> |
| <i>Tabella 10 – Trasmissanza termica e componenti degli elementi dell'involucro.</i> | <i>86</i> |
| <i>Tabella 11 – Confronto dei dati meteorologici.</i> | <i>90</i> |
| <i>Tabella 12 – Irradiazione solare media mensile giornaliera su un piano verticale per l'orientamento per il periodo invernale.</i> | <i>93</i> |
| <i>Tabella 13 – Fabbisogno energetico totale del distretto [MWh]: la percentuale in nero confronta con il metodo semi-stazionario, la percentuale rossa confronta i due strumenti in regime dinamico.</i> | <i>98</i> |
| <i>Tabella 14 – Parametri di calcolo per la tipologia di edifici nel quartiere</i> | <i>101</i> |
| <i>Tabella 15 – Descrizione delle dispersioni e degli apporti termici per ciascun edificio.....</i> | <i>102</i> |
| <i>Tabella 16 – Descrizione dei fabbisogni energetici annuali di riscaldamento, acqua calda sanitaria e energia elettrica per ciascun edificio</i> | <i>104</i> |
| <i>Tabella 17 – Descrizione del picco di energia annuale di riscaldamento, acqua calda sanitaria e energia elettrica per ciascun edificio.....</i> | <i>106</i> |
| <i>Tabella 18 – Riepilogo delle misure di intervento su involucro con prestazioni del componente edilizio e costi di investimento e manutenzione in funzione del tipo di materiale isolante selezionato. Per l'intervento nell'involucro trasparente è da intendersi un'unica' tipologia con telaio in legno e vetro triplo bassoemissivo. Il ciclo di vita utile (service life) è da intendersi di 30 anni. Le unità di misura di costo sono costi globali attualizzati e sono riferiti alla superficie totale di ciascun componente edilizio.</i> | <i>112</i> |
| <i>Tabella 19 – Riepilogo delle misure di intervento su impianto con dimensionamento e costi riferiti ai fabbisogni calcolati per ogni scenario di intervento su involucro.....</i> | <i>115</i> |
| <i>Tabella 20 – Costi di realizzazione (fornitura e posa) della tubazione di rete, parametrizzata in funzione della lunghezza e del diametro del segmento.</i> | <i>118</i> |
| <i>Tabella 21 – Settaggio trasmissioni termiche e calcolo del fabbisogno per riscaldamento in relazione agli interventi architettonici selezionati. Gli spazi vuoti delle trasmissioni termiche indicano che i valori rimangono quelli dello stato di fatto (Reference).</i> | <i>121</i> |
| <i>Tabella 22 – Risultati di simulazione del fabbisogno per riscaldamento e ACS con indicazione dell'energia di picco richiesta dal quartiere in relazione agli interventi architettonici selezionati.....</i> | <i>122</i> |
| <i>Tabella 23 – Calcolo del consumo di energia primaria simulato per ciascun intervento.....</i> | <i>124</i> |

Abbreviazioni

| | |
|-------|---|
| UE | Unione Europea |
| CE | Commissione Europea |
| 7FP | Settimo Programma Quadro per la Ricerca e l'Innovazione |
| 8FP | Ottavo Programma Quadro per la Ricerca e l'Innovazione |
| EGD | European Green Deal |
| SEN | Strategia Energetica Nazionale |
| PNRR | Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza |
| ERP | Edilizia Residenziale Pubblica |
| nZEB | Near Zero Energy Building |
| HVAC | Heating, Ventilation & Air Conditioning |
| DEN | District Energy Networks |
| SG | Smart Grids |
| DH | District Heating |
| DC | District Cooling |
| DHC | District Heating and Cooling |
| LTDH | Low Temperature District network |
| ULTDH | Ultra-Low Temperature District network |
| BDHP | Biomass District Heating Plants |
| ACS | Acqua Calda Sanitaria |
| EP | Energia Primaria |
| GHG | Emissioni di Gas Serra (Greenhouse Gases) |
| FER | Fonti Energia Rinnovabile |
| RES | Renewable Energy Solutions |
| EE | Efficienza Energetica |
| CG | Costo Globale |
| GC | Global Cost |
| KPI | Key Performance Indicator |
| APE | Attestato di Prestazione Energetica |
| CHP | Combined Heat and Power |
| HP | Heat Pump |
| PV | Impianto Fotovoltaico (PhotoVoltaics System) |
| ST | Impianto Solare Termico |

1. INTRODUZIONE

Il capitolo introduce la ricerca inquadrando tema, obiettivi, scopo, risultati attesi. Nella parte finale viene descritta la struttura della tesi e del metodo adottato presentando il contenuto dei capitoli.

Le città, e in generale i distretti urbani, sono i maggiori centri di consumo energetico nel mondo, con più del 70% della domanda globale di energia primaria e il 40-50% delle emissioni di gas serra (GHG) attribuite alle aree urbane [1]. Inoltre, più della metà della popolazione globale vive attualmente nelle città, una cifra che continuerà a crescere poiché si prevede che due terzi della popolazione mondiale sarà urbana entro il 2050 [2]. Quindi, lo sviluppo di aree urbane sostenibili sarà una sfida importante sulla strada per ridurre drasticamente le emissioni globali di CO₂.

In particolare gli edifici rappresentano circa il 40% del consumo energetico totale del mondo e il 30% delle emissioni di gas serra (GHG) [1].

Già nel 2007, il rapporto di sintesi dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) aveva identificato come il settore dell'edilizia fosse quello con il principale potenziale economico per la mitigazione dei consumi e delle emissioni utilizzando le tecnologie e le pratiche che dovrebbero essere disponibili nel 2030 secondo stime da studi bottom-up [3].

In questo quadro l'Unione Europea (UE) ha adottato diverse misure: a dicembre 2008, dopo lunghe trattative viene adottato il "20-20-20 Climate & Energy Package" [4]: un piano europeo sui cambiamenti climatici che consiste in una serie di misure adottate dai membri dell'Unione europea per combattere i cambiamenti climatici. La tabella di marcia è stata aggiornata successivamente nell'ottobre 2014 con la definizione del "2030 Climate & Energy Framework" [5], che comprende traguardi e obiettivi politici a livello dell'UE per il periodo compreso tra il 2020 e il 2030: una riduzione del 40% delle emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990, almeno una quota del 27% di consumo di energia rinnovabile, almeno il 27% di risparmio energetico rispetto allo scenario business-as-usual. Nel settembre 2020 la Commissione Europea ha proposto di elevare l'obiettivo della riduzione delle emissioni di gas serra per il 2030, compresi emissioni e assorbimenti, ad almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990, aumentando anche l'obiettivo di quota di energia rinnovabile al 32% e del miglioramento dell'efficienza energetica del 32.5%.

Questa proposta rientra nel "European Green Deal" (EGD) [6] presentato nel 2019, un insieme di iniziative politiche proposte dalla Commissione Europea con l'obiettivo generale di raggiungere la neutralità climatica in Europa entro il 2050. Il piano prevede un pacchetto ambizioso di misure che vanno da una corposa riduzione delle emissioni di gas a effetto serra e dagli investimenti in ricerca e innovazione fino agli interventi per preservare l'ambiente naturale dell'Europa. L'intenzione è quella di rivedere ogni legge vigente in materia di clima e di introdurre nuove leggi sull'economia circolare, sulla ristrutturazione degli edifici, sulla biodiversità, sull'agricoltura e sull'innovazione.

Per quanto riguarda il settore dell'edilizia, la direttiva 2012/27/UE [7] mira ad aumentare l'efficienza energetica degli edifici e mette in evidenza il potenziale di risparmio di energia primaria (EP) dei sistemi di teleriscaldamento e raffreddamento, esortando gli Stati Membri ad effettuare una valutazione globale del potenziale.

In precedenza, la direttiva 2010/31/UE sulle performance energetiche degli edifici (EPBD recast) [8] aveva rappresentato un punto di svolta nel percorso verso il miglioramento dell'efficienza del patrimonio edilizio. Questa direttiva introduce due importanti concetti: l'ottimizzazione dei costi e il concetto di edifici a energia quasi zero, near Zero Energy Building (nZEB), ma si concentra principalmente sui nuovi edifici. Tuttavia, prendendo in considerazione i bassi tassi di riqualificazione dello stock edilizio in Europa [9], i nuovi edifici possono chiaramente giocare solo un ruolo minore nella riduzione complessiva delle emissioni di gas serra relative al parco edilizio.

Infatti, come rilevato dal EU Building Stock Observatory (BSO) [10] lo stock edilizio è composto da edifici costruiti per lo più tra gli anni '50-'70, nel secondo dopoguerra, e la riqualificazione edilizia riguarda solo una parte minima, nonostante gli incentivi economici governativi e i programmi di detrazione fiscale destinati a privati e alla pubblica amministrazione. Più specificatamente il report 2014 del BSO [10,11] segnala che nella maggior parte dei paesi dell'UE metà dello stock residenziale è stato costruito prima della prima regolazione termica, ovvero è stata costruita prima del 1970. Analizzando i dati elaborati dall'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT) [12], già presenti nel BSO, in Italia il 31% degli edifici residenziali sono stati costruiti tra il 1946 e il 1969. Un valore percentuale simile (33%) per lo stesso periodo storico è riconducibile alla Regione Veneto, che è la terza regione italiana per numero di edifici costruiti dopo Lombardia e Sicilia. Nel Comune di Venezia il 48% degli edifici esistenti è stato costruito in quel periodo di grandi trasformazioni sociali, lavorative ed economiche che possono essere riassunte nello sviluppo industriale e nella conseguente richiesta abitativa della terraferma veneziana.

Invece gli edifici di nuova costruzione sono già sottoposti a requisiti di prestazione energetica e di basso livello di emissione di GHG poiché sono prescritti dalle recenti normative edilizie nazionali in recepimento delle direttive europee adottate a partire dal 2005 [13]. Quindi, la sfida principale è legata al patrimonio edilizio esistente, e la ristrutturazione edilizia combinata con la riqualificazione energetica giocherà un ruolo chiave nell'obiettivo generale di affrontare il cambiamento climatico riducendo le emissioni GHG. Di conseguenza, come descritto nello studio di Paiho et al. [14], diverse amministrazioni comunali e metropolitane in tutto il mondo hanno sviluppato programmi di azione e hanno stabilito strategie per la riduzione dei gas serra incentrate sull'ambiente urbano, includendo il patrimonio edilizio tra le principali aree target.

È in questo contesto che l'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA EBC, International Energy Agency, Energy in Buildings and Communities program) ha presentato nel 2010 il progetto "Annex 56: Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building renovation". Questo progetto ha coinvolto 11 Paesi Europei con l'obiettivo di sviluppare una metodologia per consentire una ristrutturazione economicamente efficace degli edifici esistenti, identificando il punto di equilibrio ottimale delle misure di efficienza energetica (EE) e di approvvigionamento energetico rinnovabile (RES) in una prospettiva costi/benefici. Il progetto si è concluso nel 2017 e ha finalizzato diverse pubblicazioni accademiche, che si possono trovare in letteratura [9,15–18] e in diversi rapporti, che sono disponibili sul sito web del progetto [19].

In questo quadro di incentivazione economica e di promozione e di ricerca scientifica sul tema del recupero dello stock edilizio, tuttavia è risultato evidente che la percentuale di edifici ristrutturati in Europa oscilla tra 1% e 3% sul totale patrimonio esistente [10] e che quindi non sono stati raggiunti gli obiettivi prefissati [20]. La Comunità Europea ha evidenziato la necessità di valorizzare il tasso di ristrutturazione e ha considerato l'approccio su scala distrettuale come uno degli approcci potenzialmente più efficaci per accelerare il processo di riduzione delle emissioni di gas serra nel settore edilizio. Inoltre, questo metodo può anche permettere di sfruttare le interazioni e le sinergie tra i diversi edifici e ottimizzare l'implementazione e l'integrazione delle fonti di energia rinnovabile.

Per implementare questo approccio, la Pubblica Amministrazione e le altre parti interessate (stakeholder) necessitano di metodi e strumenti di supporto per identificare i potenziali dei diversi cluster di edifici al fine di ridurre le emissioni di gas serra e il consumo di energia, nonché di individuare la soluzione ottimale di intervento [14]. L'idea di promuovere approcci integrati di rinnovamento dell'efficienza energetica a livello distrettuale è menzionata anche dall'Unione Europea in diverse raccomandazioni della Commissione Europea, come la CR-EU 2019/786 dell'8 maggio 2019 sulla ristrutturazione degli edifici esistenti [21]: viene illustrato dettagliatamente come leggere e applicare le nuove disposizioni nel contesto del recepimento nazionale, fornendo chiarimenti in merito all'attuazione dei requisiti tecnici relativi alle ristrutturazioni e ai diversi modi per raggiungere gli obiettivi previsti a livello europeo. L'obiettivo dichiarato è che gli Stati attuino una strategia di ristrutturazione a lungo termine per sostenere la ristrutturazione di edifici residenziali e non residenziali, sia pubblici che privati, e per agevolare la trasformazione degli edifici esistenti in edifici nZEB.

Il concetto base della raccomandazione europea è inoltre indicato nell'aggiornamento della Direttiva 2018/844/EU EPBD nel 2018 [22], che modifica la Direttiva 2010/31/EU sul rendimento energetico degli edifici e la Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. Nella direttiva si afferma che la Commissione "riesamina la presente direttiva entro il 1° gennaio 2026" e "nell'ambito di tale revisione (...) esamina in che modo gli Stati Membri potrebbero attuare approcci integrati a livello di distretto o di quartiere nella politica in termini di edilizia e di efficienza energetica (...) mediante programmi di ristrutturazione globale che si applicano a una serie di edifici in un contesto spaziale anziché a un singolo edificio" [22].

Di conseguenza, questo tema ha suscitato interesse anche nella comunità scientifica e una notevole quantità di pubblicazioni può essere trovata in letteratura di settore. Un esempio è il già citato lavoro pubblicato da Paiho et al. [14]. Castro et al. [23] hanno proposto una matrice decisionale come strumento per identificare le misure di retrofit più appropriate per edifici esistenti. Un altro esempio è stato pubblicato da V. D'Alonzo et al. [24], dove viene presentata una metodologia per l'analisi del patrimonio edilizio del settore residenziale, che integra i dati di input in un Sistema Informativo Geografico (GIS), senza utilizzare l'approccio per "archetipi di edifici" e strumenti di simulazione. Diverse pubblicazioni si sono anche concentrate su questioni più specifiche in questo campo, come la valutazione dei diversi strumenti e software disponibili per questo tipo di valutazioni a scala distrettuale. Un esempio sono le pubblicazioni di Ferrari et al. focalizzate sui metodi per stimare il fabbisogno energetico degli edifici a scala di quartiere [25] e sulla valutazione di tool disponibili per la valutazione dei sistemi energetici per i cluster di edifici [26].

Sulla base di tutti queste considerazioni, l'Agenzia IEA EBC anche per questo tema ha avviato diversi progetti che si concentrano sullo sviluppo di metodologie di efficienza a livello di distretto piuttosto che sul singolo edificio. Tra questi in particolare il programma IEA Annex 75 "Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables" [27], progetto al quale questo studio ha aderito. Il progetto IEA Annex 75 [28] mira ad andare oltre la riqualificazione a scala di singolo edificio; spostandosi da un punto di vista più alto e a livello urbano intende effettuare un'analisi che copra non solo le questioni energetiche, economiche e ambientali, ma anche questioni aggiuntive come l'identificazione delle opportunità e dei rischi per la salute. Inoltre, stando a un livello di scala diverso, ha fissato anche obiettivi di identificazione di opportunità e ostacoli nelle relazioni tra i diversi attori coinvolti (stakeholders) o gli apparati politici e infine l'identificazione di incentivi per promuovere le ristrutturazioni energetiche.

Nello specifico questo studio di ricerca di dottorato esprime il suo carattere innovativo e il suo contributo alla ricerca in quanto ha partecipato allo sviluppo del progetto Annex 75 e in particolare all'applicazione della metodologia a un caso studio rappresentativo del contesto italiano, fissando alcuni obiettivi:

-
- **validare la procedura metodologica,**
 - **effettuare un'analisi comparativa mirata a identificare le strategie ottimali di intervento,**
 - **testare uno strumento di calcolo per la valutazione degli interventi,**
 - **individuare linee guida di indirizzo per situazione urbane comparabili.**

In questo quadro di ricerca si inserisce la selezione del caso studio. Innanzitutto sono stati individuati alcuni parametri di scelta da un punto di vista urbano, quindi di quartiere e non di singolo edificio, che permettessero di identificare un campione rappresentativo del contesto italiano in cui intervenire: tipologia, vetustà, proprietà, opportunità e replicabilità di intervento.

L'Edilizia Residenziale Pubblica (ERP) risponde a questi requisiti. Oggi in Italia gli alloggi di edilizia residenziale pubblica sono circa un milione e sono di proprietà dei Comuni, delle Aziende pubbliche per la casa e delle Regioni. In aggiunta, i quartieri costruiti nel Secondo Dopoguerra rappresentano la maggioranza del patrimonio edilizio residenziale del Paese (circa il 40%). Sono soprattutto edifici condominiali caratterizzati dall'impiego dello stesso sistema costruttivo con alcune declinazioni locali o regionali in termini di materiali impiegati e di impianti installati, ma sostanzialmente si tratta di edifici con il medesimo comportamento energetico.

Si tratta di quartieri tuttora abitati e in uso, ma che necessitano di manutenzione e adeguamento agli standard energetici attuali. L'Italia ha fissato la riqualificazione energetica degli edifici di edilizia popolare come una delle azioni principali per la strategia del Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) [29] in attuazione del "European Green Deal" (EGD) [6]. Questa è di fatto una delle priorità politiche del Paese a tutti i livelli di governance per tutte le conseguenti implicazioni sociali, economiche, politiche, ambientali e sanitarie.

Il tema è diventato prioritario già in precedenza. Nel 2017, il Comitato interministeriale per la programmazione economica e lo sviluppo sostenibile (CIPE) aveva aggiornato gli indirizzi programmatici per l'utilizzo delle risorse finanziarie, destinando 250 milioni di euro alla realizzazione del programma integrato di edilizia residenziale sociale sovvenzionata e agevolata. La Legge di Bilancio del 2019 aveva disposto di 2.5 miliardi da ripartire per gli anni dal 2020 al 2024 per interventi di risparmio energetico degli edifici di proprietà pubblica e di edilizia residenziale pubblica, l'installazione di impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili, nonché altri interventi per lo sviluppo sostenibile del territorio. Allo stato attuale sono stati finanziati 159 progetti di riqualificazione per ridurre il disagio abitativo aumentando il patrimonio di edilizia residenziale pubblica, a rigenerare il tessuto socioeconomico dei centri urbani, a migliorare l'accessibilità, la funzionalità e la sicurezza di spazi e luoghi degradati, spesso localizzati nelle periferie [30].

Il caso studio di questa tesi è stato individuato in uno dei quartieri esclusivamente residenziali di edilizia pubblica nell'isola di Venezia. Gli edifici presentano caratteristiche omogenee e simili agli altri edifici ERP distribuiti nell'isola, ma anche a quelli edificati nella terraferma e nel resto della Regione Veneto. Questo carattere standard di tipologia permette infatti di essere potenzialmente un caso che fornisce dati di indagine e strategie di intervento che possono essere replicate nel territorio. La differenza al contempo sta nel fatto che Venezia rappresenta un contesto originale, per esempio sia a livello di legislazione edilizia, di tutela del patrimonio e di limiti fisici di interventi edilizi su spazi ristretti o comunque già consolidati.

Pertanto questa ricerca ha lo scopo di analizzare contesti italiani di quartieri, indagare metodologie e testare strumenti per individuare strategie efficaci e convenienti di riqualificazione che possano essere replicati e declinati nel contesto nazionale.

1.1. **Struttura e metodologia della ricerca.**

Questa tesi di dottorato è suddivisa in vari capitoli che descrivono la ricerca sviluppata.

Dopo aver presentato il tema e il contesto nell'**Introduzione**, il capitolo **Stato dell'Arte** presenta un quadro attuale in termini di legislazione, esperienze di programmazione europea e strumentazione di indagine a livello urbano. Viene descritto l'iter legislativo che l'Italia ha recepito dalle normative adottate dalla Comunità Europea sui temi dell'efficientamento energetico degli edifici e in generale sul cambiamento climatico. Successivamente viene presentato un quadro dei programmi finanziati dall'Unione Europea per sviluppare strategie di intervento a scala distrettuale, focalizzandosi su tre importanti esperienze italiane con i progetti EU-GUGLE, R2CITIES, SINFONIA. La sezione finale del capitolo è dedicata a fornire una panoramica sulla modellazione energetica degli edifici urbani (UBEM) nel processo di pianificazione urbana e territoriale, descrivendo alcuni software disponibili sul mercato attuale in relazione alla metodologia di calcolo energetico adottata.

Nei due capitoli successivi vengono descritti in analitico **Metodologia** e **Strumenti di Calcolo** adottati in questa ricerca. Il primo è dedicato alla metodologia Cost Optimal declinata e sviluppata ai fini del progetto IEA-EBC Annex 75, Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables". Nel secondo vengono presentati i software di calcolo sviluppati e analizzati per la ricerca: si tratta di due tool proprietari con approccio dinamico (CEA e EURECA) e un tool sviluppato appositamente per questa ricerca e per l'applicazione della metodologia proposta nel progetto Annex 75. L'obiettivo di questo capitolo consiste nel creare un database di informazioni che saranno poi utilizzate nella fase di ottimizzazione e di individuazione delle cost optimal measures di intervento indagate nella parte applicativa.

Il capitolo successivo descrive il **Caso Studio** individuato e analizzato soprattutto come categoria edilizia specifica, ovvero l'edilizia popolare sovvenzionata, che è stata costruita in Italia nella prima metà del Novecento e che presenta caratteristiche costruttive simili in tutto il territorio nazionale. In particolare viene analizzato il Quartiere Santa Marta a Venezia presentando il contesto storico, lo sviluppo urbano e i dati raccolti per la caratterizzazione architettonica, geometrica e termofisica nello stato attuale ai fini dell'applicazione della metodologia. La parte finale del capitolo descrive come il Quartiere Santa Marta sia rappresentativo della situazione attuale dell'edilizia residenziale sociale nel Comune di Venezia e al contempo esemplificativo di una tipologia edilizia ormai vetusta ma ancora presente e utilizzata. Vengono infatti analizzati i dati relativi all'occupazione degli edifici, all'anagrafica degli abitanti, ai servizi offerti alla comunità e vengono commentati e incrociati con altre informazioni più inerenti alla metodologia, ovvero lo stato di conservazione degli edifici e il livello di manutenzione applicato negli anni. Lo scopo è stato quello di individuare appunto quelle caratteristiche che permettano di replicare le strategie di intervento e le soluzioni individuate per questa tipologia abitativa e urbana.

Il capitolo **Applicazione** è diviso in due parti. Nella prima viene effettuato il confronto e la taratura tra il metodo di calcolo in regime semi-stazionario, più accessibile agli utenti non professionisti, con due software dinamici e specialistici per la progettazione energetica su scala urbana. Lo scopo consiste nell'individuare limiti e opportunità sia nell'applicazione della procedura più semplice (semi-stazionaria), sia per la tipologia di utente che per la valutazione di interventi di riqualificazione energetica di quartiere. Il test viene effettuato sul caso studio selezionato (Quartiere Santa Marta) e i dati vengono poi implementati per l'applicazione della metodologia nella seconda parte del capitolo, in cui infatti diversi scenari di intervento su involucro architettonico e sistema impiantistico vengono individuati e calcolati attraverso simulazioni.

Nel capitolo **Risultati del caso studio** vengono elaborati gli scenari di intervento considerando parametri quali consumo di energia primaria (e relative emissioni ambientali) e costo globale al fine di individuare la soluzione più conveniente (cost optimal solution) in confronto con lo stato attuale (Reference).

Gli ultimi capitoli sono dedicati alla **Discussione** e **Conclusioni** della ricerca. Vengono commentati i risultati e vengono discusse le valutazioni di convenienza che individuano l'intervento ottimale. La parte finale è dedicata a riassumere le potenzialità e criticità emerse nello studio in modo da fornire un duplice feedback: da una parte la validazione della metodologia applicata e dall'altra l'esposizione di una serie di linee guida di intervento per situazioni urbane comparabili in caso di edilizia sociale.

Infine, nel capitolo **Pubblicazioni**, vengono riportati gli articoli scientifici elaborati e pubblicati per questa ricerca di dottorato.

Ogni capitolo presenta una sezione di riepilogo in cui sono riassunte le principali tematiche affrontate.

2. STATO DELL'ARTE

2.1. Quadro normativo europeo e italiano

Il capitolo descrive le principali normative europee e italiane in termini di transizione energetica, energia sostenibile, riduzione delle emissioni GHG, efficienza energetica e utilizzo rinnovabili.

L'analisi del quadro normativo italiano in materia di risparmio energetico degli edifici non può prescindere da un puntuale raffronto con l'ambito sovranazionale: la Comunità Europea prima e, dal 2007, l'Unione Europea, hanno emanato una serie di direttive volte ad uniformare, almeno nel vecchio continente, le norme dei diversi Stati membri [31].

Va ricordato come l'Italia sia stato uno dei Paesi precursori per quanto riguarda la legislazione in materia: uno degli ultimi atti della VI Legislatura (Governo Moro) fu l'approvazione della Legge 373 del 30 aprile 1976 [32] recante il titolo "Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici". La risposta che la classe politica italiana volle dare alla crisi petrolifero – energetica conseguenza della guerra del Kippur nel 1973 – seguita a stretto giro da quella del 1979 (rivoluzione iraniana) e delle seguenti negli anni '80, si rivelò poi essere capofila e punto di partenza per legiferare su un argomento fino ad allora lontano dai programmi di governo[33].

Tre sono gli ambiti di applicazione della legge del 1973: le caratteristiche di prestazione dei componenti edilizi, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici per il riscaldamento degli ambienti e per la produzione di acqua calda per usi igienici e sanitari e, infine, le caratteristiche di isolamento termico degli edifici - da costruire o ristrutturare - nei quali sia prevista l'installazione di un impianto termico di riscaldamento degli ambienti. Quest'ultimo il nodo centrale: la legge trova applicazione sia verso le nuove costruzioni - e va ricordato il boom immobiliare di seconde case dei primi anni Settanta – che nei confronti degli edifici da ristrutturare siano essi fabbricati o singoli locali.

Il capo III della suddetta legge è sicuramente il più interessante in quanto introduce terminologie e concetti che, sviluppati negli anni a venire da decreti ministeriali e regolamenti, si riveleranno essere le basi su cui incardinare una sperimentazione di risparmio energetico che diventerà prassi. Vengono introdotti i seguenti temi:

- isolamento termico, per cui "si intende il coefficiente volumico globale di dispersione termica espresso in chilocalorie al metro cubo per ora per salto termico di un grado centigrado";
- "zone climatiche e i valori minimi e massimi dei relativi coefficienti volumici globali di dispersione termica";
- "coefficiente volumico globale di dispersione termica massimo ammissibile per ciascun comune delle rispettive regioni".

Nel corso del tempo si susseguirono decreti e regolamenti come il D.P.R. n. 1052 del 28 giugno 1977 “Regolamento di esecuzione alla Legge 30 aprile 1976, n. 373 relativa al consumo energetico per usi termici negli edifici” e il Decreto Ministeriale n. 36 del 10 marzo 1977 [34] “Determinazione delle zone climatiche, dei valori minimi e massimi dei relativi coefficienti volumici di dispersione termica” che vanno segnalati per l’introduzione di termini destinati ad entrare sia nella letteratura scientifica che nella tecnologia applicata del settore: il fattore di forma S/V, i gradi-giorno e la classificazione degli edifici.

Da ricordare la Legge n. 308 del 29 maggio 1982 [35] “Norme sul contenimento dei consumi energetici, lo sviluppo delle fonti rinnovabili di energia e l’esercizio di centrali elettriche alimentate con combustibili diversi dagli idrocarburi”, che, per la prima volta introdusse agevolazioni economiche volte ad incentivare gli interventi di risparmio energetico anche da parte del privato. Superfluo sottolineare come questa strada si rivelerà essere quella vincente per la diffusione della idea stessa di risparmio energetico presso i cittadini proprietari di case, la maggioranza in Italia.

A distanza di 15 anni, nel 1991, ci furono la prima grande riforma e sistematizzazione dell’argomento con la Legge Quadro n. 10 del 9 gennaio 1991 [36] “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”, a sua volta seguita dal decreto attuativo emanato tramite D.P.R. n. 412 del 26 agosto 1993 [37] contenente il “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 della Legge 9 gennaio 1991, n. 10”.

La Legge 10/1991 abroga la normativa precedente e si pone come nuovo inizio per la materia ma, ancora più importante, il combinato disposto di Legge quadro e Regolamento pone l’accento su almeno quattro concetti innovativi:

- benessere degli individui all’interno dell’ambiente confinato;
- classificazione del territorio nazionale in funzione del numero di gradi giorno;
- classificazione degli edifici in base alla loro destinazione d’uso;
- individuazione dei criteri di progettazione energetica.

Inoltre il territorio nazionale, per la prima volta suddiviso in 6 zone climatiche (da A ad F) viene classificato in funzione del numero di gradi giorno (GG): trattasi della somma delle differenze positive giornaliere tra la temperatura ambiente (convenzionalmente fissata a 20°C) e a temperatura media esterna giornaliera (definizione che poi verrà standardizzata dalla normativa UNI 10349 [38] solo nel 1994).

Ancora: gli edifici vengono classificati in base alla categoria di utilizzo con relativa temperatura limite interna e sono individuati i criteri di progettazione energetica. Infine viene introdotta l’obbligatorietà di una relazione tecnica preliminare dichiarante la conformità dell’edificio; in caso di mancata presentazione, viene prevista una sanzione amministrativa.

Un accenno particolare a come nella Legge compaiano – per la prima volta – concetti “empirici” come risparmio energetico, uso consapevole dell’energia e salvaguardia dell’ambiente che anche in questo frangente risentono del “sentire comune” creatosi in seguito al disastro di Chernobyl del 1986 e alla plebiscitaria vittoria del No al referendum sul nucleare del 1987.

Alla fine degli Novanta la panoramica sulla normativa oggetto di studio può finalmente assumere contorni meno limitati ai confini italiani: nel 1997 a Kyoto [39] viene definito il protocollo che prende il nome dalla città e con cui alcuni dei più importanti Paesi al mondo, si accordano sulle linee generali riguardanti i livelli di emissioni da mantenere per gli anni a seguire. Da questo momento in poi i Paesi Membri non proseguiranno più in ordine sparso, ma, guidati dalle istituzioni europee, giungeranno alla ratifica di una serie di direttive al fine di standardizzare obiettivi comuni.

La prima, fondamentale, è la Direttiva Europea 2002/91/CE (EPBD “Energy Performance of Buildings Directive”) [40] o “sul rendimento energetico dell’edilizia” recepita in Italia con il D. Lgs. n. 192 del 19 agosto 2005 [13]. Il legislatore europeo introduce il concetto di efficienza energetica degli edifici al fine di perseguire gli obiettivi dei succitati accordi internazionali. Viene richiesta la messa a punto di uno standard che, per la prima volta, vede la luce documentale nei nuovi “attestati del rendimento energetico di un edificio”. L’esperienza italiana della Legge 10/1991 si allarga quindi all’intera comunità europea nel momento in cui la Direttiva sollecita l’individuazione – all’intero dell’Europa geografica – di diverse aree climatiche locali di cui tenere conto nella redazione di questi attestati.

Il D. Lgs. n. 192 del 19 agosto 2005, inoltre, stabilisce le modalità e le condizioni necessarie per il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici, a favore di energie rinnovabili. Numerosi sono i parametri da considerare nella redazione dei rendiconti di prestazione energetica: a mero titolo di esempio si ricordano le condizioni esterne e interne, l’orientamento dell’edificio, la ventilazione naturale, l’uso di fonti di energia rinnovabile, le proprietà termiche dell’edificio, i sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento, l’illuminazione artificiale nonché le strategie passive.

Il legislatore italiano ha però voluto compiere un passo in avanti nel momento in cui ha deciso di implementare la Direttiva europea per quanto riguarda l’“Attestato di Certificazione Energetica”: vengono definiti in maniera più stringente i termini di casi di applicazione, i criteri per la sua stesura e per la qualificazione dei certificatori, nonché la validità temporale dello stesso. Vengono anche redatte le linee guida per le ispezioni degli impianti termici e raccomandata l’integrazione dei pannelli solari negli edifici.

Il D. Lgs. n. 192/2005 viene aggiornato dal D. Lgs. n. 311 del 26 dicembre 2006 [41] soprattutto per innalzare i requisiti di rendimento energetico per gli edifici e l’installazione di collettori solari e pannelli fotovoltaici sul nuovo. Anche il D.P.R. n. 59 del 2 aprile 2009 [42] impone delle modifiche ai parametri delle prestazioni energetiche in estate e, uniformandosi alla UNI TS/11300 [43], al calcolo delle prestazioni energetiche. La norma UNI – modificata e aggiornata nel corso degli anni - è ancora oggi in vigore e presenta una suddivisione in sei parti:

- UNI/TS 11300-1 Prestazioni energetiche degli edifici: determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale;
- UNI/TS 11300-2 Prestazioni energetiche degli edifici: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l’illuminazione in edifici non residenziali;
- UNI/TS 11300-3 Prestazioni energetiche degli edifici: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva;
- UNI/TS 11300-4 Prestazioni energetiche degli edifici: utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria;
- UNI/TS 11300-5 Prestazioni energetiche degli edifici: calcolo dell’energia primaria e dalla quota di energia da fonti rinnovabili;

-
- UNI/TS 11300-6 Prestazioni energetiche degli edifici: determinazione del fabbisogno di energia per ascensori e scale mobili.

Altro riferimento importante è la Direttiva 2006/32/CE [44] – recepita in Italia dal D. Lgs. n. 115 del 30 maggio 2008 [45] – con l’obiettivo di uniformare le diverse e non omogenee leggi in materia degli Stati membri, al fine di creare un più perfetto mercato europeo dell’efficientamento energetico anche attraverso un’uniformità di prezzi per servizi, forniture e materiali. La rettifica italiana ha portato alla definizione del “Piano d’Azione per l’efficienza energetica (PAEE)” e all’istituzione dell’”ENEA – Agenzia per le nuove tecnologie, l’energia e l’ambiente”. Ancora una volta vengono rimodulati e aggiornati diversi parametri e le quote di agevolazioni per favorire l’efficientamento energetico degli edifici. Nella visione della UE da un lato è necessario offrire supporto tecnico e attività di monitoraggio, dall’altro la normativa deve essere a favore del cittadino, sia grazie ad interventi diretti dello Stato che grazie ad una liberalizzazione del mercato dell’energia a tutto tondo.

Il “Decreto Rinnovabili” D. Lgs. n. 28 del 3 marzo 2011 [46] recepisce in Italia la Direttiva 2009/28/EC [47] con cui la comunità assegna all’Italia due obiettivi nazionali vincolanti in termini di quota dei consumi finali lordi di energia coperta da fonti rinnovabili (FER):

- raggiungere, entro il 2020, una quota dei consumi finali lordi di energia coperta da fonti rinnovabili almeno pari al 17% (obiettivo complessivo, o overall target);
- raggiungere, entro il 2020, una quota dei consumi finali lordi di energia nel settore dei trasporti coperta da fonti rinnovabili almeno pari al 10%.

Per quanto riguarda gli edifici vengono definite e semplificate alcune procedure necessarie per l’installazione di tecnologie basate su energie rinnovabili: è fatto obbligo il ricorso a fonti di energia rinnovabile per colmare il fabbisogno di riscaldamento degli ambienti, di acqua calda sanitaria, di raffrescamento e di energia elettrica – con quote diverse tra il 20% e il 50% a seconda della data di costruzione dell’edificio – degli edifici di nuova costruzione e in fase di ristrutturazione. Inoltre, per gli edifici in cui tali necessità sono coperte dalle FER in misura superiore al 30% rispetto ai requisiti minimi, è prevista un’eccezione in termini di volume costruito massimo consentito. La norma dedica anche una parte alle reti di smart-grid e alle reti di teleriscaldamento e teleraffreddamento, fornendo regolamenti, meccanismi fiscali e misure di promozione, come misure di ristrutturazione del sistema di trasmissione e distribuzione; vengono infine stanziati i fondi per lo sviluppo delle reti DHC (District Heating and Cooling).

Nello stesso D. Lgs. n. 28 del 3 marzo 2011 viene recepita anche la Direttiva 2010/31/UE (EPBD recast) [8] che ridefinisce ed integra le precedenti definizioni della terminologia di settore introducendo nuove espressioni come:

- “prestazione energetica degli edifici”
- “ristrutturazione importante”
- “edificio a energia quasi zero” (nZEB)
- “edifici di riferimento” (come quegli edifici volti ad essere edificio esemplare o ideale che ogni stato membro avrebbe dovuto definire al fine di sistematizzare un quadro metodologico determinato a comparare la prestazione energetica degli edifici e il lato costo economico).

La successiva Direttiva 2012/27/UE [48] “sull’Efficienza Energetica” nasce come parte integrante del cammino verso il raggiungimento di obiettivi ambiziosi e necessari che sono passati alla storia come “20-20-20”: la riduzione del 20% del consumo di energia entro il 2020.

Le finalità del provvedimento sono molteplici, ma, tra le più importanti legate all’efficientamento degli edifici, si ricordano:

-
- l'elaborazione triennale da parte di ogni Stato membro di una strategia a lungo termine per mobilitare investimenti nella ristrutturazione del parco nazionale di edifici residenziali e commerciali, sia pubblici che privati;
 - la richiesta agli Stati di garantire che almeno il 3% degli edifici pubblici con una superficie coperta utile totale superiore a 500 m² sia ristrutturato ogni anno per rispettare i requisiti minimi di prestazione energetica stabiliti dalla direttiva 2010/31 UE;
 - la raccomandazione di provvedere ad investimenti su prodotti, servizi o edifici ad alta efficienza (valutando il rapporto costi-efficacia) sia a livello centrale che regionale o locale;
 - l'incentivo ad utilizzare strumenti politico-finanziari quali imposte sull'energia, incentivi fiscali, standard e norme dirette a migliorare l'efficienza energetica dei prodotti e dei servizi e sistemi di etichettatura energetica;
 - la promozione di sistemi di cogenerazione, teleriscaldamento e teleraffrescamento, previo studio di fattibilità sul territorio tramite comparazione costi/benefici;
 - la richiesta di uno sforzo per garantire la sicurezza e l'efficienza delle reti di trasformazione, trasmissione e distribuzione di energia;
 - l'invito a razionalizzare il sistema di incentivi per favorire gli investimenti intesi a migliorare il rendimento energetico, anche rimuovendo gli ostacoli a tali incentivi.

La Direttiva Europea è recepita in Italia con il D. L. n. 63 del 4 giugno 2013 [49] che promuove l'efficientamento delle prestazioni energetiche degli edifici tenendo conto delle condizioni esterne ed interne e dell'impatto sui costi. È con questo decreto che il certificato energetico viene rinominato Attestato di Prestazione Energetica (APE) e vengono aggiornati i già citati concetti di "edificio quasi a energia zero", "livelli di prestazione energetica degli edifici ottimali in termini di costi" e "edifici di riferimento". Il D.P.R. n. 74 del 16 aprile 2013 [50] interviene raccomandando alle Regioni di individuare le modalità corrette per il funzionamento degli impianti termici e le relative procedure di controllo, incrementando il numero e la tipologia di impianti da controllare obbligatoriamente e fissando requisiti di efficienza più severi, rendendo rigorosi i criteri per la qualificazione e formazione dei tecnici incaricati dell'ispezione degli impianti e della certificazione energetica dell'edificio. In particolare, alle Regioni viene anche chiesto di creare un Catasto degli Impianti di Energia Termica con dati accessibili e scambiabili tra i clienti e le istituzioni.

Il 26 giugno 2015 [51] viene emanato il Decreto Ministeriale cosiddetto "Decreto Rinnovabili", con la definizione "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici". Notevole l'importanza che riveste il concetto di trasmittanza all'interno del Decreto, in particolar modo per quanto riguarda le cosiddette ristrutturazioni importanti di secondo livello: entrano infatti in gioco fattori come requisiti di trasmittanza termica, limite delle porzioni e delle quote di elementi, componenti dell'involucro dell'edificio.

Nel testo legislativo sono inoltre presenti 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. Le novità riguardano schemi che bisogna presentare in relazione all'esecuzione di interventi edilizi, ai fini dell'attestazione del fatto che l'edificio in questione rispetti i requisiti imposti dalla normativa in materia di prestazione energetica degli edifici e degli impianti termici.

Ad applicazione della Legge 63/2013 viene sottolineata la necessità di creazione di un catasto nazionale degli attestati di certificazione energetica e dei sistemi termici – sotto la responsabilità dell'ENEA. La procedura di calcolo ha lo scopo di stimare la prestazione energetica (cioè l'energia primaria annuale necessaria a soddisfare il fabbisogno annuo di riscaldamento e raffrescamento degli ambienti, la ventilazione, l'acqua calda sanitaria e, nel settore non residenziale, il fabbisogno di illuminazione e di ascensori di un edificio ad uso standard) di un edificio, rispetto ad uno di riferimento conforme ai requisiti energetici aggiornati. Sono previsti quattro livelli di ristrutturazione: nuova costruzione dell'edificio, demolizione e ricostruzione, ampliamento di almeno il 15%, ristrutturazione di primo livello, ristrutturazione di secondo livello e retrofit energetico.

Più recentemente, il D. Lgs. n. 48 del 10 giugno 2020 [52], introducendo modifiche ed integrazioni al precedente D. Lgs n. 192/2005, non apporta variazioni sostanziali alle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici; la direttiva di riferimento è la 2018/844/EU.

Quest'ultimo intervento del legislatore vuole sostenere in particolare la ristrutturazione degli edifici esistenti ed intervenire su esercizio, controllo, conduzione, ispezione e manutenzione di tutti gli impianti di climatizzazione, inclusi quelli per il raffrescamento estivo, al fine di migliorarne l'efficienza. Al fine di una sempre maggiore razionalizzazione, è promossa ancora una volta la creazione di banche dati sul parco edilizio nazionale.

Le principali modifiche introdotte sono:

- nuova definizione di impianto termico quale “impianto tecnologico fisso destinato ai servizi di climatizzazione invernale o estiva degli ambienti, con o senza produzione di acqua calda sanitaria, o destinato alla sola produzione di acqua calda sanitaria, indipendentemente dal vettore energetico utilizzato, comprendente eventuali sistemi di produzione, distribuzione, accumulo e utilizzazione del calore nonché gli organi di regolazione e controllo, eventualmente combinato con impianti di ventilazione”;
- strategie di ristrutturazione a lungo termine: il Ministro dello Sviluppo Economico cura e definisce una strategia di lungo termine per sostenere la ristrutturazione del parco nazionale di edifici residenziali e non residenziali al fine di ottenere edifici ad alta efficienza energetica entro il 2050;
- prescrizioni e requisiti minimi degli edifici riguardanti fattibilità tecnica, funzionale, ambientale ed economica dei sistemi alternativi ad alta efficienza;
- incentivo alla diffusione di dispositivi termoregolatori autoregolanti;
- obbligo di integrazione di posti auto per la ricarica veicoli elettrici in caso di nuova costruzione o ristrutturazione importante;
- attestato di Prestazione Energetica (APE): viene modificato il D. Lgs n. 192/2005 relativo all'Attestato di Prestazione Energetica e in particolare in merito al pagamento di una sanzione amministrativa in caso di mancanza dell'APE negli allegati dei contratti di compravendita immobiliare. L'Ape deve essere redatta da professionisti abilitati e secondo un rigido disciplinare;
- ispezioni sugli impianti;
- edifici a energia quasi zero: gli Stati membri hanno il compito di elaborare strategie nazionali a lungo termine per sostenere la ristrutturazione efficiente di edifici residenziali e non, pubblici e privati, con l'obiettivo di ridurre le emissioni nell'UE dell'80-85% rispetto ai livelli del 1990 facilitando la trasformazione efficace in termini di costi degli edifici esistenti in edifici NZEB.

Attualmente a livello comunitario e nazionale si sta lavorando all'attuazione del "European Green Deal" (EGD) [6], come già accennato in precedenza. Il quadro 2030 per il clima e l'energia comprende traguardi e obiettivi strategici a livello dell'UE per il periodo dal 2021 al 2030. nel settembre 2020 la Commissione ha proposto di elevare l'obiettivo della riduzione delle emissioni di gas serra per il 2030, compresi emissioni e assorbimenti, ad almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990. L'intento consiste nel prendere in considerazione tutte le azioni necessarie in tutti i settori, includendo un aumento dell'efficienza energetica e dell'energia da fonti rinnovabili. Il piano propone un nuovo e più ambizioso obiettivo che va oltre quello già indicato per il 2030 nel Regolamento 2018/1999/UE e nel Regolamento 2018/842/UE (riduzione di almeno il 40% delle emissioni al 2030 rispetto ai valori 1990) ed è stato adottato in via definitiva con il Regolamento 2021/1119/UE [53] che ha formalmente sancito l'obiettivo della neutralità climatica al 2050 e il traguardo vincolante dell'Unione in materia di clima per il 2030. Questa legge consente all'Unione Europea e agli Stati Membri di progredire verso un'economia climaticamente neutra e di rispettare gli impegni assunti nel quadro dell'accordo di Parigi aggiornando il suo contributo determinato a livello nazionale.

Infine va citato il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) [54], il piano preparato dall'Italia per rilanciarne l'economia dopo la pandemia di COVID-19, al fine di permettere lo sviluppo sostenibile e digitale del Paese. Il PNRR fa parte del programma dell'Unione europea noto come Next Generation EU, un fondo da 750 miliardi di euro per la ripresa europea, di cui 191.5 miliardi (70 in sovvenzioni a fondo perduto e 121 in prestiti) sono stati assegnati all'Italia.



Figura 1 – Allocazione delle risorse PNRR alle Missioni.

Il PNRR annovera tre priorità trasversali condiviso a livello europeo (digitalizzazione e innovazione, transizione ecologica e inclusione sociale) e si sviluppa lungo 16 Componenti, raggruppate in sei missioni (Figura 1). In particolare, la parte più cospicua del fondo è dedicata alla Rivoluzione Verde e Transizione Ecologica (Missione 2), con l'obiettivo di arrestare e mitigare i fenomeni collegati ai cambiamenti climatici in corso con interventi indirizzati verso la neutralità climatica e lo sviluppo ambientale sostenibile. La Missione 2 è articolata in quattro componenti, ognuna delle quali, a sua volta, contiene una serie di investimenti e riforme.

La Componente 3 (M2C3) è dedicata all'Efficienza Energetica e Riqualficazione degli Edifici, con l'obiettivo di agire sugli aspetti previsti nel PNIEC [29], in particolare sull'efficientamento energetico edifici pubblici (1.21 G€), sull'efficientamento energetico e sismico dell'edilizia residenziale privata e pubblica (13.95 G€) e sulla promozione di sistemi di teleriscaldamento efficiente (0.2 G€). Il teleriscaldamento gioca un ruolo fondamentale nell'ambito del mix tecnologico che dovrà garantire il conseguimento degli obiettivi ambientali del prossimo decennio nel settore del riscaldamento e raffrescamento. Ciò in particolare per le sue capacità di integrare l'efficienza con l'uso delle fonti rinnovabili, nonché la delocalizzazione e la riduzione delle emissioni inquinanti in particolare nelle grandi aree urbane dove il problema è ancora più acuto.

2.1.1. Riepilogo

I cambiamenti climatici sono la più grande sfida dei tempi odierni e dagli anni Novanta l'Unione Europea gioca un ruolo di primo piano a livello internazionale, adottando politiche ad hoc e fissando obiettivi ambiziosi per ridurre i gas serra, incrementare la quota di energia da fonti rinnovabili nei consumi finali e migliorare l'efficienza energetica. Negli ultimi due anni, la Commissione Europea ha alzato l'asticella: a luglio 2021 ha portato l'obiettivo di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra dal 40% ad almeno il 55% entro il 2030. Un traguardo ambizioso che nel prossimo decennio vuole consolidare la posizione della UE come leader globale della transizione energetica. La decisione dell'UE di ridurre le emissioni di gas serra del 55%, e non più del 40%, entro il 2030 (rispetto ai livelli del 1990), accompagnata dalla recente proposta del pacchetto "Fit for 55", conferma che la decarbonizzazione è al centro della costruzione dell'Europa del futuro.

2.2. Progetti ed esperienze di riqualificazione urbana in prospettiva di smart cities

Il capitolo presenta un quadro dei programmi europei che hanno promosso lo sviluppo di progetti con finanziamento e fondi della Comunità Europea, dedicati alle strategie di rinnovamento di edifici esistenti e di quartieri, finalizzati alla diminuzione di consumo energetico e di emissione di GHG.

Viene esposto un focus su esperienze italiane (Milano, Genova, Bolzano) presenti come casi studio dei progetti EU-GUGLE, R2CITIES, SINFONIA.

Una parte di quanto esposto di seguito è stato pubblicato in una versione estesa in [55,56].

A livello comunitario negli ultimi anni sono stati coinvolte diverse competenze provenienti dalla ricerca accademica, industrial e pubblica per realizzare lo sviluppo di quello che può essere riassunto nel concetto di Smart City. Infatti a livello di infrastruttura energetica una Smart City è "... un'area urbana che ha integrato in modo sicuro la tecnologia nei settori dell'informazione ... e dell'Internet delle cose (IoT) per gestire meglio le risorse di una città" [57]. L'impiego di tecnologie intelligenti consente un'applicazione più efficiente di tecnologie energetiche integrate nella città che consentano lo sviluppo di aree più autosufficienti o addirittura di distretti energetici positivi che producono più energia di quanta ne consumano [58].

L'obiettivo di questa ricerca è stato quello di individuare progetti e programmi che fossero contestualizzati su quartieri o distretti urbani, meglio se su residenziali, e che si fossero occupati di piani di riqualificazione edilizia combinata con sistemi energetici efficienti. Di questo secondo aspetto inoltre il focus è stato orientato a progetti con applicazione di sistemi centralizzati, quali teleriscaldamento e teleraffrescamento, e con utilizzo di energia da fonti rinnovabili.

La maggior parte dei progetti si riferisce a fondi europei Horizon 2020, ovvero all'ottavo Programma Quadro per la Ricerca e l'Innovazione 8FP, tuttavia alcuni progetti hanno sviluppato un approccio olistico già all'interno del settimo Programma Quadro 7FP [59], sezione Energy - Smart Cities and Communities. Per esempio il progetto **TRANSFORM** [60] si è occupato della transizione di energia delle città. Sei città europee (Amsterdam, Copenaghen, Genova, Amburgo, Vienna e Lione) hanno aderito e hanno attuato numerose misure di intervento come: promozione del retrofit energetico degli edifici, aumento degli edifici collegati al teleriscaldamento, aumento della capacità di approvvigionamento energetico da fonti solari ed eoliche, gestione intelligente dei rifiuti e della mobilità, transizione alla rete intelligente.

Anche il progetto **READY** (Resource Efficient cities implementing ADvanced smart city solutions) [61] del 7FP ha dimostrato la necessità di un approccio olistico nella pianificazione urbana intelligente, promuovendo il retrofit di edifici a prezzi accessibili, il teleriscaldamento a bassa temperatura, i sistemi di integrazione di tecnologie d'informazione e comunicazione (ICT), soluzioni per alimentare la flessibilità energetica e la ricarica di veicoli elettrici. Sono state selezionate per l'applicazione di soluzioni con diversi livelli di impatto alcune città come casi studio dimostrativi: Aarhus (Danimarca), Växjö (Svezia) e Kaunas (Lituania). In particolare, ad Aarhus sono previste le seguenti misure: retrofit energetico di edifici residenziali e uffici pubblici/privati collegati a un teleriscaldamento a bassa temperatura, riutilizzo del calore disperso dal sistema di raffreddamento dell'ospedale per alimentare la rete teleriscaldamento, riutilizzo del calore disperso dagli edifici per la produzione di acqua calda sanitaria, installazione di impianto fotovoltaico sui tetti degli edifici, smart metering e storage.

Il programma **Triangulum** (The Three Point Project / Demonstrate Disseminate Replicate) [62], coordinato dal Fraunhofer Institute e che si concluderà nel 2010, mira a implementare soluzioni smart city che integrano energia, mobilità e gli ICT nei quartieri urbani. Il programma applica i suoi principi su un insieme di città in Europa ma la maggior parte degli impegni riguarda l'implementazione o il rafforzamento delle soluzioni in tre città: Eindhoven (Nederland), Manchester (Regno Unito) e Stavanger (Norvegia). Per quanto riguarda le misure energetiche negli edifici, si prevede di rinnovare il parco immobiliare sociale di Eindhoven, di rinnovare gli edifici del distretto universitario e di raggiungere l'indipendenza energetica termica ed elettrica, grazie all'integrazione di energia geotermica, del teleriscaldamento e di una cella a combustibile, a Manchester, di progettare un sistema di pompa di calore fognaria per tre edifici di uffici pubblici a Stavanger. Inoltre, in tutte le città citate sono previste TIC per il monitoraggio e/o la gestione dell'uso dell'energia negli edifici e negli spazi pubblici, nonché per l'accesso alla mobilità intelligente.

Il progetto europeo di ricerca e sviluppo **REPLICATE** (REnaissance of Places with Innovative Citizenship and TEchnology) [63] mira a migliorare il processo di transizione verso le smart cities implementando l'efficienza energetica, la mobilità e soluzioni ICT nei distretti della città. Le città di San Sebastian (Spagna), Bristol (UK) e Firenze (Italia) rappresentano i casi studio in cui sono state realizzate opere di retrofit energetico dell'involucro edilizio con la connessione alle reti di teleriscaldamento: a biomasse, a San Sebastian, integrato con l'accumulo solare termico a Firenze e collegato ad un cogeneratore a bio-gas di Bristol.

Il programma **SmartReFlex** [64], che aderisce al Programma CE IEE Intelligent Energy Europe, intende aumentare nelle città europee la diffusione di sistemi di teleriscaldamento e teleraffrescamento (DHC) intelligenti e flessibili, basati su quote elevate di fonti di energia rinnovabile (FER), come biomasse, fonte geotermica, recupero del calore residuo, solare termico, in base alle condizioni locali. Vengono coinvolti diversi Paesi europei (es. Germania, Spagna, Italia, Irlanda, Danimarca) e venti casi di studio reali vengono sviluppati, analizzati con gli strumenti creati appositamente per il progetto, e supportati dagli stakeholder coinvolti.

Andando nello specifico, viene di seguito esposta una panoramica di progetti dedicati al tema del riscaldamento e il raffreddamento a basse emissioni di carbonio. Come si vede dalla selezione dei progetti, la programmazione europea ha infatti conferito ampio spazio e sviluppo proprio perché l'utilizzo di risorse energetiche è diventato un aspetto sempre più importante della politica europea per fronteggiare i fattori scatenanti dei cambiamenti climatici [65].

Il progetto **Heat Roadmap Europe** sta mappando e modellando i sistemi di riscaldamento ed energia dei 14 Stati Membri dell'UE, che insieme rappresentano circa l'85-90% del riscaldamento e raffreddamento totale in Europa. L'obiettivo è sviluppare nuove politiche a livello locale, nazionale e comunitario per assicurare l'adozione di soluzioni di riscaldamento e raffreddamento efficienti, sostenibili ed economiche.

Il progetto **WEDISTRICT** intende mostrare soluzioni di riscaldamento e raffreddamento completamente prive di combustibili fossili per sistemi di teleriscaldamento e raffreddamento nuovi ed esistenti. Queste soluzioni integreranno: diversificate fonti di energia rinnovabile e di calore in eccesso dai data center, stoccaggio termico avanzato e tecnologie intelligenti per aumentare l'efficienza operativa dei sistemi. Quattro progetti su scala reale in Spagna, Romania, Polonia e Svezia sono dedicati all'implementazione, con l'obiettivo di replicare le migliori pratiche in diverse zone climatiche e diverse tipologie edilizie.

Il progetto **PLANHEAT** ha l'obiettivo principale di sviluppare e convalidare, in scenari di casi reali, uno strumento integrato e facile da usare, che supporti le autorità locali a selezionare, simulare e confrontare scenari alternativi a bassa emissione di carbonio ed economicamente sostenibili per il riscaldamento e il raffreddamento.

Il progetto **HotMaps** mira a progettare un toolbox per supportare le autorità pubbliche, le agenzie per l'energia e i pianificatori urbani nella pianificazione strategica del riscaldamento e del raffreddamento a livello locale, regionale e nazionale, e in linea con le politiche UE.

Il progetto **CoolHeating** intende sostenere l'attuazione di "piccole reti modulari di riscaldamento e raffreddamento rinnovabili" per le comunità del Sud-Est Europa. CoolHeating trasferisce la conoscenza dai partner dei paesi in cui esistono esempi di teleriscaldamento e raffreddamento rinnovabili ai paesi il settore non è ancora sviluppato.

Il progetto **RELaTED**: L'obiettivo principale di RELaTED è quello di fornire un concetto di soluzioni di rete decentralizzate a bassissima temperatura (ULT) che possono aprire la strada per stabilire, espandere e modernizzare le reti di teleriscaldamento in Europa. Il concetto mira a consentire l'uso di temperature significativamente più basse nelle reti di teleriscaldamento. Il progetto segue la strategia delle reti elettriche intelligenti (electrical smart grids), in cui la generazione di energia è decentralizzata e i consumatori si evolvono in prosumer. La metodologia viene applicata in quattro ambienti operativi complementari in Danimarca, Estonia, Serbia e Spagna.

Il progetto **Tempo** sviluppa innovazioni tecniche che permettono alle reti di teleriscaldamento di funzionare a temperature più basse e le rendono adatte a un sistema energetico sostenibile. Il progetto mira a combinare singole tecnologie in pacchetti di soluzioni per aree di applicazione dedicate che coprono il 90% del mercato europeo del teleriscaldamento. TEMPO cerca inoltre di responsabilizzare i consumatori attraverso soluzioni digitali e svilupperà nuovi modelli di business.

Il progetto **ReUseHeat** vuole mostrare alcuni modelli replicabili di recupero e riutilizzo del calore in eccesso disponibile a livello urbano, con l'obiettivo di aumentare l'efficienza energetica dei sistemi di teleriscaldamento e raffreddamento nelle città di tutta Europa.

Il progetto **COOL DH** mostra come i sistemi di teleriscaldamento possano essere più efficienti in termini di risorse e di energia. COOL DH è progettato per innovare, dimostrare, valutare e diffondere le soluzioni tecnologiche necessarie per utilizzare fonti di calore di scarto di bassissima qualità per il riscaldamento di edifici efficienti dal punto di vista energetico attraverso il Low Temperature District Heating (LTDH).

Il progetto **KeepWarm**: Il progetto è concepito per accelerare gli investimenti economicamente vantaggiosi nella modernizzazione dei sistemi di teleriscaldamento (DHS) e ridurre le emissioni di gas serra migliorando le operazioni del sistema e promuovendo il passaggio a fonti meno inquinanti. L'attenzione si concentra sull'Europa centrale e orientale, con le migliori pratiche che replicano l'approccio di KeepWarm per un riscaldamento e raffreddamento più rispettoso dell'ambiente e che dovrebbero essere adottate in tutta Europa.

Mantenendo il focus a scala urbana, meglio di quartiere, sono stati finanziati progetti che miravano anche al recupero del patrimonio immobiliare.

Infatti già il 7FP conteneva un consistente sostegno economico destinato a favorire ricerche e progetti sui temi delicati dell'energia e dell'ambiente [66,67]. In questi particolari campi di ricerca, è possibile trovare importanti progetti che mirano a sviluppare strategie per la progettazione, la costruzione e la gestione di opere di ristrutturazione di edifici soprattutto per dimostrarne la replicabilità dei processi per ottenere un impatto sostanziale in termini di risparmio energetico e riduzione dei gas serra.

Tra quelli finanziati nel 7FP sono stati selezionati tre progetti riconosciuti come trainanti nel rinnovamento degli edifici, andando a una scala urbana o comunque a un livello più ampio della singola unità residenziale: EU-GUGLE, R2CITIES e SINFONIA [68]. La panoramica di seguito riportata è motivata anche dal fatto che sono presenti città pilota che hanno affrontato il tema di questa ricerca, indagando e promuovendo soluzioni di riqualificazione applicabili a quartieri esistenti.

EU-GUGLE è l'acronimo di "European cities serving as Green Urban Gate towards Leadership in sustainable Energy". Il progetto mira a dimostrare la fattibilità di edifici a energia quasi zero e di modelli di ristrutturazione a livello distrettuale al fine di attivare processi di replica su larga scala nelle città e comunità urbane entro l'anno 2020. Durante i 5 anni del progetto, otto città pilota - Vienna (AT), Aachen (DE), Milano (IT), Sestao (ES), Tampere (FI) Bratislava (SK), Gothenburg (SE) e Gaziantep (TR) - si sono impegnate a rinnovare più di 220.000 m² di spazi abitativi al fine di raggiungere, entro il 2018, un risparmio di energia primaria tra il 40% e l'80% per città e, nello stesso sforzo, aumentare la quota di fonti di energia rinnovabile (RES) del 25%. Si prevede che altre città partecipino al progetto nel corso della sua durata, una volta che i risultati abbiano dimostrato la fattibilità dei risultati attesi.

Per raggiungere gli obiettivi proposti, le otto città pilota hanno unito i loro sforzi per combinare ricerca e conoscenza per ottenere una ristrutturazione intelligente di gruppi di edifici a livello distrettuale e per implementare i progetti risultanti con un mix di soluzioni tecnologiche, finanziarie, socio-economiche e tecniche adattate ad ogni esigenza locale. Per confermare i risultati attesi, i processi di ristrutturazione e i risultati sono stati monitorati e valutati dal punto di vista della fattibilità finanziaria e delle prestazioni energetiche degli edifici interessati.

I risultati delle strategie che le città pilota hanno sviluppato durante i progetti di cinque anni sono integrati in "strategie di rinnovamento intelligente", che possono essere facilmente replicate da altre amministrazioni locali grazie ad una campagna di comunicazione e divulgazione a livello europeo.

Questo progetto fa parte della Smart Cities and Communities Initiative della Comunità Europea che mira a promuovere la diffusione a livello europeo delle buone pratiche e dei migliori esempi per aiutare le città e le comunità a raggiungere, entro il 2020, una riduzione del 40% delle emissioni di gas serra [69,70].

L'obiettivo di **R2CITIES** [71] è lo sviluppo e la dimostrazione di strategie replicabili per la progettazione, la costruzione e la gestione di progetti di rinnovamento distrettuale su larga scala al fine di raggiungere quartieri a energia quasi zero. Lo scopo di questo progetto è quello di sviluppare e dimostrare una strategia facilmente replicabile attraverso un quadro di dimostrazione e diffusione di strategie e soluzioni innovative per la ristrutturazione di edifici a livello di quartiere, verso un quartiere a energia quasi zero.

Per lo sviluppo dei progetti, sono stati scelti tre diversi siti dimostrativi in diversi paesi, condizioni climatiche e con diverse abitudini degli utenti, Genova (IT), Valladolid (ES) e Kartal (TR). Dopo aver determinato i casi studio dimostrativi, il lavoro è continuato con diversi studi e idee di progetto per le soluzioni economicamente vantaggiose per il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici a livello di distretto. Anche in questo progetto i casi sono stati misurati e verificati a fondo per definire le loro prestazioni energetiche e il risparmio energetico.

Dopo la raccolta dei dati e l'individuazione delle buone pratiche, è stato realizzato un ambizioso programma di divulgazione per diffondere i risultati dei lavori e assicurare la diffusione e la replica dei modelli delle città pilota. I tre siti dimostrativi sono stati utilizzati per dimostrare la bontà e la replicabilità dei framework del progetto: il piano di ristrutturazione dei quartieri ha coinvolto quasi 60,000 m², più di 859 abitazioni e quasi duemila utenti per una riduzione del consumo energetico stimata vicina al 60% [72].

Il progetto **SINFONIA** [73] è un'iniziativa di 5 anni per organizzare soluzioni energetiche su larga scala nelle città europee di medie dimensioni. Poiché quasi l'80% dei cittadini europei vive in aree urbane, le città hanno un ruolo cruciale da svolgere nella transizione verso un futuro a basse emissioni di carbonio. Per raggiungere questo obiettivo, la città deve concentrarsi su un livello più alto del singolo edificio e cercare di sviluppare strategie integrate di miglioramento urbano per renderla più sostenibile [74].

Le città promotrici di questo processo di trasformazione sono Bolzano (IT) e Innsbruck (AT), realtà che hanno avviato una collaborazione finalizzata ad ottenere un risparmio di energia primaria intorno al 40-50% e un aumento dell'uso delle rinnovabili al 20%. Per raggiungere gli obiettivi, le città pilota hanno sviluppato un insieme integrato di misure per rinnovare più di 100,000 m² di superfici abitative e soluzioni per ottimizzare le reti elettriche, nonché il miglioramento o la costruzione di sistemi di teleriscaldamento e raffreddamento.

Dopo la progettazione e la costruzione dei piani del progetto, la parte più difficile è stata quella di colmare il divario tra la fase dimostrativa e la replica in altre realtà, anche in scala maggiore. Per facilitare questa fase, è stato definito solo un piccolo insieme di tipologie di quartiere con i relativi interventi di retrofit, permettendo così al cluster di città replicanti di accedere facilmente a tutte le informazioni necessarie per definire le proprie strategie di ristrutturazione e, in questo modo, garantire la trasferibilità e la scalabilità dei progetti. Le città che hanno deciso di partecipare al progetto e di adottare nel più breve periodo sono state Pafos (CY), Rosenheim (DE), Siviglia (ES), La Rochelle (FR), e Borås (SE) [75,76].

2.2.1. Discussione casi pilota esemplari in città italiane

In tutti i progetti presentati, l'obiettivo principale è l'ottimizzazione dei sistemi di riscaldamento di una città, vale a dire la ristrutturazione e il miglioramento delle infrastrutture energetiche, degli ambienti costruiti, del design urbano e dei servizi, garantendo l'interazione tra di essi. Importante è anche il coinvolgimento degli stakeholder nel processo: poiché le città pilota stanno lavorando su quartieri già esistenti, l'implementazione delle misure pianificate non sarebbe possibile senza gli input di tutti i partecipanti [77].

Ogni città pilota ha individuato un quartiere con l'intento di rivitalizzarne la vita e le funzioni come esempio per la città stessa e per altre realtà in Europa. Questo è l'obiettivo principale dei progetti: "[fornire] strategie replicabili e soluzioni concrete per progetti di ristrutturazione su larga scala in tutta Europa" [77]. In questo contesto il concetto di distretto necessita di un chiarimento. Quando si parla di quartieri cittadini, si intende un gruppo di edifici contigui che formano un agglomerato di servizi e soluzioni abitative che creano una varietà di utilizzo degli edifici, in grado di soddisfare ogni esigenza della popolazione ospitata nell'area. Questo tipo di area di solito è facile da interconnettere a un sistema comune di approvvigionamento energetico o è già connesso. La diversità d'uso degli edifici si riflette in una varietà di stakeholder che influenzano i processi decisionali e le fasi di progettazione.

L'Italia ha un ruolo importante nella comunità scientifica europea per quanto riguarda il rinnovamento degli edifici e dei quartieri: poiché la maggior parte del patrimonio edilizio è stato costruito prima dell'implementazione di qualsiasi regolamento termico europeo, le costruzioni e i sistemi di distribuzione dell'energia hanno bisogno di ristrutturazioni per raggiungere gli standard europei [78]. Pertanto, anche nei progetti sopra menzionati, ha un ruolo di primo piano, grazie alla partecipazione di città pilota italiane in ogni progetto: Milano per EU-GUGLE, Genova per R2CITIES e Bolzano per SINFONIA.

I seguenti paragrafi presentano una panoramica e una discussione degli aspetti più importanti di ogni progetto relativo alle città italiane.

Milano

Milano è la seconda città più grande d'Italia con una popolazione di circa 1.35 milioni di persone distribuite in un'area di circa 182 km². È il principale centro finanziario, industriale e commerciale d'Italia ed è divisa in 9 zone amministrative. La "Zona 4" è una delle nove zone amministrative di Milano e si trova al confine sud-est della città. Con una popolazione di circa 152,000 abitanti, distribuiti su una superficie di 21 km², ha una densità di circa 7,250 abitanti per km², simile alla densità media di ogni altro quartiere di Milano. Il quartiere "Zona 4" grazie al progetto EU-GUGLE e alla sua implementazione di azione e design è un perfetto caso di studio per ideare, testare e mettere a punto soluzioni innovative da replicare alla scala dell'intera città [79].

Il primo intervento nell'area ha riguardato un complesso residenziale pubblico, adibito ad edilizia sociale, suddiviso in due blocchi di appartamenti: la superficie lorda di pavimento dell'intervento era di circa 11,000 m², con un volume lordo totale di 33,200 m³. Gli edifici giacevano in cattive condizioni e gli occupanti vivevano in un ambiente interno di bassa qualità a causa delle basse prestazioni termiche dell'involucro e della scarsa qualità degli impianti dell'edificio. I lavori sul complesso residenziale sono stati divisi in due fasi principali: la prima si è concentrata sull'isolamento termico degli edifici, mentre la seconda fase ha riguardato il miglioramento degli impianti tecnologici del complesso.

Nella prima fase l'involucro degli edifici è stato riqualificato migliorando la resistenza termica delle pareti esterne e del pavimento con l'aggiunta di strati isolanti sulle strutture esistenti, invece il tetto è stato rinnovato appiattendolo la copertura a falde e aggiungendo strati isolanti nella stratigrafia del nuovo tetto. I sistemi di vetrate esterne sono stati sostituiti da nuove vetrate ad alte prestazioni e componenti del telaio, sono stati aggiunti nuovi dispositivi esterni motorizzati di protezione solare.

L'intervento nella seconda fase si è concentrato sugli impianti tecnologici degli edifici: è stato installato un sistema di ventilazione meccanica decentralizzato con recupero di calore ed è stato sviluppato un sistema di raffreddamento passivo, utilizzando la ventilazione naturale notturna controllata. Inoltre, il sistema di gestione degli edifici è stato aggiornato con l'installazione di vari dispositivi: sensori per la misurazione di illuminamento, di emissioni di CO₂ e di temperatura e umidità; dimmer e interruttori per l'illuminazione; sistemi di ventilazione, di protezione solare esterna, di apertura delle finestre e valvole termostatiche per la regolazione del sistema di riscaldamento. Infine, per raggiungere la quota prevista di energie rinnovabili nel progetto, è stato installato un impianto fotovoltaico sul tetto degli edifici e il sistema di riscaldamento è stato collegato alla rete locale di teleriscaldamento [80].

I lavori di ristrutturazione hanno portato ad una riduzione dell'86% del fabbisogno energetico per il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria (ACS), passando da 250 kWh/m² anno a 35 kWh/m² anno. Questo è stato possibile grazie all'accurata ristrutturazione dell'involucro, considerando anche la correzione dei ponti termici, che ha migliorato non solo le prestazioni energetiche dell'edificio ma anche il comfort termico dell'ambiente interno. Per raggiungere e superare l'obiettivo iniziale dell'82% di risparmio energetico un ruolo importante è stato svolto dal collegamento alla rete di teleriscaldamento e dall'installazione di pannelli fotovoltaici.

Tuttavia, alcune sfide e difficoltà sono state incontrate durante i processi di ristrutturazione perché è stato necessario fornire agli inquilini alloggi temporanei durante i lavori, dato che questi dovevano svolgersi senza gli abitanti. Lavorare in una struttura esistente era anche problematico per il fatto che la struttura non era abbastanza flessibile per quanto riguarda la necessità di creare spazi per le nuove attrezzature tecnologiche, e infine l'impresa di costruzioni non sempre ha dimostrato sensibilità o attenzione nell'installazione dell'isolamento, causando problemi e ritardi nei lavori [81].

Il progetto EU-GUGLE non è ancora concluso per Milano, le prossime attività saranno la ristrutturazione di altri due edifici di edilizia sociale e il retrofit di un centro per l'infanzia per raggiungere un edificio nZEB [80].

Genova

Una delle città pilota del progetto R2CITIES è Genova, il centro amministrativo della regione Liguria e la sesta città più grande d'Italia. Con una popolazione di quasi 610,000 abitanti è una delle più grandi città del Mediterraneo e il più grande porto marittimo d'Italia, ospitando, fin dal XIX secolo, imponenti cantieri navali e fabbriche siderurgiche [82]. Il sito dimostrativo selezionato dal comune di Genova si trova nel quartiere di Pegli 3, una zona nella parte occidentale della città originariamente destinata ad ospitare migliaia di abitanti. L'area è divisa in diverse zone con diversi usi finali: aree non sviluppate, servizi sociali, complessi di edilizia privata, edilizia sociale pubblica e infine la parte che ha rappresentato il demo site di R2CITIES: il complesso denominato "Lavatrici" per la somiglianza degli edifici all'elettrodomestico).

Il complesso delle Lavatrici è stato costruito tra il 1980 e il 1990 su un'area di 40.000 m² ed è costituito da 8 blocchi principali per un volume totale di quasi 230,000 m³, corrispondente a 64,000 m²; a causa delle grandi dimensioni e del carattere in parte pubblico e in parte privato degli edifici, questo quartiere residenziale presenta diverse criticità ambientali e di utilizzo energetico. L'efficienza è bassa in termini di trasmittanza e in termini di fabbisogno energetico per metro quadro di superficie totale utilizzata; lo stesso si può dire per le prestazioni igrometriche per quanto riguarda la condensazione interstiziale e superficiale e la formazione di muffe.

Gli edifici del quartiere Lavatrici presentano una struttura in cemento armato gettato su fondazione continua o pilotis, un tetto piano e pareti verticali con diverse configurazioni: pannelli prefabbricati riempiti di isolamento termico sulle pareti esterne Est-Ovest; parete in cemento armato con strato di unità cave e con isolamento termico pareti Sud-Nord; le finestre sono solo nella facciata Est e Ovest e sono a doppio vetro riempito d'aria e con telaio metallico.

Poiché il quartiere presenta una quantità significativa di superficie edificata, la soluzione più adatta per raggiungere un distretto a energia quasi zero è stata quella di considerare per il progetto solo una parte dell'intero quartiere: sono stati considerati solo i due blocchi di grattacieli, corrispondenti a quasi 160 abitazioni e 18,000 m² di superficie coperta. La domanda globale di energia di questi blocchi di abitazioni era di 592,000 kWh/a e il consumo energetico era di 1,030,000 kWh/a.

L'intervento definito per i blocchi di appartamenti considerati è stata la sostituzione delle finestre con nuove più performanti, caratterizzate da un coefficiente di trasferimento del calore compreso tra 4 e 2 W/m²K delle vecchie finestre e un valore U inferiore a 1.5 W/m²K per le nuove. Questo rappresenta un intervento di medio costo (circa un miliardo di Euro per la sostituzione delle finestre), ma contribuisce a ridurre le perdite di energia e i guadagni di calore. Il risparmio energetico dato da questo intervento è stato di circa 206,000 kWh/a, portando a risparmiare 18,950 €/a in bolletta e 41,200 kgCO₂ emessa annualmente.

Anche l'impianto di riscaldamento è stato rinnovato: la vecchia caldaia da 628 kW alimentata a gas naturale è stata sostituita con una più efficiente da 200 kW e tutti gli impianti ad essa collegati sono stati rinnovati con apparecchiature innovative e più performanti. Questo intervento è costato circa 400,000 € e ha permesso di risparmiare 154,000 kWh/a di energia, riducendo la bolletta energetica di circa 14,200 €/a, e sono state ridotte di 30,900 kgCO₂ di emissioni.

L'ultimo intervento è stata l'installazione di valvole termostatiche e sistemi di misurazione in tutte le 160 abitazioni considerate. Con un costo di 100,000 € questo intervento ha fatto risparmiare 257,500 kWh/a di energia, 23,700 €/a nella fatturazione dell'energia ed evitato 51,500 kgCO₂/a.

In totale l'insieme degli interventi ha dimezzato il consumo energetico pre-intervento, da un consumo energetico globale di 1,030,000 a 510,000 kWh/a; la domanda globale di energia è diminuita a 474,000 kWh/a rispetto al valore pre-intervento di 592,000 kWh/a (-20%) [83].

Bolzano

Bolzano è la città pilota italiana del progetto SINFONIA. Con 108,000 abitanti è il capoluogo della provincia autonoma dell'Alto Adige nel nord Italia ed è un centro molto attivo per quanto riguarda gli studi di retrofitting edilizio e sviluppo delle energie rinnovabili. In quest'ottica, a partire dal 2005, l'amministrazione comunale ha sviluppato diversi piani d'intervento per la riqualificazione di ampie porzioni del suo tessuto urbano, prevedendo l'uso di fondi da investimenti privati e pubblici [73].

I lavori del progetto SINFONIA fanno parte di questa serie di investimenti che prevedono la realizzazione di progetti finalizzati a un risparmio di energia primaria intorno al 50% e all'aumento della quota di FER del 20% nei siti dimostrativi [84].

I quattro cantieri dimostrativi nella città di Bolzano rappresentano circa 350 abitazioni (21,700 m²) e appena 85,000 m³, una cifra esigua se si considerano i numerosi edifici abitativi della città che necessitano ancora di una ristrutturazione per soddisfare gli ambiziosi standard fissati dagli amministratori locali e provinciali. Sono stati tutti costruiti tra il 1960 e il 1985, e anche se situati in zone diverse della città, presentano le caratteristiche tipiche degli edifici residenziali di quegli anni: sono composti da diversi blocchi adiacenti, ognuno dei quali servito da un vano scala, che collega i vari piani.

La struttura è un telaio in cemento armato con pareti esterne non portanti in mattoni forati e uno strato isolante esterno in polistirolo di spessore variabile da 4 a 6 cm. Vetusti e poco performanti doppi vetri con telaio in legno compongono le vetrate, sopra le finestre l'involucro avvolgibile crea un notevole ponte termico. Anche gli impianti tecnologici sono tipici dell'epoca: caldaie a gas monofamiliari rappresentano i generatori di riscaldamento e di acqua calda sanitaria con l'acqua non riscaldata fornita per mezzo di tubazioni poco isolate che passano negli spazi vuoti tra le abitazioni e il riscaldamento assicurato da radiatori.

Gli interventi di ristrutturazione progettati per gli edifici considerati hanno interessato principalmente l'involucro esterno dei blocchi: per ridurre al minimo l'impatto e i problemi legati ai cantieri in tutta l'area demo, sono stati utilizzati elementi prefabbricati per rinnovare la facciata degli edifici. Gli obiettivi principali erano il miglioramento dell'involucro termico della struttura attraverso l'applicazione di strati isolanti più spessi e sistemi di vetrate e cornici più performanti, ridurre i ponti termici presenti nella situazione business as usual (BAU) e migliorare la qualità abitativa attraverso l'installazione di un sistema di ventilazione meccanica. Per quanto riguarda il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria, le caldaie monoblocco sono state rimosse e gli edifici sono stati collegati alla rete di teleriscaldamento, dopo il rinnovamento delle tubazioni. Per contribuire al risparmio energetico e per raggiungere l'aumento delle FER in tutti i siti dimostrativi sono stati installati pannelli fotovoltaici sul tetto o sulla facciata sud dell'edificio, in caso di indisponibilità del tetto, e sono stati collocati collettori solari termici per coprire fino al 50% della produzione di acqua calda sanitaria.

Il consumo totale per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e l'illuminazione degli edifici è di circa 880 kWh/a, con un consumo medio di quasi 220 kWh/a per edificio.

Tabella 1 – Riepilogo dati dei casi studio italiani.

| | | Fabbisogno di energia [kWh/m ² a] | Consumo di energia [kWh/m ² a] | Investimento [Milioni di €] |
|---------|-----------|---|--|--------------------------------|
| Milano | Pre-int. | 250 | n/a | 0.9 |
| | Post-int. | 35 | n/a | |
| | | - 86% | | |
| Genova | Pre-int. | 33 | 58 | 1.5 |
| | Post-int. | 27 | 29 | |
| | | - 20% | - 50% | |
| Bolzano | Pre-int. | n/a | 880 | 14.7 |
| | Post-int. | n/a | 240 | |
| | | | - 75% | |

Gli interventi descritti (Tabella 1) hanno portato a risparmiare circa il 75% del consumo di energia registrato prima dei lavori, passando da 880 a 240 kWh/m² annuo (con una media di 60 kWh/m² annuo per edificio). Questo calcolo non prende in considerazione il contributo delle FER grazie al quale il risparmio energetico raggiunge una media di 40 kWh/m² a per edificio (160 kWh/m² annuo in totale) indicando che il loro impatto è circa il 35% [85–88].

2.2.2. Riepilogo

L'Unione Europea è impegnata a sviluppare un sistema energetico sostenibile e decarbonizzato inserendo misure dedicate soprattutto nelle costruzioni, che risulta il settore con le maggiori responsabilità.

Oltre a un solido quadro normativo di base che va recepito dai singoli Stati Membri, la Comunità europea ha predisposto ingenti fondi per progetti e programmi dedicati a questo obiettivo. Infatti, sforzi significativi della ricerca accademica, dell'ambito industriale e della politica sono dedicati alla riqualificazione energetica efficiente a scala di quartiere e all'integrazione degli edifici in sistemi energetici intelligenti, compresa la connessione a reti a basso consumo energetico e l'integrazione di fonti di generazione energetica distribuita basate sulle FER.

La panoramica esposta dimostra come il tema della rete energetica sia oggetto di numerosi progetti, seppur con varie declinazioni e livelli di approfondimento: dimensionamento, quantificazione dei fabbisogni, combinazione di tipologie e implementazione con le FER, gestione in remoto. Ampio spazio è dato alla diffusione del riscaldamento e il raffreddamento a basse emissioni di carbonio.

Una parte dei progetti è dedicata a un processo olistico di intervento su scala urbana, ovvero all'integrazione di opere architettoniche con interventi impiantistici a livello distrettuale. Alcuni casi studio esposti, riferiti a programmi diversi, evidenziano aspetti caratteristici per tipologia di edifici e strategia di riqualificazione, evidenziando gli obiettivi raggiunti e le criticità riscontrate.

La progettazione effettuata non è di tipo urbano o di tipo distrettuale: assomiglia piuttosto a intervento di riqualificazione di edifici collegati tra loro. Questo è motivato dal fatto che si tratta pur sempre di casi pilota utili a dimostrare la validità e la sostenibilità del progetto che poi verranno replicati su scala urbana. Inoltre questi programmi richiedono investimenti iniziali, paragonabili a quelli delle nuove costruzioni, che vanno in parte coperti con i finanziamenti messi a disposizione. Infatti gli esempi italiani mostrano come i progetti siano stati sviluppati in distretti composti da una piccola quantità di edifici, anche se con alta densità abitativa ed elevato numero di alloggi.

Inoltre, le strategie di intervento risultano simili e appartengono a una pratica diffusa e consolidata di ristrutturazione ed efficacia nel risparmio energetico. Il dato più rilevante che si evidenzia è che il duplice intervento integrato permetta di raggiungere più efficacemente gli obiettivi prefissati. Per esempio un intervento sull'involucro opaco di edifici esistenti riduce il fabbisogno energetico e migliora il comfort degli utenti e risolve la scarsa manutenzione edilizia di grandi complessi che risultano vetusti e poco aderenti agli standard attuali. Al contempo, l'intervento architettonico sullo stato attuale permette una nuova impiantistica tarata sul nuovo involucro, quindi un dimensionamento minore, una gestione più semplice, una riduzione delle emissioni GHG, e una manutenzione più controllata. L'intervento sulla parte impiantistica può risolvere anche problemi legati alla parte di distribuzione e di emissione nel caso venga riqualificata in continuità con lo stesso cantiere architettonico.

Le tipologie di intervento possono essere considerate come linee guida per i futuri interventi sul patrimonio edilizio. Gli interventi di ristrutturazione dell'involucro rappresentano misure semplici ed efficaci. Una tipologia interessante può essere progettata con l'uso di sistemi di facciata prefabbricati esterni che risolvono aspetti di qualità architettonica e di cantiere, implementando ad esempio la sostituzione di elementi trasparenti con inserimenti non invasivi di nuova impiantistica. Un altro aspetto importante negli interventi di ristrutturazione è l'attenzione rivolta all'aggiornamento degli impianti di riscaldamento e di acqua calda sanitaria nei singoli edifici: si tratta soprattutto di sostituzioni del generatore o di allacciamento a rete di teleriscaldamento, anche se spesso mancano interventi di ristrutturazione delle tubazioni e dei singoli elementi di distribuzione ed emissione.

L'integrazione con le FER è incentivata e promossa dalle politiche comunitarie e dalla progettazione europea, ma trova sicuramente difficoltà con gli aspetti legati al patrimonio edilizio tutelato come nel contesto italiano o comunque in casi di tutela del patrimonio. Infatti buona parte delle città italiane è caratterizzata da centri storici e da regolamenti edilizi legate a vincoli delle Sovrintendenze che difficilmente si conciliano con l'utilizzo di sistemi impiantistici FER di grandi dimensioni quali pannelli solari e fotovoltaici. Inoltre va considerato che la gestione di sistemi energetici complessi richiede e un'accurata conoscenza delle relative caratteristiche e del comportamento dinamico che è essenziale a garantirne un funzionamento ottimale. Infatti, l'integrazione con sistemi FER ha ovviamente l'obiettivo di ridurre gli sprechi di energia e i costi, ma implica al contempo la necessità di coordinare i relativi flussi tenendo in considerazione una disponibilità imprevedibile e variabile. Implica anche la necessità di progettare e gestire tecnologie su larga scala evitando impianti irrazionali o inadatti. Il livello di complessità aumenta con la necessità di integrare sistemi di accumulo dell'energia prodotta in eccesso o almeno di dilazionare il consumo. In tal senso sono necessari ancora sforzi dei Paesi Membri verso normative specifiche e linee guida per la raccolta e gestione di dati dettagliati affidabili sul settore energetico.

2.3. UBEM, modellazione e strumenti di calcolo software

In questo capitolo viene descritta l'importanza sempre più rilevante che negli ultimi anni ha visto lo sviluppo della modellazione energetica degli edifici urbani (UBEM) nel processo di pianificazione urbana e territoriale.

Vengono descritte le caratteristiche dei principali software di tipo Bottom-Up disponibili per il calcolo dei fabbisogni energetici e per la simulazione delle prestazioni energetiche degli edifici a livello urbano, in regime di calcolo semi-stazionario o dinamico.

Una parte di quanto esposto di seguito è stato pubblicato in una versione estesa in [56,89].

La pianificazione energetica su scala urbana rappresenta un ruolo essenziale come guida verso un futuro sostenibile per gli insediamenti umani, sia a scala di quartiere che di megalopoli. L'integrazione della pianificazione energetica risulta tuttavia impegnativa da inserire nel processo di pianificazione urbana considerando la complessità del sistema urbano, il processo decisionale multi-obiettivo e il coinvolgimento di più parti interessate.

La transizione energetica e l'utilizzo di emergenti tecnologie energetiche urbane di nuova generazione – ad esempio le reti energetiche di quartiere (District Energy Networks, DEN) [90], le reti intelligenti (Smart Grids, SG), i sistemi energetici decentralizzati e edifici NZEB – hanno dato l'opportunità di affrontare enormi sfide legate al cambiamento climatico, alla questione ambientale e alla crescente fenomeno di concentrazione della popolazione nelle città.

Infatti per esempio un sistema energetico distrettuale è caratterizzato dall'utilizzo di fonti multi-energetiche e dalla fornitura di riscaldamento, raffreddamento ed elettricità ai quartieri con una combinazione distrettuale di impianti di energia, sistemi di stoccaggio dell'energia e sistemi di distribuzione. Rispetto ai sistemi convenzionali, i sistemi distrettuali portano a benefici quali un'efficienza complessiva relativamente più alta, un costo annuale inferiore per i clienti, una maggiore flessibilità nell'integrazione delle risorse energetiche rinnovabili disponibili localmente (come l'energia solare, la biomassa e la geotermia) e un potenziale significativo per la riduzione dei gas serra GHG [90,91].

Negli ultimi anni quindi l'approccio alla pianificazione urbana è tendenzialmente cambiato e si basa sull'energia o meglio sulle prestazioni energetiche che permettano di ottimizzare o addirittura generare morfologie urbane dal punto di vista energetico. In questo contesto è sorta la necessità di introdurre e sviluppare adeguati strumenti di modellazione e simulazione energetica urbana (Urban Building Energy Model, UBEM) nelle varie fasi di pianificazione [92].

2.3.1. UBEM, modellazione e simulazione energetica urbana

Gli strumenti UBEM hanno un alto potenziale per rafforzare l'integrazione degli aspetti multidisciplinari delle questioni energetiche nel processo di pianificazione urbana [93,94]. Il metodo UBEM è ampiamente utilizzato nella valutazione dei consumi energetici tra forme urbane alternative, nell'ottimizzazione della gestione energetica sia dal lato dell'offerta che della domanda di energia e nell'analisi di scenario dei potenziali di risparmio energetico delle tecnologie [92,95,96].

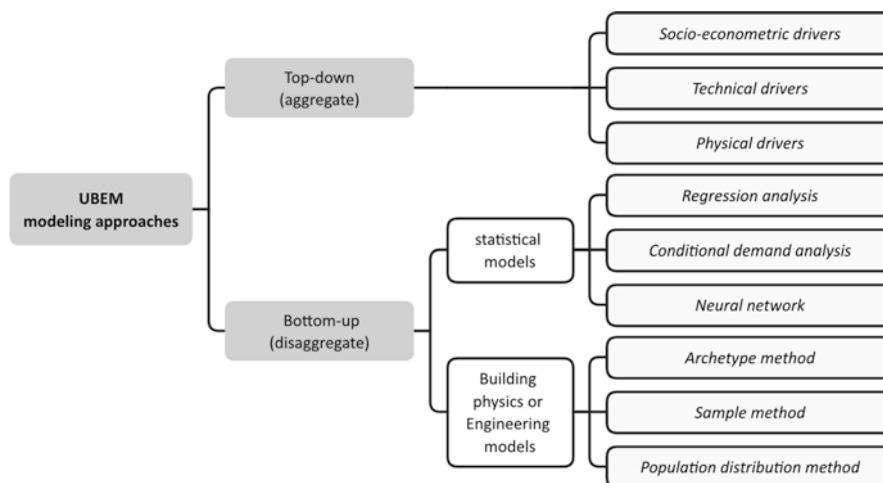


Figura 2 – Approcci di modellazione UBEM

Sulla base degli approcci di modellazione (Figura 2), la modellazione UBEM può essere classificata in modelli Top-Down e modelli Bottom-Up [94,97,98].

L'approccio Top-Down consiste nel determinare le prestazioni degli edifici partendo da dati aggregati e trovando una relazione tra le informazioni statistiche sulle caratteristiche della costruzione e i relativi consumi. È stato considerato adatto nella stima delle politiche energetiche a lungo termine e su larga scala; tuttavia, ha evidenti limitazioni quando si tratta di analisi energetiche per un gruppo di edifici nel contesto urbano [99].

L'approccio Bottom-Up prevede la definizione delle prestazioni complessive del patrimonio edilizio partendo dalla valutazione a livello di singolo edificio, le informazioni sono dedotte attraverso statistiche ufficiali (statistical-based models), o per mezzo di modelli numerici, attestati di prestazione energetica e modelli basati sulla fisica (physics-based models). I modelli statistici stabiliscono correlazioni tra l'uso effettivo di energia e i fattori trainanti come le caratteristiche del parco edilizio, il clima locale e il comportamento degli occupanti a livello di edificio o di quartiere, adottando analisi di regressione, analisi della domanda condizionale e tecniche di apprendimento automatico (machine learning techniques) [100]. Al contrario, i modelli di fisica degli edifici si basano su simulazioni termodinamiche [101], che sono stati riconosciuti come adatti per la valutazione e l'ottimizzazione dei retrofit energetici su diverse scale spazio-temporali. Di conseguenza, sono essenziali dati di alta qualità e notevoli sforzi computazionali per supportare efficacemente e generare modelli di fisica degli edifici ad alta fedeltà.

I modelli energetici Top-Down funzionano come un modello black-box, noto anche come inverse-modelling technique che adotta forme di regressione per il calcolo degli indicatori energetici, mentre i modelli energetici Bottom-Up invece funzionano come un modello white-box, noto anche come forward modelling technique, che necessita di una quantità di dati fisici rilevanti relativi all'involucro edilizio e applica un approccio deterministico per modellare l'edificio tramite equazioni matematiche dettagliate physics-based. Come meglio specificato nei prossimi capitoli, il modello può essere analizzato sia in regime di calcolo dinamico che stazionario: il primo, più accurato, richiede metodologie di calcolo più complesse, al contrario il secondo applica un metodo semplificato con valori medi mensili e fornisce risultati meno accurati.

I modelli basati sulla fisica possono essere ulteriormente suddivisi in modelli dettagliati di simulazione termica dinamica multizona e modelli di resistore-condensatore (RC) di ordine ridotto basati sul metodo di simulazione. I primi modelli usano equazioni dettagliate del bilancio termico dinamico delle pareti, delle zone e dei sistemi energetici; mentre i secondi fanno uso di modelli RC in cui, di solito, ogni edificio è rappresentato da una singola zona termica [102].

L'approccio top-down è stato utilizzato per valutare l'analisi su larga scala, ma non è adatto per i miglioramenti a scala di edificio. Invece, l'approccio Bottom-Up è più adatto per l'analisi regionale e urbana poiché la modellazione dei sistemi energetici richiede un approccio basato sui dettagli [103].

In questo studio sono stati valutati strumenti UBEM di tipo Bottom-Up in quanto la domanda energetica degli edifici è significativamente influenzata dagli effetti microclimatici e dagli effetti interattivi tra gli edifici, tra cui l'emissione di calore a onde lunghe e l'ombreggiamento, così come lo scambio di calore tra gli edifici e l'ambiente urbano [104].

La rappresentazione più realistica del consumo energetico urbano rappresenta l'aspetto più vantaggioso della modellazione Bottom-Up. Altri vantaggi di conseguenza sono determinati dalla possibilità di individuare il contributo del singolo edificio al consumo energetico dell'area urbana considerata, di considerare in fase di input dati relativi al comportamento degli occupanti e agli apporti gratuiti di calore dovuti alla radiazione solare, oltre che alle proprietà geometriche e le caratteristiche dell'involucro dell'edificio e alla tipologia e all'utilizzo di apparecchi ed elettrodomestici. Infine, ma non meno rilevante, i modelli Bottom-Up permettono di simulare, identificare e ottimizzare scenari migliorativi per la riduzione di consumi energetici. Di contro, i limiti dei modelli bottom-up sono costituiti dalla semplificazione dei sistemi costruttivi, degli effetti del microclima e della definizione del contesto urbano.

2.3.2. Strumenti di calcolo per la simulazione energetica degli edifici

Lo sviluppo di strumenti informatici e dei software per la simulazione energetica dinamica degli edifici ha avuto un incremento negli ultimi anni in seguito all'intensificarsi dell'attività di ricerca sull'analisi delle prestazioni e del comportamento degli edifici, soprattutto per quelli sottoposti a retrofit. La letteratura scientifica che ha studiato gli strumenti per le simulazioni dinamiche è già ampia, e vari manoscritti si occupano di confrontare i software esistenti [105–108]. In particolare, gli studi di Zakula [109] e Connolly [110] hanno concluso che, tra tutti i software analizzati, nessuno era in grado di indagare tutti gli aspetti relativi alle prestazioni dei sistemi edilizi e al loro miglioramento. Inoltre, è stata approfondita l'integrazione delle RES nel processo di ristrutturazione, sottolineando l'assenza di uno strumento appropriato in grado di trattare questo argomento [109,110]. Sebbene manchi un software completo per l'analisi energetica dinamica degli edifici, alcuni software sono comunemente usati nel mondo accademico per affrontare questi temi. La simulazione del consumo energetico è molto critica e TRNSYS [111] e Energy Plus [111–114] sono i software più utilizzati sia per usi residenziali che commerciali. Altri esempi di software molto usati sono Trace 700 ed eQUEST [115,116]. Le ragioni principali del loro successo dipendono dalla possibilità di analizzare nel dettaglio le caratteristiche degli impianti energetici e tecnologici degli edifici e di effettuare una simulazione dinamica delle prestazioni.

Anche se offrono numerosi vantaggi, come la precisione nella modellazione, la flessibilità nel loro uso e risultati dettagliati, alcuni svantaggi impediscono l'uso diffuso di questi strumenti. I software per la simulazione di edifici, specialmente quelli citati in precedenza, richiedono un alto livello di competenza nell'utente. Molti parametri di input sono solitamente necessari nel processo di modellazione e caratterizzazione del caso studio. Inoltre, sia la modellazione che il processo di simulazione possono richiedere molto tempo, specialmente quando si esegue la simulazione di grandi complessi o quando è necessario un alto grado di dettaglio. Questi svantaggi sono un ostacolo all'uso diffuso di questo software, specialmente per le persone che non hanno la conoscenza, le competenze specifiche o il tempo per eseguire analisi così lunghe e complesse [107].

Anche gli strumenti semi-stazionari potrebbero essere considerati per determinare i modelli energetici e le simulazioni per gli edifici, specialmente durante la fase iniziale del processo di progettazione per supportare i progettisti e i pianificatori urbani a comprendere la relazione tra la forma costruita, il fabbisogno energetico e il potenziale di energia dell'edificio e del quartiere.

In un regime di regime semi-stazionario le variabili (ad esempio le temperature dell'aria, la radiazione solare) sono costanti nel tempo e i dati che rappresentano le condizioni al contorno (ad esempio le variabili climatiche) sono integrati nel tempo adottando valori medi mensili o medi stagionali (nel caso di metodi per il calcolo del consumo) o un valore di picco (per il dimensionamento degli impianti HVAC) [107]. Questo approccio di solito porta a sovrastimare il numero di ore di funzionamento o a sovradimensionare la capacità dell'impianto perché gli studi di prefattibilità sono basati sul fabbisogno di potenza di picco e solitamente le gestioni aziendali assumono solo dati di consumo mensili o annuali [117] e non di dettaglio orario.

Inoltre, nelle simulazioni energetiche degli edifici, il fabbisogno di energia oraria è comunemente la risoluzione temporale minima richiesta per stimare il fabbisogno di potenza. Tuttavia, la simulazione del fabbisogno di energia degli edifici urbani è più complessa alla scala della città che alla scala dell'edificio, principalmente per diverse ragioni [118]. In primo luogo, sono necessarie grandi quantità di informazioni sulle strutture costruite (geometria, proprietà fisiche dei componenti, ecc.), e l'ambiente urbano di ogni edificio deve essere considerato in termini di punti, carichi meteorologici dipendenti da ostacoli, superfici circostanti, morfologia urbana. Inoltre, la diversità del comportamento degli occupanti, le azioni dirette e l'uso degli impianti di riscaldamento, di ventilazione e dell'aria condizionata (HVAC) alla scala urbana influenzano i modelli spazio-temporali del fabbisogno di energia [119]. Una limitazione chiave dei modelli di regime semi-stazionario consiste nel trattamento piuttosto semplificato degli occupanti degli edifici. Poiché le loro attività sono responsabili del fabbisogno energetico nell'area considerata, è necessaria un'analisi migliore degli effetti degli occupanti sul fabbisogno alla scala del quartiere [120]. Quindi, il massimo fabbisogno totale di energia in un distretto è diverso dalla somma delle massime richieste di energia dei singoli edifici [121].

Molte aziende, comprese le società di risparmio energetico (ESCO), le ditte di software e gli istituti di ricerca hanno sviluppato diversi strumenti per la simulazione energetica dinamica degli edifici negli ultimi anni. In molti casi, questi strumenti si concentrano sulla simulazione di singole unità o piccoli gruppi di edifici [122]. Tuttavia, ci sono anche strumenti sviluppati per studiare le dinamiche dei distretti cittadini e varie configurazioni di interventi di retrofit sugli edifici per allargare lo studio fino a centinaia di edifici. Per questo motivo l'ultimo decennio ha visto lo sviluppo di vari modelli e strumenti specificamente progettati per valutare la domanda e l'offerta di energia degli edifici a livello distrettuale e urbano [122–124].

Per quanto riguarda i modelli energetici a scala di quartiere e di città, alcuni strumenti sono stati sviluppati finora con un approccio semi-stazionario, concentrandosi sui decisori politici come tipi di utenti, rientrando così nella categoria dei modelli di fattibilità o degli strumenti di pianificazione. Sono alcuni esempi il foglio di calcolo elettronico Plan4DE [125], il tool e database ExcEED [126], oppure i software open-source Hotmaps [127] e THERMOS [128,129].

Il progetto **Plan4DE** è stato sviluppato dall'agenzia IEA DHC per la pianificazione del sistema energetico distrettuale in fase di prefattibilità. Si tratta quindi un tool estremamente accessibile e semplice dedicato a professionisti (pianificatori, ingegneri e funzionari eletti) come strumento decisionale per valutare i vantaggi della UBEM, i co-benefici dell'utilizzo dei sistemi energetici distrettuali, esplorando varie opzioni di intervento e le variabili che influenzano a livello energetico.

ExcEED, acronimo di Energy Efficient building & district Database, è una piattaforma condivisa e trasparente realizzata con un fondo europeo H2020 che analizza l'effettivo consumo energetico degli edifici di ultima generazione. L'intento del progetto consiste nel creare un database europeo per dati misurati e qualitativi degli edifici e dei distretti energeticamente efficienti e di ultima generazione, per analizzarne le prestazioni attraverso l'utilizzo di indici di performance (KPI) e per quantificare e confrontare l'efficienza energetica e la qualità ambientale a livello di distretto. Sono stati elaborati strumenti di elaborazione associati al database per analizzare le performance energetiche, valutare la qualità degli ambienti interni, e visualizzare le informazioni a livello di cluster geografico.

Il progetto **HotMaps** ha elaborato un toolbox GIS basato sul web per analizzare la domanda di riscaldamento e raffreddamento e le opzioni di fornitura a livello locale, regionale e nazionale. Il codice sorgente prodotto durante lo sviluppo di HotMaps è rimasto accessibile sulla piattaforma open source GitHub. Le caratteristiche principali riguardano l'identificazione dell'ubicazione della domanda di riscaldamento e raffreddamento e dell'offerta potenziale su una mappa (EU28) con evidenziato il potenziale rinnovabile e industriale in eccesso, la stima delle potenziali opzioni di teleriscaldamento per un'area selezionata, la stima e il confronto dei costi del riscaldamento individuale rispetto al teleriscaldamento e il confronto dei risultati con i piani nazionali di decarbonizzazione.

Il progetto **THERMOS** è stato sviluppato per fornire metodi, dati e strumenti (gratuiti e open source) per consentire una pianificazione più sofisticata dei sistemi di energia termica in modo rapido ed economico. THERMOS Tool è un'applicazione web open-source basata su mappe, dedicata alle esigenze del mondo professionista dei pianificatori di energia per rendere la pianificazione della rete di calore più veloce ed efficiente.

Applicando un approccio di tipo Bottom-Up su modelli physics-based dotati di GUI, sono stati sviluppati altri software che permettono di effettuare una simulazione energetica di edifici su scala urbana. In un recente studio di Ferrando et al. [102] vengono analizzati i principali software attualmente disponibili: CitySim [130], Umi [131], SimStadt [132], CityBES [133], OpenIDEAS [134], CEA [135], UrbanOPT [136] e TEASER [137].

CitySim è stato sviluppato in Java e C++ nel 2009 con l'obiettivo di supportare la pianificazione sostenibile degli insediamenti urbani, simulando le prestazioni energetiche di quartieri che comprendono anche migliaia di edifici. Il modello termico si basa su un circuito elettrico equivalente, nello specifico su una rete resistore-condensatore, che valuta anche le sottozone negli edifici attraverso la conduttanza delle pareti di separazione [138].

SimStadt, sviluppato nel 2013, è una piattaforma di simulazione energetica urbana per supportare la pianificazione della transizione energetica alla scala urbana, consentendo la creazione di scenari di valutazione, attraverso parametri come i tassi di ristrutturazione, orizzonte temporale e indici di priorità. È sviluppato come Javascript ed è integrato con il formato di modello urbano tridimensionale CityGML [139] e Energy ADE [140].

Il MIT Sustainable Design Lab nel 2013 ha creato **umi** (urban modeling interface), un plugin per Rhinoceros che permette molteplici analisi su scala urbana: consumo energetico, mobilità sostenibile, illuminazione diurna, il comfort esterno e la produzione di cibo [141].

Nel 2015 **CityBES** (City Building Energy Saver) è stato rilasciato come piattaforma web-based e interfacciata CityGML in grado di simulare le prestazioni energetiche degli edifici su larga scala. I principali casi d'uso previsti sono: benchmarking energetico, pianificazione energetica urbana (per valutare le migliori strategie per ottimizzare i sistemi energetici), analisi di retrofit energetico e gestione operativa degli edifici, valutazione del potenziale solare fotovoltaico, e visualizzazione del microclima urbano [142].

OpenIDEAS (Open Integrated District Energy Assessment by Simulation) è stato rilasciato nel 2015 come framework open-source basato su Modelica. Permette la valutazione dei profili di carico degli edifici per l'analisi dei sistemi energetici distrettuali ottimizzati. Può simulare edifici integrati con una rete energetica a livello di distretto con particolare attenzione alle reti a bassa tensione. Permette anche l'integrazione di metodi statistici per i campioni di programmazione e di input [143].

Nel 2016 è stato rilasciato **CEA** (City Energy Analyst) che elabora simulazioni energetiche urbane permettendo il confronto di scenari di intervento o pianificazione energetica. Il software è basato su linguaggio Python [144], è caratterizzato da una GUI per la gestione dei dati e inoltre esegue l'ottimizzazione del sistema di approvvigionamento energetico, minimizzando i costi di capitale annuali, o le emissioni annuali di gas serra o i consumi annuali di energia primaria [145].

URBANopt (Urban Renewable Building and Neighborhood optimization), rilasciato nel 2016, consiste in un'applicazione per progettare quartieri a basso consumo energetico e comprende template per sistemi di teleriscaldamento e raffreddamento. La modellazione energetica viene dettagliata a livello di singolo edificio ed è eseguita su piattaforma OpenStudio con motore di calcolo EnergyPlus [146].

TEASER (Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit) è stato rilasciato nel 2018 [147]. Sviluppato in Python, permette di caratterizzare nel dettaglio i sistemi energetici urbani fino alla gestione della distribuzione. Lo strumento consente inoltre la valutazione del potenziale livello di efficienza energetica per interventi sul patrimonio edilizio, combinando più serie di dati per caratterizzare gli edifici ed eseguendo simulazioni dinamiche per determinare il consumo energetico.

2.3.1. Riepilogo

Nel processo di pianificazione urbana la modellazione energetica degli edifici urbani UBEM permette di calcolare la domanda energetica del patrimonio edilizio, includendo analisi di benchmarking, valutazione degli scenari, analisi dei carichi di picco e dei modelli energetici, e altre analisi particolari come la corretta progettazione e l'ottimizzazione dei sistemi energetici.

Negli ultimi anni c'è stato un forte sviluppo di metodologie UBEM e di conseguenza di software valutazione. Gli strumenti UBEM basati sulla fisica Bottom-Up si occupano della rappresentazione numerica delle interconnessioni tra gli edifici e l'ambiente circostante e possono valutare la domanda energetica degli edifici con un'alta risoluzione spazio-temporale. La tendenza della ricerca è quella di implementare questi strumenti, con approccio di modellazione physics based.

Tendenzialmente gli strumenti con interfaccia user-friendly presentano un approccio di calcolo energetico semi-stazionario, sono concentranti su una fase di prefattibilità nel processo di pianificazione urbana e di conseguenza sono dedicati ai decisori politici, o meglio a un'utenza che non abbia una conoscenza tecnica approfondita e pregressa nell'ambito delle simulazioni energetiche ma che necessita una globale del funzionamento energetico.

Come discusso per gli strumenti di simulazione energetica per singoli edifici, anche a livello di scala urbana gli strumenti Bottom-Up presentano caratteristiche eterogenee, ma riassumono metodi e scopi simili. Sono infatti strumenti che analizzano nel dettaglio con modalità di calcolo in regime dinamico, necessitano di competenze specifiche, sono stati sviluppati per essere integrabili con altre piattaforme di calcolo energetico (EnergyPlus) o di pianificazione urbana (CityGML o GIS). Gli sviluppi in corso sono concentrati sull'implementazione di GUI dedicate e di database misti, condivisibili e accessibili da più formati e piattaforme.

3. METODOLOGIA

Nel capitolo viene descritta la metodologia da applicare ai quartieri urbani per identificare le strategie di intervento di riqualificazione che siano economicamente vantaggiose.

Il riferimento è la metodologia sviluppata dal progetto IEA-EBC Annex 75, "Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables" [27], che riprende e integra la metodologia del Cost Optimal, introdotta dal Regolamento delegato (EU) n.244/2012 [148] della Commissione Europea e dalle sue successive linee guida.

Il metodo di calcolo applicato è il Global Cost riportato nella normativa UNI EN 15459-1:2018 [149] che è finalizzata alla valutazione economica delle opere di risparmio energetico. Quindi sono stati individuati i costi di intervento, di manutenzione ordinaria e straordinaria e i costi delle utenze energetiche, in un arco di vita di utile previsto di 30 anni e con i tassi di interesse attualizzati alla contemporaneità per l'Italia.

Una parte di quanto esposto di seguito è stato pubblicato in una versione estesa in [89,150].

3.1. Cost-optimal methodology

Nel capitolo viene descritta la metodologia da applicare ai quartieri urbani per identificare le strategie di intervento di riqualificazione che siano economicamente vantaggiose.

Il riferimento è la metodologia sviluppata dal progetto IEA Annex 75, "Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables" [27], che a sua volta si basa sulla metodologia sviluppata per i singoli edifici nel progetto IEA Annex 56 [151] estendendola al livello di gruppi di edifici.

Lo scopo è identificare i fattori che influenzano il rapporto costo-efficacia (convenienza) delle strategie di rinnovamento per i distretti urbani, così come valutare le sinergie e i trade-off tra le misure con impiego di fonti rinnovabili di energia (FER) e le misure di efficienza energetica (EE), e tra soluzioni individuali (singoli edifici) e collettive (gruppi di edifici).

L'obiettivo della metodologia è quello di sostenere i decisori (policy maker) nella valutazione dell'efficacia, dell'impatto, del rapporto costo-efficacia (convenienza) e dell'accettazione delle diverse strategie possibili per il rinnovamento dei quartieri urbani, facilitando l'identificazione delle opzioni più adatte.

Cos'è la cost optimality?

Attualmente gli edifici esistenti rivestono un ruolo cruciale nell'ambito del consumo energetico. La Direttiva EPBD recast (2010/31/UE) ha imposto agli Stati Membri di fissare dei requisiti minimi per raggiungere un livello di prestazione energetica ottimale da un punto di vista dei costi durante il ciclo di vita dell'edificio.

A tali fini, la Direttiva ha introdotto una metodologia di analisi comparativa con il proposito di determinare requisiti di riferimento per gli standard nazionali.

Il livello ottimale in funzione dei costi è definito come "il livello di prestazione energetica che conduce al costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato dell'edificio", dove il costo più basso è determinato tenendo conto dei costi di investimento legati all'energia, dei costi di manutenzione e di funzionamento e degli eventuali costi di smaltimento. Agli Stati Membri è demandata la determinazione della durata del ciclo di vita economico dell'intero edificio o degli elementi considerati nelle valutazioni.

Il 21 marzo 2012 la Commissione ha pubblicato il Regolamento delegato (UE) N. 244/2012 del 16 gennaio 2012, e a seguire, il 19 aprile 2012, le Linee guida (Orientamenti della Commissione) che accompagnano il suddetto Regolamento. Con questi provvedimenti è stato definito il quadro metodologico per la determinazione dei requisiti energetici ottimali degli edifici, dal punto di vista sia tecnico che economico. Questo quadro costituisce la base per le elaborazioni a cura degli Stati Membri e per l'Italia è stato sviluppato all'interno del report del Ministero dello Sviluppo Economico del 2013 [152].

Il documento descrive dunque la metodologia di calcolo per l'ottenimento del cost-optimal level, ovvero il livello di prestazione energetica più efficiente che comporta il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato. In generale la metodologia si articola in 6 fasi:

- Definizione degli edifici di riferimento;
- Identificazione degli interventi di efficienza energetica;
- Calcolo del fabbisogno di energia primaria;
- Calcolo del costo globale in termini di valore attuale netto;
- Analisi di sensibilità per i dati di costo che includono i prezzi dell'energia;
- Individuazione del livello ottimale in funzione dei costi.

Nel caso di applicazione della metodologia cost-optimal su edifici esistenti è opportuno alcuni aspetti:

- Il focus è su temi di costo e risparmio, ma in molti casi la decisione di effettuare una riqualificazione è guidata anche da altri fattori come il miglioramento del comfort interno o la necessità di eseguire manutenzioni;
- un immobile riqualificato acquisisce valore aggiunto e ha una maggiore appetibilità nel mercato immobiliare;
- i requisiti ottimali possono essere ottenuti con differenti soluzioni e scenari con il rischio che una soluzione ottimale individuata sarà un ostacolo per una soluzione successiva.

Il metodo del costo ottimale prevede l'individuazione di una serie di scenari di intervento di riqualificazione che considerino diversi livelli di efficienza energetica e dunque di costi. Nell'individuazione di questi scenari è importante applicare il cosiddetto Trias Energetica principale, che si basa sul seguente approccio in tre fasi:

- ridurre la domanda di energia, evitando gli sprechi e attuando misure di risparmio energetico;
- utilizzare energia da fonti rinnovabili (FER);
- utilizzare energia fossile nel modo più efficiente possibile e solo se le fonti sostenibili di energia non sono disponibili, o presenti in scarsa misura.

Gli scenari devono inoltre soddisfare gli attuali requisiti minimi imposti a livello nazionale, cioè minimizzare i consumi di energia e le emissioni di CO₂ intervenendo sulle prestazioni termiche e sulle tipologie d'impianto, cercando di avvicinarsi ai requisiti degli edifici nZEB.

La determinazione dello scenario ottimale tra tutti quelli ipotizzati avviene attraverso di calcolo del Costo Globale e considera quello che massimizza il VAN (Valore Attuale Netto), ovvero quel valore che descrive il guadagno dato dalla somma dei ricavi netti attualizzati: l'azione è conveniente se il Valore Attuale Netto è positivo ($VAN > 0$).

Il metodo del Costo Globale (Figura 3) considera tutti gli investimenti durante tutto il ciclo di vita dell'edificio, ovvero i costi di investimento, i costi di gestione, i costi di manutenzione e i costi di smaltimento, e tiene conto anche delle variazioni di prezzo dell'energia e della variazione dei tassi d'interesse. Per il calcolo a livello macroeconomico, in questa somma, si introduce anche una categoria supplementare relativa al valore monetario del danno ambientale causato dalle emissioni relative al consumo di energia negli edifici.

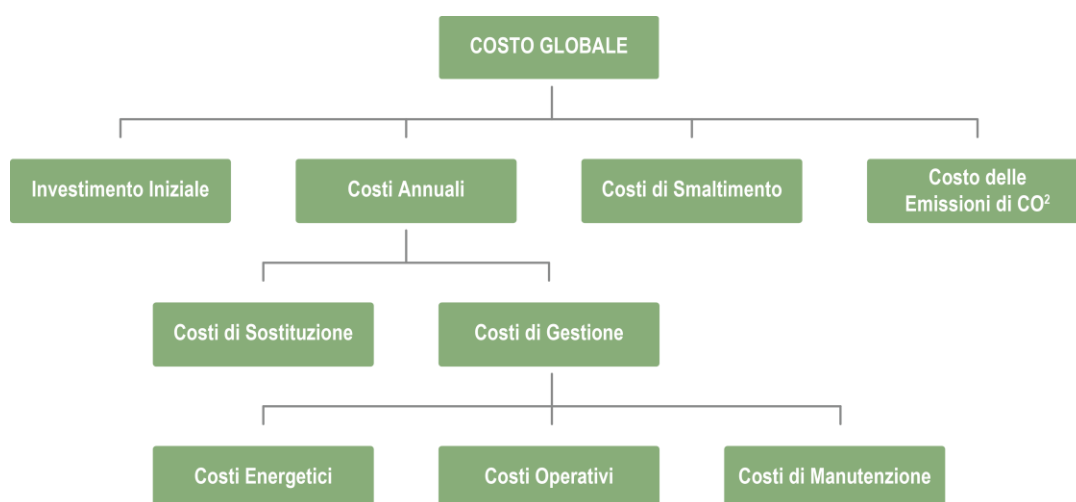


Figura 3 – Schema delle voci che compongono il Costo Globale.

Al fine di una corretta analisi dei costi viene eseguita l'attualizzazione per tutti i valori annuali (Figura 4); in questo modo, durante lungo il periodo di analisi i costi diminuiscono progressivamente ed è possibile prevedere le variazioni dei costi.

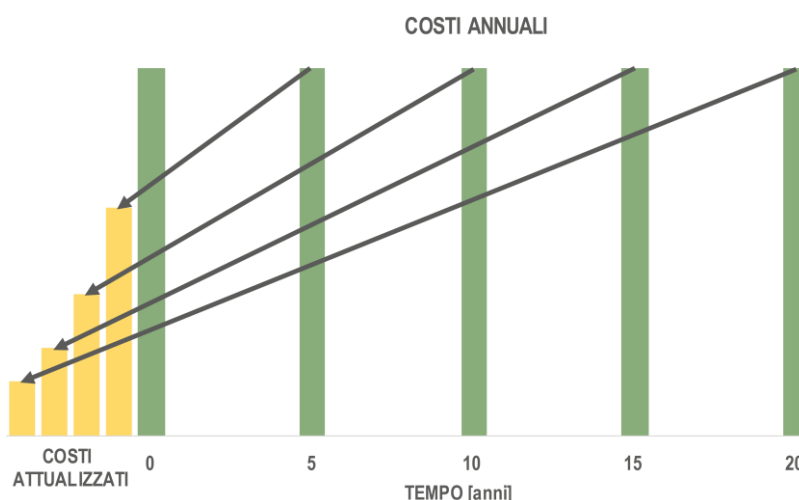


Figura 4 – descrizione grafica dell'attualizzazione dei prezzi annuali.

Tutti i costi, i risparmi economici, i benefici sono scontati all'anno zero con un tasso di interesse indicato - solitamente pari al 3% - e poi sommati ottenendo il valore attuale. Devono essere inoltre considerati i valori residui, ovvero valori di costo che si protraggono oltre il periodo di studio e che quindi devono essere opportunamente scontati al Costo Globale attualizzato.

La formula generale del Costo Globale risulta essere quindi come in Equazione 1:

$$C_g(t) = C_l + \sum_k \left[\sum_{j=1}^t \left(C_{a,j}(k) \times \left(\frac{1}{1 + \frac{r}{100}} \right)^j \right) - V_{f,t}(k) \right] \quad \text{Equazione 1}$$

dove

- C_g Costo Globale;
- t periodo di studio in anni;
- C_l costo di investimento iniziale che essendo sostenuto all'anno 0 non ha bisogno di essere attualizzato;
- $C_{a,j}(k)$ costi annuali che comprendono costi di manutenzione e di gestione;
- $V_{f,t}(k)$ valore residuo (se presente);
- r saggio di interesse adottato nel calcolo dell'attualizzazione.

Infine, come illustrato nel grafico in Figura 5, è possibile riepilogare i risultati ottenuti dall'applicazione della metodologia. Infatti, mettendo in relazione il consumo di energia primaria (o le emissioni di CO₂) in ascissa e il costo globale (in ordinata) per ogni scenario elaborato, i risultati sono distribuiti lungo una curva che permette di individuare lo scenario ottimale, ovvero quello che presenta il Costo Globale (CG) minore riducendo i consumi di energia da uno stato di riferimento.

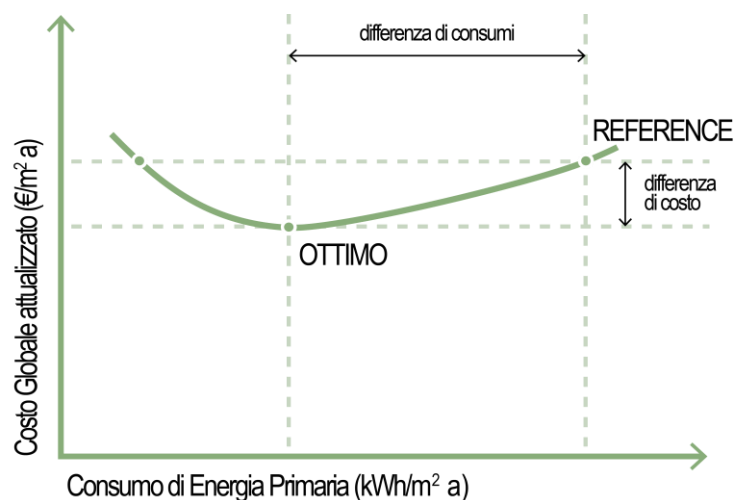


Figura 5 – Distribuzione dei costi globali per vari interventi di riqualificazione energetica.

Dal punto di vista delle prestazioni energetiche, il punto di riferimento per le analisi sono stati gli attuali requisiti minimi imposti a livello nazionale. I calcoli sono stati fatti su diversi scenari che comprendono il miglioramento delle prestazioni termiche, oltre a soluzioni innovative per il riscaldamento e la ventilazione. Tra i vari scenari alcuni sono molto ambiziosi, e tendono a soddisfare i requisiti degli Edifici a Energia Quasi Zero (nZEB).

Il calcolo dell'energia necessaria ha preso in considerazione il fabbisogno di energia per il riscaldamento, la ventilazione, la produzione di acqua calda sanitaria e ausiliari attrezzature per il funzionamento dell'edificio.

Dal punto di vista economico finanziario, gli scenari sull'andamento del prezzo dell'energia e i tassi di sconto sono in linea con gli approcci nazionali e con le indicazioni del Cost-Optimality Delegated Regulation [148].

Inoltre, per determinare come i tassi di attualizzazione e l'andamento dei prezzi dell'energia influenzano il calcolo dei costi ottimali, sono stati valutati scenari diversi in funzione del variare di tali fattori rispetto allo scenario di base.

Scopo e Obiettivi

In relazione alla metodologia proposta e applicata in questo studio, si precisa innanzitutto il quadro di intervento del progetto Annex 75. Il programma considera infatti una "ristrutturazione a scala di quartiere" come una ristrutturazione di diversi edifici situati in una stessa area e con una sorta di relazione tra di loro, utilizzando il termine "quartiere" senza fare riferimento ad alcuna finalità giuridica o amministrativa, in modo simile a quanto definito da Paiho [14], concentrandosi principalmente sui quartieri residenziali, composti da edifici mono e plurifamiliari. Si considerano inoltre sistemi HVAC tipici in modo da valutare il consumo di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti, l'acqua calda sanitaria, la ventilazione, l'illuminazione, il consumo di elettricità ausiliaria per i sistemi tecnici integrati negli edifici (ventilatori, pompe, valvole elettriche, ecc.) e l'elettricità consumata dagli elettrodomestici e altri dispositivi.

KPI Key Performance Indicators

Vengono selezionati i principali indicatori per valutare e confrontare i diversi distretti tra loro. Questi indicatori permettono di valutare il livello di sostenibilità e convenienza di un dato progetto di ristrutturazione, o di confrontare diversi progetti tra loro, oltre a essere un utile strumento per aiutare a verificare in che misura gli obiettivi del progetto sono stati raggiunti. In letteratura si possono trovare diversi riferimenti relativi agli indicatori chiave di performance (Key Performance Indicators, KPI).

È interessante, a titolo di esempio, la paper review sull'approccio dei KPI nella ristrutturazione edilizia presentata nel 2016 da A. Kylili et al. [153], e che classifica i KPI trovati in letteratura in diverse categorie. Dopo un'analisi dettagliata dei diversi KPI inclusi in ogni categoria, tre indicatori sono stati considerati più essenziali e di conseguenza utilizzati in questa metodologia: emissioni di gas serra (CO_2 eq/ m^2 anno), consumo di energia primaria PE (kWh/m^2 anno) e costi totali annualizzati ($\text{€}/\text{m}^2$ anno). A seconda delle caratteristiche specifiche di ogni caso studio, possono essere calcolati ulteriori KPI, come la domanda di energia per i diversi usi (riscaldamento/raffrescamento, acqua calda sanitaria ed elettricità), il rapporto tra le FER e il fabbisogno energetico totale o la quota di fornitura di elettricità dalla rete in relazione al consumo totale di elettricità del caso studio, solo per citarne alcuni.

Una volta definito l'ambito e gli indicatori di valutazione, la metodologia definisce i calcoli delle prestazioni energetiche e la valutazione economica.

Domanda e Offerta di Energia

La prima valutazione viene effettuata sulla base della corrispondenza tra il fabbisogno energetico del quartiere e la fornitura di energia. Lo schema proposto (Figura 6) include anche i tre indicatori selezionati come essenziali in questo progetto (nelle caselle verdi con sfondo verde), così come altri indicatori aggiuntivi che potrebbero essere utili nella valutazione dei diversi casi (nelle caselle verdi con sfondo bianco). Va notato che gli edifici nei quartieri presentano uno stato di fatto diverso per quanto riguarda l'involucro termico, gli impianti, e che inoltre i cicli di ristrutturazione degli involucri in un quartiere non sono solitamente sincronizzati tra loro: in un progetto di riqualificazione ci si potrebbe trovare nella situazione in cui alcuni edifici potrebbero aver bisogno di essere rinnovati mentre altri potrebbero aver appena subito una ristrutturazione.

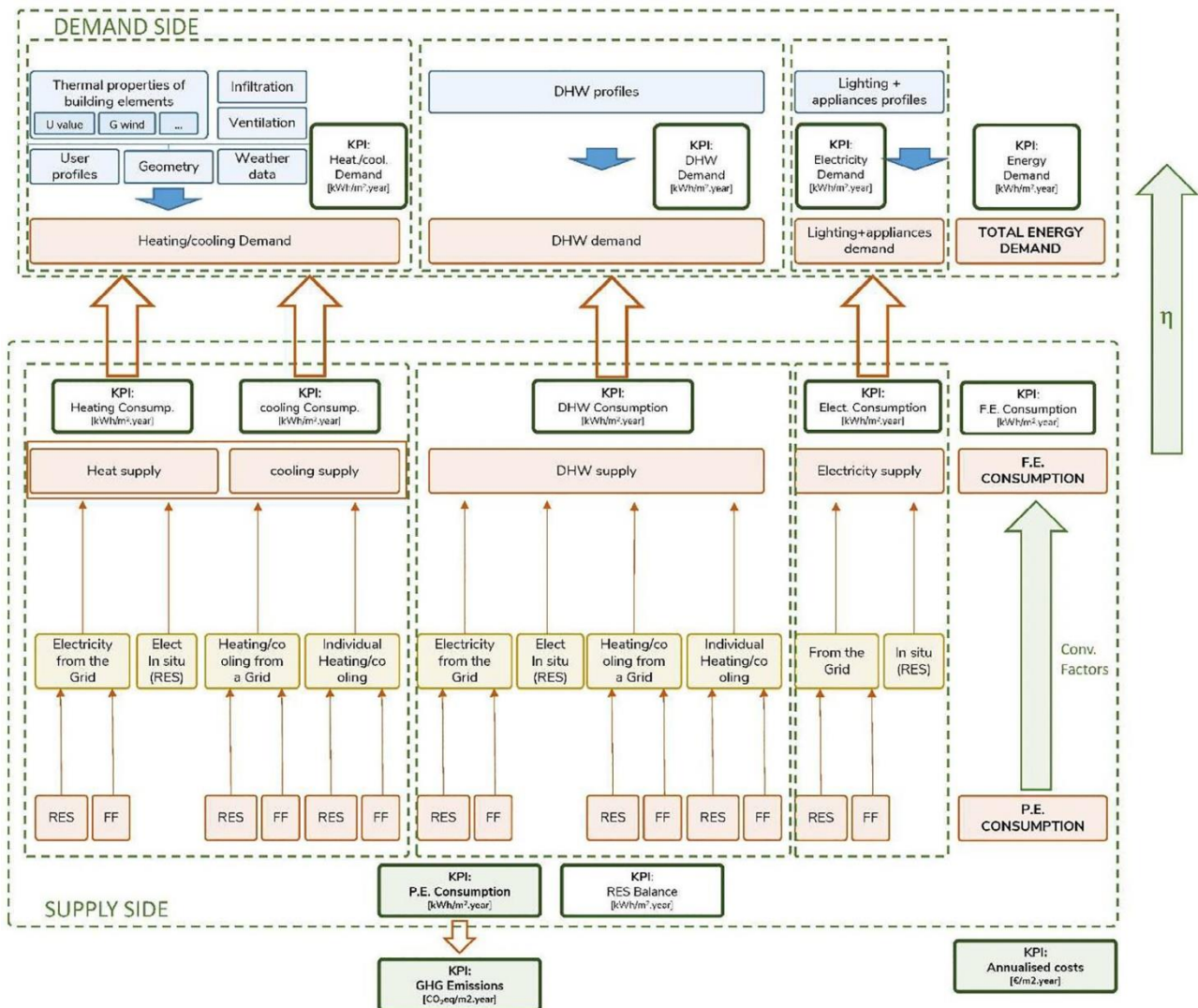


Figura 6 – Panoramica della corrispondenza tra fabbisogno e consumo di energia primaria.

Sulla base di questo approccio, i cluster di edifici possono essere valutati utilizzando simulazioni in regime di calcolo dinamico al fine di valutare strumenti specifici di analisi delle prestazioni globali dell'intero sistema, oppure valutare in modo analitico fabbisogni e consumi energetici.

Il fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento di ogni edificio del distretto è calcolato sulla base delle dimensioni dell'edificio e delle proprietà termiche, con riferimento alle norme ISO 52016-1:2018 [154], ISO 52017-1:2017 [155] e ISO 18523-1:2016 [156]. I fabbisogni di acqua calda sanitaria e di elettricità sono considerate secondo i profili standard del paese in cui si trova il caso studio o in base a quanto recepito e riportato nelle normative tecniche internazionali e comunitarie, EN 15316-4-1:2017 e ISO 52000-1:2017 [157,158].

Per quanto riguarda l'approvvigionamento energetico, sia i sistemi energetici decentralizzati (singolo edificio o singola unità abitativa) che quelli centralizzati (teleriscaldamento) possono essere presi in considerazione in questa metodologia. Le interazioni specifiche tra le diverse tecnologie (per esempio quelle relative alle batterie di accumulo o stoccaggio termico) possono essere considerate in dettaglio. Altrimenti, si possono applicare metodi semplificati, considerando parametri generali, come il rendimento stagionale.

Quando si caratterizzano i sistemi impiantistici, vengono presi in considerazione quattro parametri: costo (in funzione della capacità), durata del servizio (service life), rendimento e vettore energetico associato. Va notato che nel caso di sistemi centralizzati, per esempio impianti di teleriscaldamento, la struttura dei costi del teleriscaldamento dovrebbe essere considerata dai diversi elementi che lo compongono, in modo tale che si ottiene il costo totale dell'impianto di riscaldamento sommando i costi di tutti questi elementi (sottostazioni di riscaldamento, tubazioni e sistema di distribuzione o pompe di circolazione, ...). Questi costi associati ai diversi elementi includono non solo i costi di investimento e di manutenzione (ad esempio, i costi del sistema di distribuzione includono tutto il lavoro necessario per mettere i tubi nel terreno), ma anche le perdite di energia e le inefficienze attraverso questi impianti.

Infine, si dovrebbe menzionare che ci sono altri parametri che possono giocare un ruolo importante nella valutazione del rapporto costo-efficacia (convenienza) dei sistemi distrettuali, come la differenza di temperatura tra la temperatura di mandata e quella di ritorno, il diametro dei tubi, il livello di isolamento del sistema di distribuzione, o parametri specifici simili. Tuttavia, non c'è un focus specifico sull'ottimizzazione di questi parametri per creare sistemi ottimali. L'attenzione è piuttosto sui parametri che sono direttamente associati con l'equilibrio ottimale tra misure di EE e RES.

Il consumo di energia per i diversi usi è valutato sulla base del fabbisogno energetico calcolato secondo la norma EN ISO 52016-1:2017 [154]. Il consumo energetico misurato di un dato edificio o cluster di edifici, può essere utilizzato per valutare la plausibilità del fabbisogno energetico calcolato, ma non sarà utilizzato come base per le valutazioni. Le relative emissioni di gas serra e il consumo di PE sono calcolati sulla base di questi valori energetici applicando i corrispondenti fattori di emissione e i fattori di PE di ogni Paese Membro.

I fattori di emissione di GHG e PE sono considerati fattori annuali e costanti nel tempo. I fattori per l'elettricità sono supposti riferirsi a un futuro mix di paesi basato sull'energia rinnovabile. Inoltre, in alcuni scenari specifici, è possibile prendere in considerazione altri tipi di mix di produzione dell'elettricità più simili alla situazione attuale, comunque anche in questo caso riferito al mix energetico di ogni Paese.

Analisi Economica

La valutazione economica viene effettuata con un approccio basato sul ciclo di vita per valutare i costi delle diverse possibilità di riqualificazione e comprende, in conformità con le linee guida della Direttiva EU EPBD recast [8]:

- il costo dell'investimento iniziale o i costi di sostituzione;

- i costi energetici (comprese le tasse sull'energia e sulla CO₂);
- i costi di manutenzione e di funzionamento.

Questi calcoli dei costi del ciclo di vita sono eseguiti dinamicamente. Pertanto, si propone di utilizzare il metodo dell'annualità per trasformare qualsiasi costo in costi annuali, assumendo i costi iniziali, il tasso di interesse e la durata di vita tipica delle misure di ristrutturazione considerate. In ogni caso, in alternativa, può essere utilizzato anche il metodo del Costo Globale, basato sulla normativa UNI EN 15459-1:2018 [149]. Tutti questi costi sono classificati nella Figura 7.

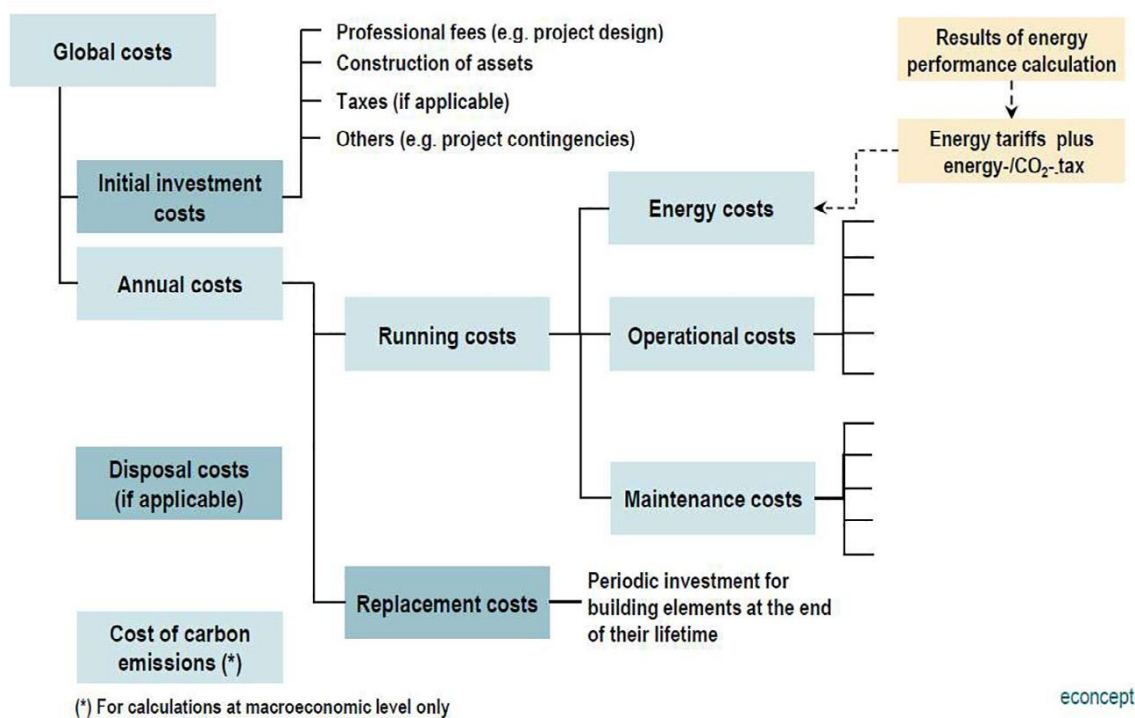


Figura 7 – Classificazione dei costi secondo il quadro metodologico della Direttiva EU EPBD recast [19].

La valutazione dei costi viene effettuata da una prospettiva privata, cioè il distretto è valutato come un'unità, con lo scopo di raggiungere l'obiettivo principale del progetto, ovvero valutare quale tipo di combinazioni tra misure di EE e RES sono più efficaci in termini di costi mentre soddisfano le condizioni al contorno (boundary conditions). Tuttavia, è considerato appropriato per gli obiettivi prefissati indagare le potenziali barriere per l'implementazione delle soluzioni più efficaci in termini di costi che soddisfano le condizioni limite, a causa del fatto che diversi attori energetici sono di solito coinvolti.

Per quanto riguarda le tasse, esse sono prese in considerazione in base alle condizioni nazionali per ogni caso di studio; per le tasse sulla CO₂, si raccomanda di studiare vari scenari in un'analisi di sensibilità quando nei rispettivi paesi sono in discussione nuove tasse o è in atto un cambiamento delle stesse.

Le sovvenzioni e i piani di incentivazione per l'attuazione delle misure relative all'energia sono escluse dalla valutazione generale dei costi, al fine di fare una valutazione dei risultati che identifichi le soluzioni ottimali indipendentemente dall'effetto delle sovvenzioni, che possono variare nel tempo o anche a seconda della città in cui si trova il distretto. Quando si studia la situazione di un investitore specifico, essi possono comunque essere inclusi in una seconda valutazione alternativa e specifica. I costi esterni, i benefici e i co-benefici non sono inclusi. Altre questioni, come l'effetto dell'economia di scala, possono essere considerate.

Costi dell'Energia

Sulla base delle ipotesi e delle considerazioni precedentemente definite, la panoramica dei flussi di denaro legati all'energia sono presentati nella Figura 8. Questo approccio mira a definire in modo più dettagliato principalmente i costi di gestione precedentemente menzionati in Figura 7 e i legami tra i flussi di energia e di denaro in un dato gruppo di edifici.

Come illustrato, l'approccio considera i due diversi tipi di approvvigionamento che si possono trovare in qualsiasi edificio o cluster di edifici: energia termica (incluso riscaldamento, acqua calda sanitaria e/o raffrescamento) ed elettrica. Inoltre, la fornitura di elettricità può essere divisa in due diversi sottosistemi: l'elettricità fornita dalla rete e l'elettricità prodotta in loco, per mezzo di energia rinnovabile.

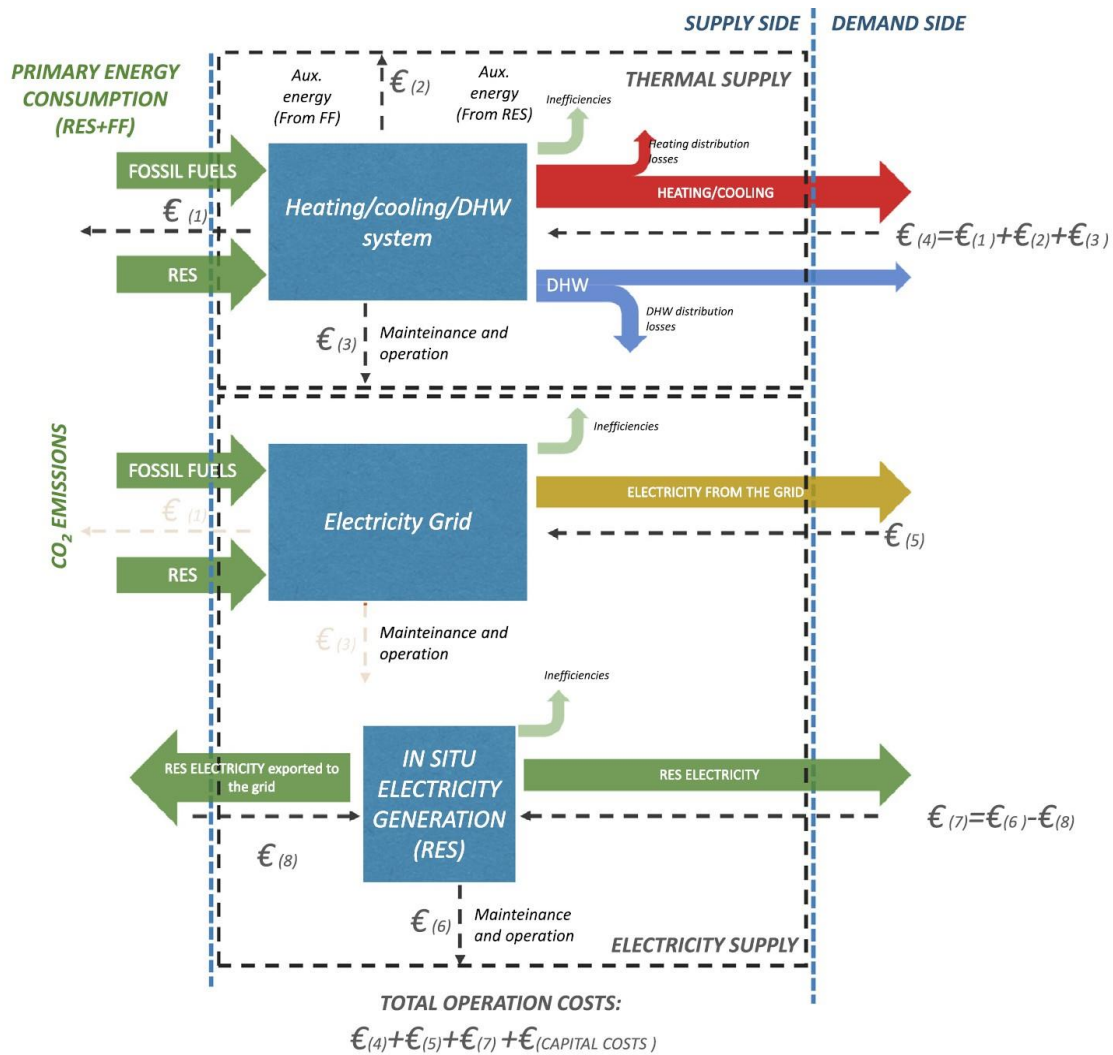


Figura 8 – Panoramica dei flussi di denaro relativi ai costi energetici e ai costi di manutenzione/operativi.

Quando si analizzano gli input energetici nell'impianto termico, questi possono essere energia rinnovabile, combustibili fossili ed energia ausiliaria. L'output è l'energia per il riscaldamento, il raffrescamento e/o la fornitura di acqua calda sanitaria. In entrambi i casi, questo output comprende l'energia utile più le perdite di distribuzione. Così, l'energia in entrata è uguale all'energia in uscita, comprese le perdite di energia dovute alle inefficienze del sistema. In modo simile, i costi di gestione di uno specifico sistema saranno quelli relativi all'acquisto di energia (€1 e €2) e i costi relativi alla manutenzione, gestione e funzionamento del sistema (€3). La somma di questi costi incide direttamente sui costi totali di funzionamento dell'impianto associato al sottosistema termico (€4).

Per quanto riguarda l'elettricità dalla rete, vengono presi in considerazione solo i costi finali dell'elettricità (€5). Questo costo è infatti il risultato dei diversi costi che questo sottosistema deve coprire, come il costo dell'energia che deve essere pagato ai generatori principali o il costo di manutenzione della rete, che sono fuori dallo scopo di questo progetto.

Infine, nell'altro sottosistema considerato, "generazione di elettricità in situ da FER", si considerano solo gli output energetici: l'energia utilizzata nel distretto valutato, e l'energia esportata alla rete. Come per i flussi di denaro, si considera anche il costo di manutenzione e funzionamento (€6) e i benefit dell'elettricità venduta alla rete (€8). Il beneficio o il deficit di questo sottosistema per gli utenti finali è la differenza tra questi due costi (€7). Bisogna notare che questo equilibrio dipende molto dalle regolamentazioni di ogni paese: anche se ancora in alcuni casi l'utente deve pagare per liberarsi della produzione di elettricità, la maggior parte delle regolamentazioni nazionali dei paesi europei sono state adattate per facilitare l'esportazione delle eccedenze di elettricità alla rete. Tuttavia, le condizioni di queste esportazioni (principalmente legate ai costi) possono variare significativamente in ogni paese. Inoltre, ci sono costi associati agli investimenti per questi impianti e ai conseguenti costi di capitale. Inoltre, sarà necessario eseguire calcoli orari se si vuole una valutazione dettagliata di questo problema. I costi energetici totali e i costi di manutenzione/operativi per una misura correlata o un insieme di misure correlate sono la somma di €4, €5 e €7. Inoltre, ci sono costi associati all'ammortamento degli investimenti iniziali per questi sistemi e ai conseguenti costi di capitale (€_{CAPITAL-COSTS}).

Prezzi dell'energia

Per quanto riguarda i prezzi dell'energia, la metodologia raccomanda di prendere in considerazione gli aumenti futuri previsti, in conformità con il rapporto preparato per l'Unione europea nel 2016 sulle tendenze dell'energia, dei trasporti e delle emissioni di gas serra fino al 2050 [159]. Per questo motivo, si propone di effettuare la valutazione con i prezzi dell'energia previsti per il 2030 per tenere conto dei futuri aumenti dei prezzi. Altri scenari per i prezzi dell'energia possono essere inclusi come parte dei calcoli di sensibilità. Per quanto riguarda il tasso di interesse, si applica un valore indicativo del 3%, a meno che non siano disponibili informazioni più specifiche per il paese.

Confini di Sistema

I confini di sistema, boundary conditions, sono impostati per corrispondere all'"energia netta consegnata", come rappresentato in Figura 9. Si sommano i costi dell'energia fornita all'edificio e, per l'elettricità generata in loco o il calore esportato dall'edificio alla rete, viene concesso un benefit, che migliora le prestazioni energetiche e riduce le emissioni di gas serra degli edifici. Tuttavia, si propone di assumere che l'elettricità nella rete sia basata sull'energia rinnovabile, per tenere conto dei prossimi cambiamenti nel mix energetico, che quindi non porta a nessun beneficio significativo oltre a un potenziale risparmio sui costi.

La generazione di elettricità in loco è presa in considerazione quando è prodotta da fonti rinnovabili. Si distingue quanta elettricità prodotta viene consumata localmente e quanta viene esportata alla rete. I ricavi dalle esportazioni di elettricità o di calore verso la rete o un sistema di distribuzione dell'energia sono considerati come €8 nella Figura 8.

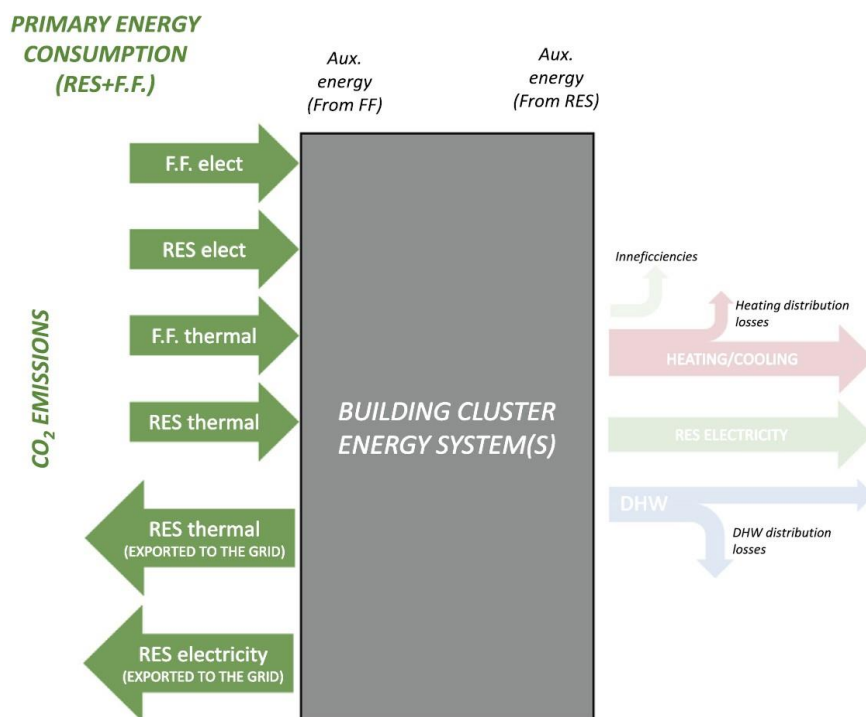


Figura 9 – Panoramica dei confini di sistema e degli scambi di energia (RES – Renewable Energy Sources; FF – Fossil Fuels).

Procedura di valutazione

All'inizio della valutazione, viene definito il gruppo di edifici da esaminare. Questo può essere sia un quartiere generico basato su edifici di riferimento, sia un quartiere specifico di un caso studio.

Per quanto riguarda le caratteristiche termiche, un modo per stimare i valori trasmittanza termica degli edifici è l'applicazione di approcci top-down che coinvolgono le informazioni dei dati GIS, come la classificazione di ogni edificio in base al periodo di costruzione e all'ultima ristrutturazione, e l'applicazione di valori standard per questi edifici corrispondenti al loro periodo di costruzione o al momento della loro ultima ristrutturazione. Altre possibilità potrebbero essere il consumo di energia rilevato a distanza (remote-detection) o le stime fatte sulla base del consumo di energia rilevati, per esempio con i dati della compagnia energetica, o anche i dati forniti dai certificati di prestazione energetica.

Definizione e valutazione del caso di riferimento

Per valutare il costo e l'efficienza economica delle misure di ristrutturazione energetica, la procedura sviluppata, prima di valutare le misure di ristrutturazione energetica, definisce una situazione di riferimento (Reference case) per determinare correttamente gli effetti della ristrutturazione energetica sull'uso di energia, sulle emissioni di gas serra e sui costi, confrontando gli impatti degli scenari di ristrutturazione energetica con gli impatti del caso di riferimento. Similmente all'Annex 56, per fare ciò, è stato definito un caso di riferimento basato su un intervento che comprende misure di ristrutturazione che dovrebbero essere eseguite in ogni caso, solo per ripristinare la funzionalità dell'edificio (ad esempio, ridipingere le pareti o riparare il tetto per renderlo nuovamente impermeabile). Si presume che queste misure non aumentino comunque il rendimento energetico dell'edificio, ma che comportino dei costi. Se necessario, vengono fatte ipotesi sui costi di tali misure.

Per impianti di riscaldamento e raffrescamento, nel caso di riferimento viene presa in considerazione anche una sostituzione. Questo è necessario per valutare i costi dell'installazione di un nuovo impianto rispetto a uno scenario di riferimento corretto. Nel caso di riferimento, la sostituzione è considerata dello stesso tipo del impianto installato in precedenza. I moderni impianti di riscaldamento o raffrescamento, anche se basati su combustibili fossili, di solito hanno efficienze di conversione leggermente più alte rispetto ai impianti precedenti dello stesso tipo. Un aumento dell'efficienza energetica rispetto all'impianto viene solitamente preso in considerazione anche nel caso di riferimento. Questo caso di riferimento è stato designato come "anyway renovation" [23] ed è applicato anche in questa metodologia.

La metodologia è aperta alla valutazione di ulteriori scenari di riferimento senza anyway renovation (ad esempio in un'analisi di sensibilità alla fine del processo), al fine di valutare l'impatto di prendere o non prendere in considerazione tali anyway renovation. Si potrebbe obiettare che le valutazioni senza anyway renovation per alcuni edifici possono essere adeguate nei distretti con grandi differenze nei cicli di ristrutturazione degli edifici, poiché è possibile che in tali distretti le misure di ristrutturazione energetica siano state effettuate in connessione con una ristrutturazione a livello di distretto su quegli edifici per i quali le anyway renovation necessarie sono ancora lontane nel futuro. Tuttavia, si presume che le differenze nei cicli di ristrutturazione influenzino in modo simile le misure di efficienza energetica nei distretti, ed è adeguato prendere in considerazione nel caso di riferimento le misure di efficienza energetica al fine di valutare specificamente gli impatti sui costi delle parti energetiche delle misure.

Definizione degli scenari di ristrutturazione degli edifici

Una volta calcolati i KPI del caso di riferimento, viene scelta una serie di misure di ristrutturazione degli edifici, che vengono combinate e associate a scenari di ristrutturazione. Sulla base di questa serie di misure di ristrutturazione, un numero limitato di combinazioni di casi di ristrutturazione viene identificato come pacchetto di ristrutturazione per il quale viene effettuata la valutazione, oppure viene effettuata un'ottimizzazione per identificare le soluzioni ottimali scegliendo le combinazioni appropriate attraverso un motore di ottimizzazione. Con l'ottimizzazione, si cercano le combinazioni meno costose che soddisfano le condizioni limite (boundary conditions). Per i pacchetti di ristrutturazione studiati, vengono determinati i costi e gli effetti delle misure di ristrutturazione.

In questo modo, per ogni edificio del distretto, vengono studiati circa una decina di pacchetti di ristrutturazione, che hanno livelli di ambizione progressivamente più alti relativi al rendimento energetico risultante dell'involucro dell'edificio (per mezzo di misure di risparmio energetico) e dei sistemi di approvvigionamento energetico. In tutti i casi si presume una sostituzione dell'impianto di riscaldamento, mentre il sistema di distribuzione del calore, compresi i radiatori, si presume rimanga lo stesso, anche se possono essere cambiati.

I pacchetti di ristrutturazione studiati saranno scelti in modo da permettere di rispondere alle domande della ricerca. A tal fine, è importante che vengano studiati diversi livelli di efficienza energetica dell'involucro dell'edificio, in combinazione con vari tipi di sistemi di riscaldamento. Allo stesso tempo, può essere utile allineare i vari pacchetti di ristrutturazione studiati con una varietà di standard come avviene in un determinato paese, per rendere i risultati più facilmente interpretabili. Si raccomanda di valutare anche combinazioni con almeno un sistema a combustibile fossile (centralizzato o decentralizzato a seconda del punto di partenza del quartiere) e con entrambi i sistemi FER centralizzati e decentralizzati.

La dimensione del sistema di riscaldamento è calcolata determinando la capacità di picco richiesta per mantenere la temperatura interna desiderata nonostante le perdite di calore durante l'inverno, ed è necessario prendere in considerazione che i nuovi sistemi di riscaldamento possono essere ridimensionati grazie a un migliore isolamento.

Per identificare la soluzione ottimale, si possono applicare diversi approcci. In generale la metodologia propone di considerare come soluzioni adatte solo le combinazioni che risultano in un uso dell'energia coperto completamente da energie rinnovabili; questo include l'uso dell'elettricità, con una combinazione di elettricità prodotta in loco ed elettricità importata dalla rete. Con questa condizione, le rimanenti emissioni di gas serra sono quelle associate alle emissioni incorporate delle misure di ristrutturazione e alle emissioni a monte dei vettori energetici. Tra le soluzioni che soddisfano questa condizione, la soluzione ottimale viene scelta tenendo conto il consumo di PE e il costo globale.

Come anticipato in precedenza, la valutazione si basa su calcoli di simulazioni e non sulle prestazioni energetiche effettivamente osservate. In realtà, a volte si osserva che i livelli di efficienza energetica non raggiungono i valori target secondo i calcoli. Tali osservazioni vengono definite performance gap, che è stato ampiamente studiato e diversi riferimenti possono essere trovati in letteratura, come il lavoro completo recentemente pubblicato da Cuerda [159]. Per effettuare la valutazione, non è necessario prendere in considerazione questi effetti, facendo attenzione che potenzialmente possono sovrastimare in una certa misura il rapporto costo-efficacia delle misure di ristrutturazione.

Risultati attesi e analisi di sensibilità

Per effettuare le valutazioni, vengono calcolati i principali KPI introdotti in precedenza. Quindi, al fine di valutare il rapporto costo-efficacia (convenienza) dei diversi pacchetti di riqualificazione, viene fatto un confronto tra il caso di riferimento e i pacchetti di riqualificazione. I risultati sono illustrati valutando le emissioni specifiche di gas serra rispetto ai costi e l'uso specifico di PE rispetto ai costi.

Inoltre, si raccomanda di valutare i risultati variando alcuni parametri per identificare i fattori che influenzano fortemente i risultati dei calcoli. Può essere particolarmente opportuno prendere in considerazione i parametri con maggiori incertezze, come lo sviluppo futuro del costo dell'energia, e vari parametri che caratterizzano il distretto.

Relazione tra misure di efficienza energetica e implementazione di sistemi di energia rinnovabile

Infine, ci sono diverse relazioni tra le misure di efficienza energetica e le misure di energia rinnovabile, che influenzano in modo significativo i risultati del progetto e, di conseguenza, dovrebbero essere prese in considerazione quando si effettuano le valutazioni.

La prima è la relazione tra il consumo di energia e il livello di isolamento dell'involucro dell'edificio. Più gli edifici sono isolati meglio, più basso è il loro fabbisogno energetico e il conseguente consumo di energia. Questo effetto è più forte sulla riduzione dei costi nel caso di sistemi di riscaldamento basati sui combustibili fossili rispetto ai sistemi di riscaldamento basati sulle energie rinnovabili, a causa dei minori costi energetici operativi di questi ultimi.

La seconda è l'importanza di modellare i costi dei sistemi di riscaldamento in modo appropriato come funzione della capacità del sistema di riscaldamento. Questa capacità è direttamente influenzata dalle misure di EE eseguite, e questa relazione è un fattore chiave per valutare le sinergie o i compromessi tra misure EE e FER. A causa delle economie di scala, i costi di un sistema di riscaldamento sono di solito una funzione logaritmica della capacità installata per grandi capacità. Al fine di facilitare la valutazione, si propone di approssimare la funzione di costo con un'approssimazione lineare parziale basata su un insieme limitato di relazioni discrete capacità/costi.

Infine, un'osservazione relativa alle pompe di calore dovrebbe essere fatta. Per loro, c'è un'importante sinergia con le misure di EE sull'involucro dell'edificio, perché più basso è il bisogno di energia di un edificio, più bassa può essere (in una certa misura) la temperatura del sistema di distribuzione del calore, che comporta un aumento dell'efficienza delle pompe di calore. Allo stesso tempo, nel caso di edifici ad alta efficienza, la temperatura media esterna durante il quale il sistema di riscaldamento è in funzione risulta inferiore a quella di edifici meno isolati.

Di conseguenza, l'efficienza di conversione delle pompe di calore tende a diminuire negli edifici più efficienti dal punto di vista energetico. Inoltre, una maggiore prestazione energetica degli edifici può avere un impatto sulla riduzione delle perdite di calore in un sistema di teleriscaldamento. Pertanto, è necessario prendere in considerazione questi aspetti quando si calcolano le efficienze di conversione delle pompe di calore, in funzione del fabbisogno di calore del gruppo di edifici.

3.1.1. Riepilogo

La procedura definita nella metodologia del progetto IEA Annex 75 è riassunta in diversi step di calcolo.

Il primo passo è la definizione e la caratterizzazione dei distretti studiati. Questo implica la raccolta di informazioni sugli edifici esistenti (e potenzialmente pianificati nuovi) e sulle soluzioni a livello di distretto, come le dimensioni dell'edificio e i parametri dell'involucro, il sistema di approvvigionamento energetico esistente, ecc.

Il secondo passo è quello di definire e valutare il caso di riferimento (Reference). Il caso di riferimento dovrebbe essere basato sullo stato attuale del distretto includendo anche il costo delle ristrutturazioni (anyway-renovations), intese come tipologie di intervento di manutenzione che migliorano l'edificio senza alterare le prestazioni energetiche. Infatti le ristrutturazioni sono necessarie per ripristinare o sostenere la funzionalità degli edifici, ma senza le relative misure di efficienza energetica. Ad esempio si possono considerare la pittura delle facciate o la riparazione dei tetti, e include anche le ristrutturazioni necessarie o la sostituzione gli impianti di approvvigionamento energetico esistente.

Il terzo passo è la definizione e la valutazione degli scenari di ristrutturazione. Questo comporta la definizione di set di misure di ristrutturazione per migliorare l'efficienza energetica degli edifici e di soluzioni alternative per i sistemi di approvvigionamento energetico.

Diversi scenari per le misure di efficienza energetica e sistemi di fornitura energetica sono combinati nelle soluzioni e valutati per quanto riguarda costo, consumo energetico ed emissioni di gas serra.

I parametri chiave che sono considerati nella valutazione sono: costo globale annualizzato (EUR/a), emissioni annuali di emissioni di gas serra (kgCO₂/a) e il consumo annuale di energia primaria (kWh/a).

3.2. Definizione dei fattori di conversione, dei costi energetici e delle emissioni ambientali.

L'applicazione della metodologia a un caso studio è strettamente collegata alla definizione di una serie di parametri collegati al mercato dell'energia, con particolare riferimento ai dati storici dell'ultimo periodo e alle ipotesi di trend dei prezzi dei vettori energetici.

Per determinare la prestazione energetica del sistema edificio-impianto è necessario calcolare diversi parametri: fabbisogno di energia utile dell'involucro edilizio; efficienza degli impianti, ovvero determinare la quantità di energia da fornire all'impianto, sotto forma di vettori energetici (combustibili, energia elettrica, radiazione solare, calore da teleriscaldamento) per soddisfare il fabbisogno di energia utile; fattori di conversione dell'energia fornita in energia primaria, cioè energia prelevata dalle fonti energetiche.

Per valutare il consumo di fonti energetiche utili per fornire i servizi di climatizzazione dell'edificio, il calcolo dell'energia primaria è fondamentale perché considera il consumo dal punto di prelievo dell'energia alla fonte fino al punto di consegna all'impianto, ovvero l'energia che non ha ancora subito alcun processo di trasformazione e conversione.

L'energia primaria totale, EP_{gl} , in energia primaria globale è composta da due tipologie fondamentali in base al tipo di fonte energetica: l'energia primaria rinnovabile, EP_{ren} , (radiazione solare, vento,...) e l'energia primaria non rinnovabile, EP_{nren} , (combustibili fossili).

Il quantitativo di energia primaria associato ad ogni kWh consegnato all'ingresso dell'impianto sotto forma di vettori energetici è espresso da diversi contributi quali per esempio energia spesa per il trasporto dalla fonte al punto di consegna (per esempio, nel caso del gas, energia spesa per il pompaggio e dispersioni della rete di trasporto e distribuzione) oppure energia spesa per la costruzione delle infrastrutture di trasporto e delle apparecchiature (costruzione dei gasdotti, costruzione dei pannelli solari termici).

Tabella 2 – Fattori di conversione in energia primaria dei vettori energetici come riportato nel D.M. 26/06/2015.

| Vettore energetico | fP_{nren} | fP_{ren} | fP_{tot} |
|--|-------------|------------|------------|
| Gas naturale (1) | 1.05 | 0 | 1.05 |
| GPL | 1.05 | 0 | 1.05 |
| Gasolio e Olio combustibile | 1.07 | 0 | 1.07 |
| Carbone | 1.10 | 0 | 1.10 |
| Biomasse solide (2) | 0.20 | 0.91 | 1.11 |
| Biomasse liquide e gassose (2) | 0.40 | 0.60 | 1.00 |
| Energia elettrica da rete (3) | 1.95 | 0.47 | 2.42 |
| Teleriscaldamento(4) | 1.5 | 0 | 1.5 |
| Rifiuti solidi urbani | 0.2 | 0.2 | 0.4 |
| Teleraffrescamento(4) | 0.5 | 0 | 0.5 |
| Energia termica da collettori solari (5) | 0 | 1.00 | 1.00 |
| Energia elettrica prodotta da fotovoltaico, mini-eolico e mini-idraulico (5) | 0 | 1.00 | 1.00 |
| Energia termica dall'ambiente esterno – free cooling (5) | 0 | 1.00 | 1.00 |
| Energia termica dall'ambiente esterno – pompa di calore (5) | 0 | 1.00 | 1.00 |

(1) I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE.

(2) Come definite dall'allegato X del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152.

(3) I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE.

(4) Fattore assunto in assenza di valori dichiarati dal fornitore e asseverati da parte terza, conformemente al quanto previsto al paragrafo 3.2.

(5) Valori convenzionali funzionali al sistema di calcolo.

È evidente quindi che ogni Paese Membro (quindi anche ogni partecipante al progetto Annex 75) è provvisto di diversi fattori di conversione in energia primaria. In Italia i valori normati sono riportati nel Decreto Minimi [51] (D.M. 26/06/2015, All. 1, art.1.1), riepilogati in Tabella 2.

Possono essere effettuate alcune considerazioni in merito all'impatto dei fattori di conversione.

I combustibili fossili hanno perciò fattore di conversione 1.05. La componente rinnovabile è data dalla differenza fra il fattore di conversione in energia primaria totale ed il fattore di conversione in energia primaria non rinnovabile. Per i combustibili fossili la frazione rinnovabile è ovviamente nulla mentre nel caso della radiazione solare è nulla la componente non rinnovabile.

L'energia elettrica è prevalentemente di origine non rinnovabile, ma contiene anche una componente rinnovabile (idroelettrico, eolico, fotovoltaico, ...), dato che non tutta l'energia elettrica è prodotta per via termoelettrica e buona parte proviene da centrali idroelettriche o da nucleare importato dai paesi circostanti. Il fattore di conversione dipende perciò dal mix produttivo dell'energia elettrica consumata localmente e dovrebbe essere dichiarato dall'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente AEEG sulla base dei dati forniti dal gestore della rete elettrica.

Inoltre il Decreto Minimi prevede che i gestori degli impianti di teleriscaldamento si dotino di certificazione atta a comprovare i fattori di conversione in energia primaria dell'energia termica fornita ai punti di consegna delle reti di teleriscaldamento da essi gestite. In questo caso i valori vengono calcolati secondo la norma UNI EN 15316-4-5/2008 [158] basandosi sui dati reali o di produzione e consumo di progetto del sistema di teleriscaldamento autorizzato e in corso di realizzazione.

Con l'entrata in vigore della normativa UNI 11300-5 [160] del 26/06/2016 sono cambiati anche i calcoli dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili, consegnata ed esportata. L'energia consegnata (delivered) rappresenta l'energia che il vettore energetico fornisce, attraverso il confine, al sistema edificio-impianto per soddisfare i servizi presenti (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ventilazione meccanica, illuminazione e trasporto). Questa energia può essere direttamente disponibile, può derivare da un combustibile o provenire da una fonte rinnovabile. L'energia esportata all'esterno del sistema rappresenta la quantità di energia prodotta che non può essere utilizzata dall'edificio. Può essere esportata esclusivamente energia elettrica prodotta sia da fonti fossili sia da fonti rinnovabili.

L'energia prodotta dagli impianti fotovoltaici è ritenuta completamente rinnovabile. In questo caso il rapporto fra energia solare irradiata e energia elettrica prodotta è funzione del tipo di pannelli, dell'inclinazione, dell'orientamento e varia anche in funzione dei dati climatici e quindi viene adottata un'efficienza di conversione pari al 10%. Per un impianto solare termico tutta l'energia prodotta dai pannelli che il sistema edificio riesce ad utilizzare è ritenuta rinnovabile e l'energia termica non è energia che può essere esportata. Lo stesso approccio va considerato anche per la pompa di calore; pertanto l'energia prelevata dall'ambiente è ritenuta completamente rinnovabile.

Per questo studio i valori di conversione applicati sono riportati in Tabella 3 e sono compresi anche i costi energetici e le emissioni di CO₂.

Tabella 3 – Fattori di conversione in energia primaria, prezzi ed emissioni dei vettori energetici adottati nella ricerca e applicati nel caso studio.

| Vettori Energetici | Energia Primaria Non-Rinnovabile Fp,nren [-] | Energia Primaria Rinnovabile Fp,ren [-] | Energia Primaria Totale Fp,tot [-] | Prezzo Unitario [€/kWh] | Emissioni CO ₂ [kgCO ₂ eq/kWh] |
|--------------------|---|--|---------------------------------------|----------------------------|---|
| Elettricità | 1.950 | 0.470 | 2.420 | 0.219 | 0.483 |
| Gas naturale | 1.050 | - | 1.050 | 0.081 | 0.250 |
| Pellet di legno | 0.200 | 0.910 | 1.110 | 0.067 | 0.030 |
| Cippato | 0.200 | 0.910 | 1.110 | 0.028 | 0.032 |
| Gasolio | 1.070 | - | 1.070 | 0.170 | 0.267 |
| TRL elettrico | 1.200 | 0.300 | 1.500 | 0.150 | 0.360 |
| TRL gas | 0.640 | 0.920 | 1.560 | 0.068 | 0.186 |
| TRL biomassa | 0.300 | 1.200 | 1.500 | 0.060 | 0.022 |

Rispetto a quanto esposto nei paragrafi precedenti sono presenti alcuni aggiornamenti: i valori di biomassa sono divisi per tipologia di cippato e pellets in funzione del diverso costo sul mercato e del fattore di emissione di CO₂, mentre per il teleriscaldamento sono stati considerati i valori certificati da gestori di impianto presenti nel territorio italiano, con relativa applicazione delle tariffe al consumatore.

I prezzi adottati per il consumatore finale e utilizzati per l'analisi del caso studio fanno riferimento all'anno 2018: per i vettori energetici elettricità e gas naturale sono elaborati dal database Eurostat [161], mentre per la biomassa si fa riferimento al report del 2018 dell'Associazione Italiana Energie Agroforestali AIEL [162]. Invece, per la determinazione delle emissioni di CO₂ per le diverse fonti e vettori energetici, i fattori di emissione riferiti all'energia fornita per il funzionamento degli impianti sono ripresi da quanto elaborato per l'anno 2020 dall'associazione AIEL.

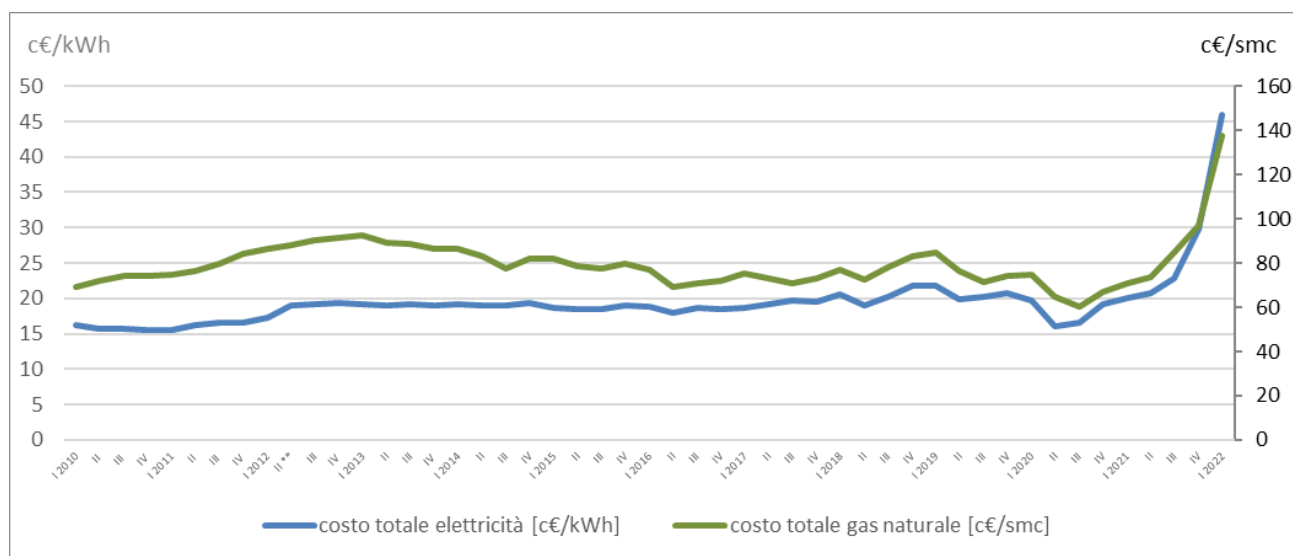


Figura 10 – Andamento del prezzo dell'energia elettrica e del gas naturale per un consumatore domestico tipo in maggior tutela. Si fa riferimento a condizioni economiche di fornitura per una famiglia con 3 kW di potenza elettrica impegnata e 2.700 kWh di consumo annuo per l'elettricità, mentre per il gas naturale a riscaldamento autonomo e consumo annuale di 1.400 m³ (Fonte: ARERA, Eurostat database).

In relazione a quanto richiesto nella metodologia, anche il prezzo dell'energia viene calcolato secondo il periodo di service life di 30 anni. Ciò implica l'adozione di uno scenario ipotetico dell'andamento dei prezzi dell'energia per il consumatore fino al 2050, ma questa ipotesi andrebbe rivalutata in seguito alla Pandemia di COVID-19 [163] e agli effetti che ha comportato sulla richiesta e sul consumo di energia. Pertanto, data la continua variabilità della situazione, in questo studio viene proposta l'adozione di un trend che fa riferimento all'andamento dei prezzi di mercato dei vettori energetici che si è registrato negli ultimi anni [161].

Infatti si possono rielaborare i dati storici e statistici dei prezzi dell'elettricità e del gas naturale dagli archivi storici di ARERA (Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente) e dai report e database dell'Eurostat Energy Database (Figura 10), che comprendo i costi totali i comprensivi di: costi infrastrutturali, spesa per la materia energia, spesa per il trasporto e la gestione del contatore, spesa per oneri di sistema, imposte.

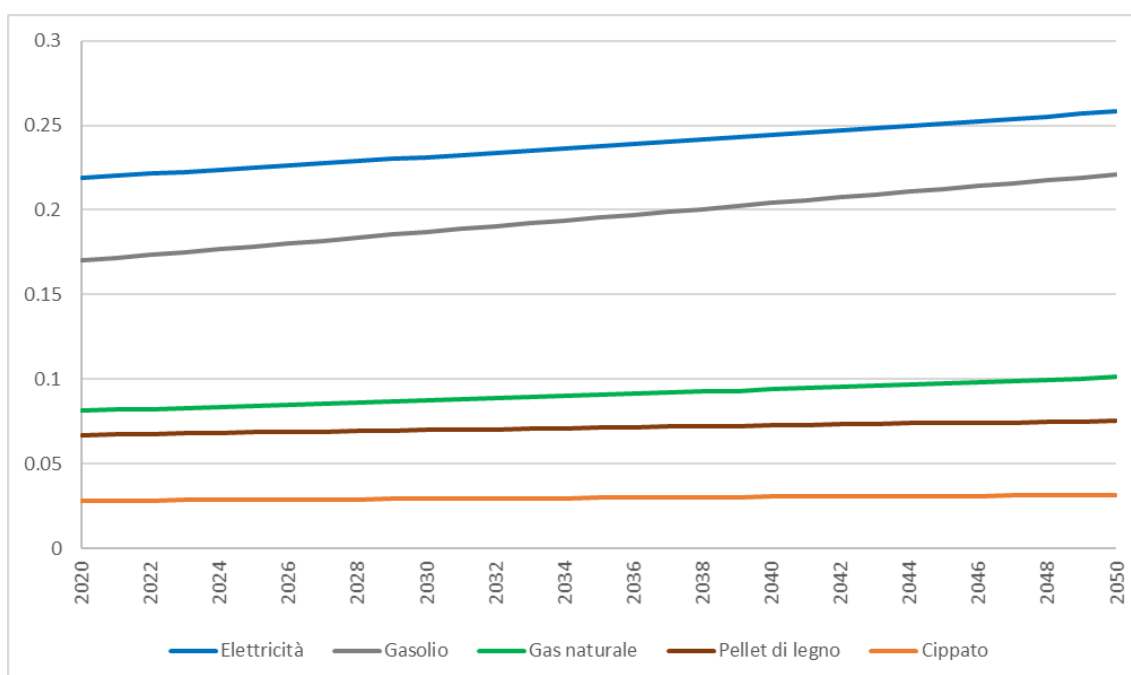


Figura 11 – Scenario dell'andamento dei prezzi dei vettori energetici espresso in €/kWh per il periodo di service life dal 2020 al 2050.

Lo scenario di previsione che viene utilizzato è riportato in Figura 11. Con riferimento al trentennio precedente si prevede quindi che nel prossimo trentennio il costo finale dei vettori energetici per il consumatore saranno aumentati: 15% per l'energia elettrica, almeno 20% per combustibili fossili, 11% per biomassa.

Si prevede un'evoluzione del mercato energetico che subirà dei significativi aumenti per l'Italia. La domanda di elettricità aumenterà di circa il 28% entro il 2050. La domanda di elettricità è influenzata e implementata soprattutto da fattori quali la crescita della popolazione e una maggiore elettrificazione nelle case, nonché un aumento della mobilità elettrica. Secondo i piani della Commissione Europea, la maggior parte della crescita economica si sta verificando nel settore dei servizi terziari, che ha anche bisogno di più elettricità. Nel settore industriale, una maggiore efficienza può impedire un aumento significativo del consumo di elettricità. Tuttavia, la produzione di centrali a gas aumenterà del 25% circa entro il 2050. Le centrali eoliche e solari genereranno circa il 45% di elettricità nel 2050.

In Italia in particolare è determinante il mercato del gas naturale, perché è la fonte energetica più consumata, da cui dipende anche il prezzo dell'energia elettrica. Secondo dati dal report annuale di ARERA [164], il consumo annuo ammonta mediamente a circa 75 miliardi di metri cubi: circa 28 miliardi per riscaldare gli edifici, circa 26 miliardi per produrre energia elettrica e circa 15 miliardi per i processi industriali. Solo circa 5 miliardi vengono estratti in Italia e circa 70 miliardi (pari al 93% del totale) vengono importati via metanodotto dalla Russia (50%), dall'Algeria (17%), dalla Libia (8%), Norvegia (9%), ma anche via mare dal Qatar, USA e altri (15%) [164]. Quindi il paese è completamente dipendente dall'estero e perciò soggetto all'andamento dei mercati internazionali.

Inoltre analizzando il mix energetico in Italia si nota come la produzione di energia elettrica immessa nel sistema elettrico italiano nel 2020 sia ancora basata sui combustibili fossili, nel dettaglio: fonti rinnovabili 45.04%, carbone 6.34%, gas naturale 42.28%, prodotti petroliferi 0.48%, nucleare 3.22%, altre fonti 2.64%. La quota parte da fonti energetiche rinnovabili è suddivisa in: eolica 7%, fotovoltaica 10%, idroelettrica 19%, bioenergia 7% e 2% di geotermica.

Tuttavia, secondo il rapporto di IRENA [165], il fotovoltaico, l'eolico on-shore, l'eolico off-shore e il solare a concentrazione hanno diminuito i loro costi ad un livello tale che potrebbero già sostituire almeno il 75% delle attuali produzioni fossili. Pertanto, se l'Italia convertisse la produzione elettrica da fossile a rinnovabile, le emissioni di CO₂ ridurrebbero drasticamente con un enorme beneficio economico, che potrebbe terminare per l'Italia la dipendenza dalle importazioni dall'estero con grande beneficio per la bilancia commerciale.

Oltre all'impatto dell'epidemia da COVID-19 ancora in corso, è opportuno analizzare la situazione attuale dei prezzi dell'energia, nello specifico in relazione al forte aumento di prezzi del gas nel 2021 (Figura 10) che non era così prevedibile in termini di tempistiche e ampiezza di variazione. Questo fenomeno, inatteso e ancora in corso, ha stravolto completamente trend dei prezzi, compromettendo le previsioni e le ipotesi adottate anche in questo studio.

Si può tuttavia proporre un'analisi e considerare alcuni aspetti per le analisi e gli sviluppi futuri della ricerca scientifica.

Con i lockdown dovuti alla pandemia da Coronavirus, nella prima parte del 2020 i consumi di energia si sono improvvisamente abbassati, per poi riprendere improvvisamente con la riapertura delle attività produttive.

Nel periodo gennaio-dicembre 2021, in Europa i prezzi spot del gas naturale all'ingrosso sono in media più che quintuplicati rispetto allo stesso periodo del 2020. Nel corso del 2021 all'hub italiano PSV (Punto Virtuale di Scambio) le quotazioni sono passate dai 20 €/MWh di gennaio ai 120 €/MWh circa a inizio dicembre; un andamento analogo è stato riscontrato negli altri principali punti di scambio europei.

Il fenomeno dei rincari dei prezzi energetici ha travolto tutti i consumatori: dai clienti domestici alle imprese grandi e piccole, dal commercio alla pubblica amministrazione. È un problema che riguarda tutta l'Europa, ma con l'Italia colpita in modo particolare, data la storica dipendenza dall'importazione di energia, e in un contesto di mercato sempre più internazionalizzato soprattutto per la crescita dei commerci di GNL (Gas Naturale Liquido), i motivi sono riconducibili ad alcuni principali fattori:

1. la ripresa della domanda post lockdown trainata soprattutto da quella asiatica, con Paesi in crisi energetica (Cina) disposti a pagare il gas liquefatto a prezzi elevatissimi, da cui pesanti ripercussioni sui mercati europei in termini di riduzione dei carichi verso il vecchio continente e spinta al rialzo delle quotazioni;

2. la situazione geopolitica dei rapporti tra Russia ed Europa per la delle forniture di gas; il nuovo gasdotto Nord Stream 2, che dovrebbe portare il gas russo direttamente in Europa bypassando l'Ucraina, non è ancora attivo per problemi autorizzativi da parte della Germania, il Paese di approdo nell'UE. Nel frattempo, però, le forniture di gas russe sulle vecchie rotte verso all'Europa non sono affatto aumentate e sono rimaste a secco;
3. l'indisponibilità di alcuni esportatori (Gazprom in primis) ad accrescere le quantità oltre il minimo contrattuale;
4. i volumi di GNL disponibili sul mercato globale sono minori di quelli attesi, stimando per il 2021 un ammanco di capacità di liquefazione di 20-25 md mc rispetto a quanto previsto;
5. primi effetti del calo degli investimenti nell'upstream della filiera metano;
6. la riduzione della produzione interna UE per declino naturale o per misure di regolazione;
7. il mancato riempimento degli stoccaggi europei, prima per motivi climatici (la primavera fredda ha dirottato al consumo volumi destinati a riserva) e poi commerciali (non convenienza ad immettere gas nei siti a prezzi tanto elevati);
8. il fattore climatico; lo scorso inverno si è concluso per buona parte dell'Europa con una coda più fredda del previsto che ha causato una ulteriore diminuzione degli stoccaggi di gas. Per contro, l'estate del 2021 è stata particolarmente calda e i climatizzatori hanno funzionato a lungo consumando molta elettricità. Infine è calato il vento nel Mare del Nord e i parchi eolici hanno funzionato a regime ridotto, costringendo paesi come Gran Bretagna e Germania a consumare altro gas per far funzionare le centrali termoelettriche.

A causa del fatto che quota di energia elettrica viene generata attraverso il gas naturale, il PUN (Prezzo Unico Nazionale), ovvero il prezzo di riferimento dell'energia elettrica sul mercato libero italiano, è strettamente legato all'andamento delle quotazioni del gas naturale, in particolare alle quotazioni del gas scambiato al TTF (Title Transfer Facility) olandese, ovvero il prezzo di riferimento del mercato europeo.

Pertanto il prezzo dell'energia elettrica sul mercato italiano nel corso del 2021 è stato oggetto di una crescita esponenziale, mentre nella prima parte del 2020 le restrizioni alle attività produttive e il conseguente calo della domanda avevano provocato una diminuzione del prezzo fino a 22 €/MWh.

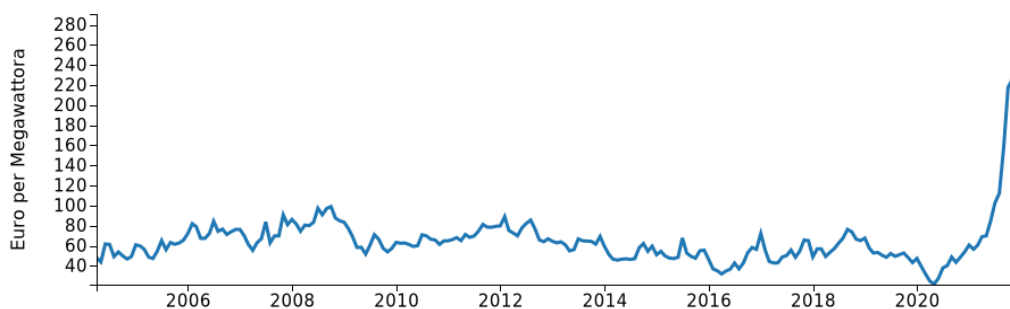


Figura 12 – Serie storica del prezzo PUN energia elettrica medio mensile, espresso in €/MWh, dal 2004 al 2021 (Fonte: Pricepedia).

Dal grafico in Figura 12 si può osservare come negli ultimi 17 anni la media mensile del PUN sia oscillata tra 36 e 100 €/MWh, mentre nel 2021 il prezzo abbia superato la soglia di 500 €/MWh, in crescita di oltre il 600% rispetto ai 12 mesi precedenti. Nei primi mesi del 2022 il prezzo si è assestato su una media di circa 220 €/MWh, pur con valori massimi di circa 400 €/MWh a gennaio e 300 €/MWh a febbraio.

Un altro elemento che ha fatto lievitare i costi dell'energia è l'aumento dei prezzi dei permessi di emissione di CO₂ chiamati Ets (Emission Trading Scheme). Si tratta di un meccanismo creato dall'UE con l'obiettivo di favorire l'abbattimento delle emissioni da parte delle imprese energivore e riguarda in Europa circa 11.000 siti produttivi industriali, comprese tutte le compagnie energetiche, ai quali viene assegnato annualmente un numero massimo di quote di emissione.

Oltrepassati questi limiti, le imprese devono acquistare ulteriori permessi di emissione per poter continuare a produrre. L'aumento del prezzo della CO₂ implica un aumento dei costi di produzione di energia elettrica tanto maggiore quanto più inquinante è la fonte di energia.



Figura 13 – Serie storica del prezzo della CO₂, espresso in euro per tonnellata, dal 2017 al 2021.

Come si può vedere dal grafico in Figura 13, il prezzo della CO₂ dal 2017 in poi ha avuto una crescita vertiginosa, passando dai 5 euro per tonnellata del gennaio 2017 a oltre 80 euro di fine 2021. Lo scorso anno, infatti, anche a causa di una revisione europea che ha ridotto il numero di quote disponibili, i prezzi sono più che raddoppiati e i produttori di energia, tra cui tutte le compagnie proprietarie degli impianti termoelettrici, hanno riversato gli extra-costi sui prezzi all'ingrosso.

Le previsioni per il prossimo periodo non possono non considerare un intervento politico calmierante da parte dei governi nazionali.

Infatti il Centro Studi Confindustria [166] stima che nel 2022 la bolletta energetica sarà di 37 miliardi di euro: quasi il doppio rispetto a quella 2021, pari a 20 miliardi. La situazione descritta da Confindustria è molto simile a quella descritta dall'omologa associazione degli industriali tedesca. In Germania è a rischio gran parte dell'attività manifatturiera e tutta la politica di transizione verso la produzione di energia green. Non dissimile è la situazione in altri paesi europei e quindi ci saranno inevitabilmente delle ripercussioni sui prezzi delle commodity.

Tendenzialmente le previsioni fornite da analisti di settore, come quelle riportate di seguito ed elaborate dal Centro Studi Pricepedia [167], concordano nel definire un'eccezionalità della fase del 2021, ipotizzando che tale fenomeno sia stato temporaneo, ma che ci sia un'incertezza crescente su quale sarà il livello dei prezzi dell'energia elettrica nel prossimo futuro nonostante la forte relazione tra PUN e gas naturale.

Per il gas naturale, il modello econometrico utilizzato è l'"error correction model". Per costruire la previsione si è ipotizzato che il prezzo del gas naturale nei prossimi mesi fosse uguale alle quotazioni dei "future" per consegna ai mesi corrispondenti; ad esempio, il prezzo del gas a giugno 2022 corrisponde alle quotazioni più recenti del contratto con scadenza a giugno 2022.

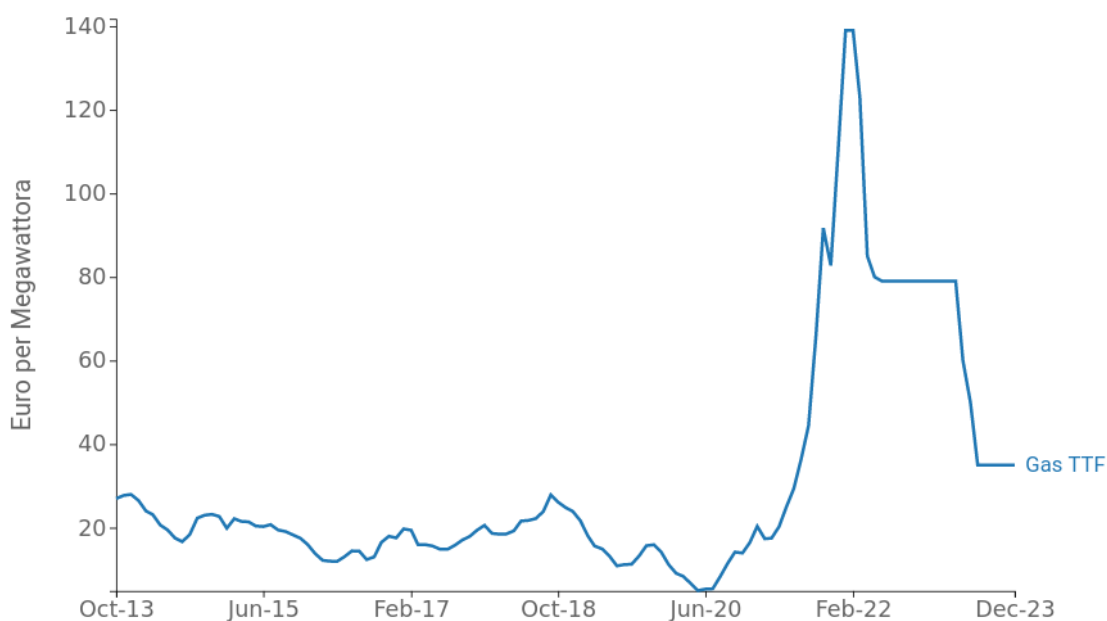


Figura 14 – Dinamica del prezzo mensile del gas naturale quotato al TTF olandese, espresso in EUR/MWh, e con scenario di previsione ipotizzato da fine 2021 a fine 2023.

Il grafico in Figura 14 mostra la dinamica del prezzo mensile del gas naturale quotato al TTF olandese e lo scenario di previsione ipotizzato. Il prezzo del gas naturale ha subito una crescita fortissima iniziata nell'estate del 2020. Tale crescita ha subito un'accelerazione nel corso del 2021, arrivando agli attuali livelli di massimo storico. Nello scenario di previsione illustrato, la riduzione dei prezzi inizierà nella prima fase del 2022, e si assesterà su livelli prossimi a quelli di settembre 2021. Nel 2023 il prezzo del gas continuerà a diminuire fino alla soglia dei 35 €/MWh.

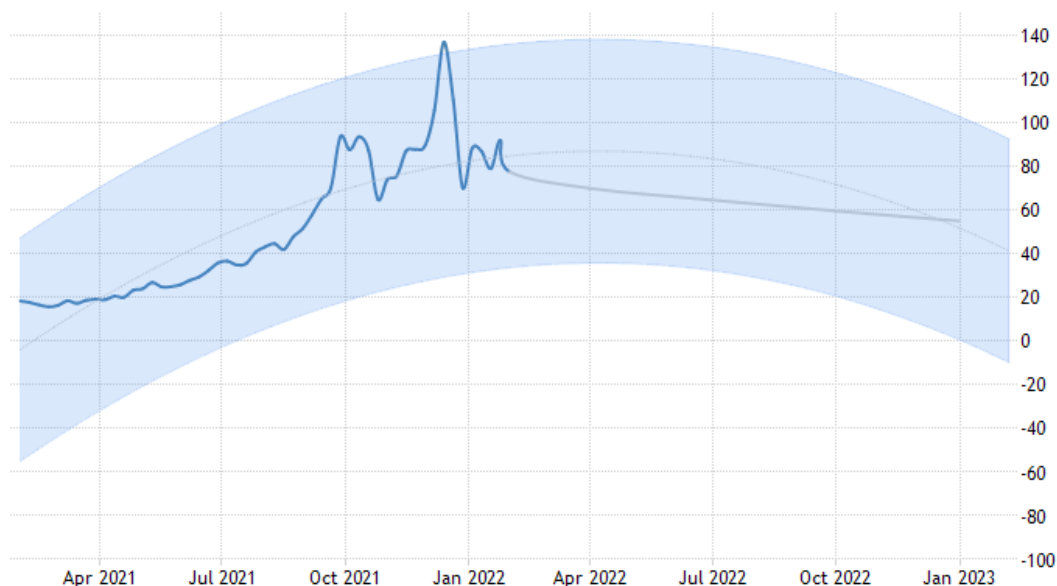


Figura 15 – Scenario ipotizzato fino al 2023 con previsione del prezzo mensile del gas naturale quotato al TTF olandese, espresso in EUR/MWh (Fonte: Trading Economics)

Secondo i modelli macro globali di Trading Economics [168] e le aspettative degli analisti il gas naturale dell'UE quotato al TTF dovrebbe essere scambiato a 70 EUR/MWh entro la fine del primo trimestre 2022 e sarà scambiato a 55 a fine 2022 (Figura 15).

Per quanto riguarda invece l'energia elettrica, nel grafico in Figura 16 viene mostrata la previsione del prezzo del PUN, che considera come ultimo dato storico del PUN la quotazione mensile di dicembre 2021.

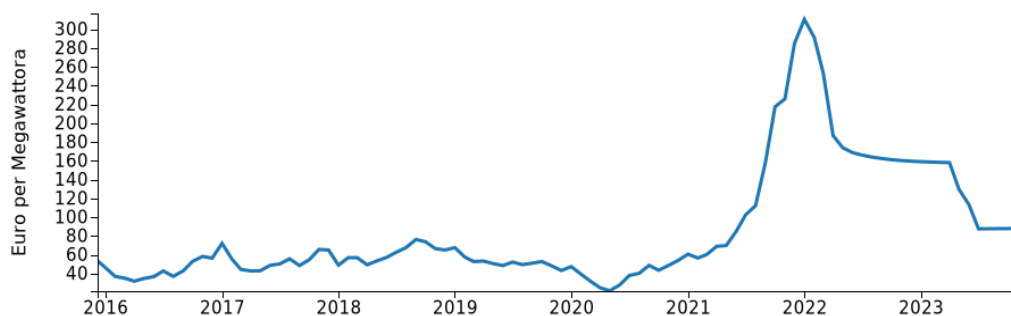


Figura 16 – Previsione andamento del PUN energia elettrica, espresso in €/MWh, dal dicembre 2021 a fine 2024 (Fonte: Pricepedia).

Secondo quanto illustrato dal grafico della previsione, il PUN toccherà un nuovo punto di massimo a gennaio 2022, prima di invertire la rotta. A partire da febbraio, infatti, si prevede che il prezzo possa iniziare a diminuire, chiudendo il 2022 poco sopra ai livelli registrati nel settembre 2021. Il rientro sui livelli dei prezzi pre-pandemia, tuttavia, avverrà soltanto nel corso dell'estate 2023 e si stabilizzerà a fine anno poco sotto i 90 €/MWh.

In termini di valutazione delle emissioni GHG si fa riferimento a quanto riportato in Tabella 3: si può notare che sono in stretta correlazione il rapporto tra il prezzo unitario (€/kWh) e l'impatto ambientale (kgCO₂eq/kWh) di ciascun vettore energetico. Tale correlazione sarà sicuramente confermata anche in fase di analisi dei consumi energetici di questo studio, quindi, anche il trend dei risultati sarà omogeneo tra i due parametri e pertanto la valutazione della convenienza degli scenari e la cost-optimality di questo studio verrà valutata solo in relazione ai consumi energetici e ai costi globali.

Un tema correlato al consumo di energia e alle emissioni ambientali riguarda la qualità dell'aria.

L'inquinamento atmosferico è causato dalla diffusione nell'atmosfera di gas e polveri sottilissime. Le principali fonti di inquinamento attualmente sono il traffico motorizzato (diossidi d'azoto NO_x, polveri fini PM10), l'agricoltura (ammoniaca NH₃, PM10), l'industria (composti organici volatili basati sul carbonio COV, NO_x, PM10) e gli impianti di riscaldamento (PM10, PM2.5), in particolar modo quelli a combustione di biomassa legnosa.

Non si tratta solo di un problema ambientale: l'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA, European Environmental Agency) e studi scientifici [169] hanno evidenziato come l'inquinamento atmosferico sia associato a problemi di salute e a mortalità precoce per malattie cardio-respiratorie. I rapporti annuali Air quality in Europe [170] dell'EEA forniscono infatti informazioni indipendenti e qualificate sull'ambiente e presentano valutazioni delle emissioni e delle concentrazioni di inquinanti atmosferici in Europa e dei relativi impatti sulla salute e sull'ambiente.

Nel report EEA del 2021 [171] i dati rilevano che l'inquinamento atmosferico sia una delle principali cause di decesso prematuro e di malattia e costituisca il più grave rischio sanitario ambientale in Europa. Le malattie cardiovascolari e l'ictus sono le cause più comuni di decesso prematuro attribuibili all'inquinamento atmosferico, seguite da malattie polmonari e cancro ai polmoni. Secondo le stime, 307 mila persone sono decedute prematuramente a causa dell'esposizione all'inquinamento da particolato fine nell'UE nel 2019, con un aumento del 33% rispetto al 2005. Si sarebbe potuto evitare almeno il 58% di questi decessi se tutti gli Stati Membri dell'UE avessero raggiunto un nuovo livello orientativo proposto dal WHO [172], di 5 µg/m³ medio annuo di PM2.5 e 15 µg/m³ medio annuo di PM10.

Infatti le attuali norme per i principali inquinanti atmosferici a livello comunitario, a sua volta recepite a livello nazionale, fanno riferimento alla Direttiva 2008/50/EU sulla qualità dell'aria ambiente. Tali valori prendono in considerazione gli orientamenti del WHO (World Health Organization) del 2005 [173], oltre alle considerazioni di fattibilità tecnica ed economica al momento della loro adozione. Pertanto in Italia gli obiettivi e limiti di legge per la protezione della salute umana stabiliscono per il PM2.5 il limite di 25 µg/m³ medio annuale, mentre per il PM10 il limite è 50 µg/m³ giornaliero (da non superare per più di 35 giorni all'anno) e 40 µg/m³ medio annuale.

How clean is the air in my city?

based on the levels of fine particulate matter measured in the air in cities in 2019 and 2020

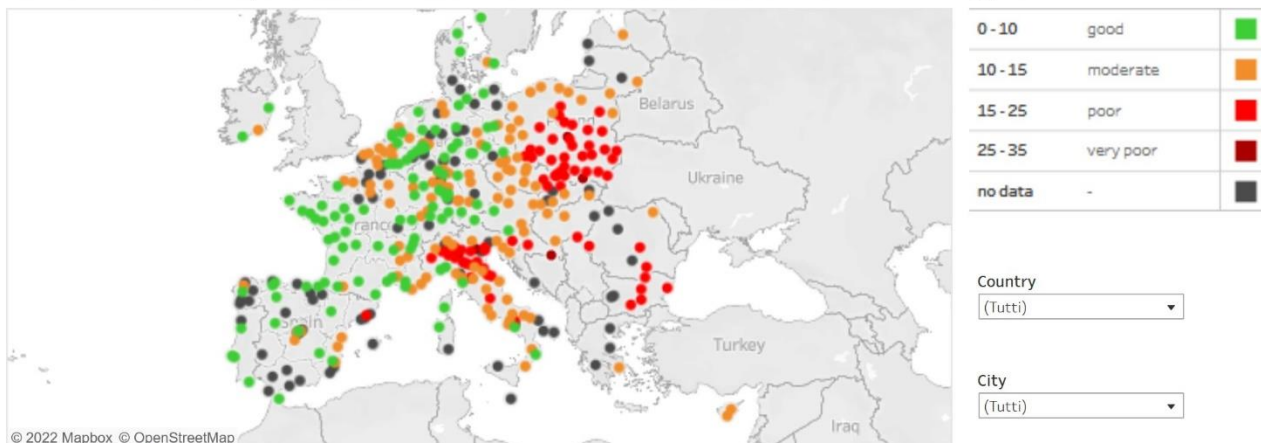


Figura 17 – Concentrazione di livelli di particolato PM2.5 medio annuale, relativo a misurazioni dell'aria del 2019 e 2020 nelle 400 stazioni di monitoraggio in EU (Fonte: EEA).

I dati del report 2021 [171] dell'EEA mostrano che i livelli d'inquinamento dell'aria rimangono al di sopra dei limiti legali dell'UE nella maggior parte dei paesi europei. Per quanto riguarda il particolato PM10, 21 paesi (di cui 16 Stati membri dell'UE) hanno registrato concentrazioni superiori al valore limite giornaliero dell'UE nel 2019 (Figura 17), mentre 31 paesi hanno registrato concentrazioni superiori ai limiti più severi fissati dal WHO.

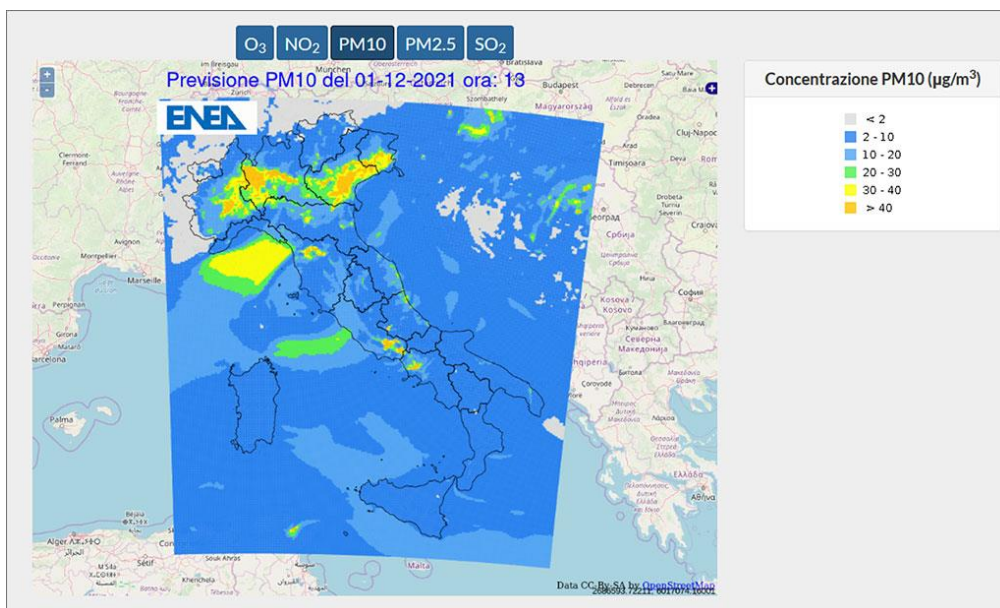


Figura 18 – Concentrazione di livelli di particolato PM10 medio giornaliero, previsione ENEA.

Solo in Italia nel 2019, il PM2.5 ha causato la morte prematura di quasi 50 mila persone, collocando il Paese in seconda posizione, dopo la Germania, nella classifica dei decessi da inquinamento atmosferico. Nel 2020 gli sforamenti non sono stati evitati nonostante il generale miglioramento registrato su tutti i principali inquinanti, soprattutto in seguito al blocco delle attività nel corso dell'emergenza sanitaria a causa della pandemia di COVID-19. Il PM2.5 è diminuito (Figura 17), ma l'Italia resta però in coda alla classifica, insieme al blocco di paesi dell'Europa orientale e dei Balcani.

Gran parte della pianura padana resta vicinissima ai valori di guardia (25 µg/m³), con alcuni sforamenti concentrati in provincia di Cremona e in Puglia (Figura 18).

Come anticipato, il riscaldamento domestico in Europa rappresenta una fonte significativa di polveri sottili la cui concentrazione risulta particolarmente critica in alcune zone, come il bacino della Pianura Padana.

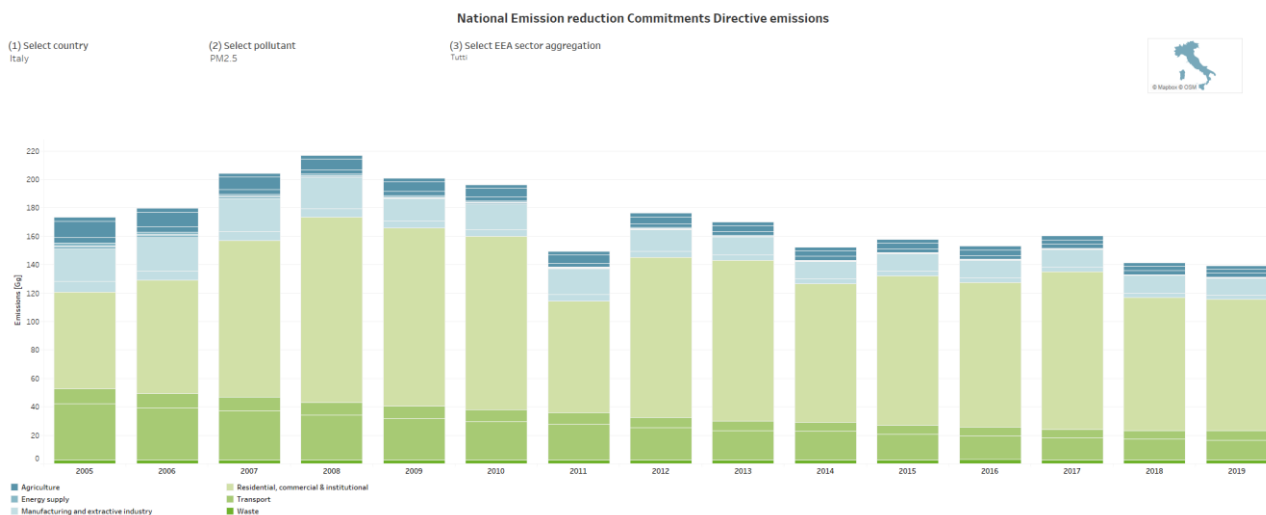


Figura 19 – Concentrazione di particolato PM₁₀, espresso in Gg, rilevato in Italia nel periodo 2005- 2019 e suddiviso per categorie di impatto.

Secondo i dati dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) [174] e dai dati rilevati dall'EEA (Figura 19), in Italia il riscaldamento contribuisce per il 54% delle emissioni primarie di PM₁₀ e PM_{2.5}, risultandone la sorgente principale.

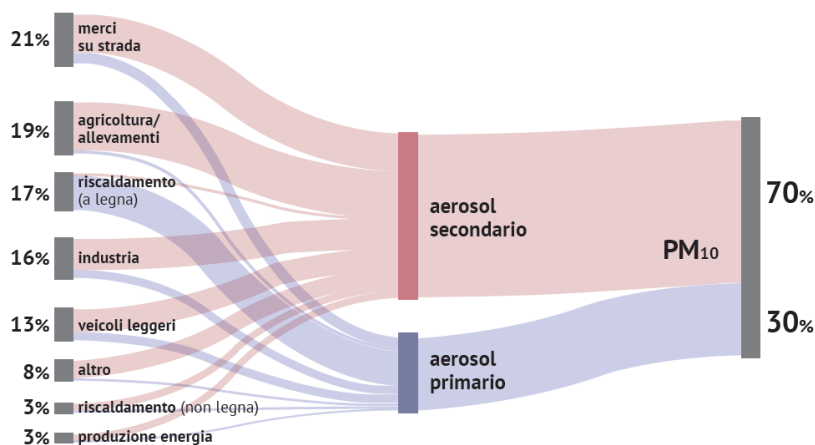


Figura 20 – Emissioni di PM₁₀ equivalente in Emilia Romagna. La larghezza della banda è proporzionale al "PM₁₀ equivalente (Fonte: La qualità dell'aria in Emilia-Romagna. Edizione 2018 di ARPAE).

Tali emissioni, nel periodo invernale, sono principalmente generate dalla combustione domestica di biomassa, legna da ardere e pellet, che producono circa il 17% del particolato PM₁₀ (Figura 20). La maggior parte di PM₁₀ proviene da vecchie stufe e caminetti, con tecnologie di combustione superate: il 70% degli apparecchi installati in Italia ha più di 10 anni di vita e contribuisce all'86% del PM₁₀ derivante dalla combustione domestica di biomassa [175].

Secondo i dati INEMAR (INventario EMissioni ARia) [176], riportati in Tabella 4, una stufa a legna installata da più di 10 anni ha un fattore di emissione pari a 480 g/GJ mentre una moderna stufa a pellet o un moderno inserto emettono circa 80 g/GJ, arrivando anche ai 30 g/GJ per gli impianti più innovativi. I valori riportati portano a un paio di riflessioni: i tradizionali camini aperti emettono una pessima qualità dell'aria (oltre 860 g/GJ); vettori fossili tradizionali come il gas naturale hanno un diverso processo di combustione e rilevano valori di particolato veramente basso (0.2 g/GJ) che sono difficilmente comparabili con quelli della biomassa legnosa.

Tabella 4 – Confronto fra i fattori di emissione (emissione per unità di combustibile bruciato, espressa in giga Joule di energia) di diversi inquinanti prodotti dagli apparecchi a legna e da altri combustibili usati per riscaldamento domestico (Fonte: Inventario INEMAR).

| | PM10 [g/GJ] | NO _x [g/GJ] | SO ₂ [g/GJ] | CO [g/GJ] | COV [g/GJ] |
|--------------------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|--------------|---------------|
| Legna – Caminetto aperto | 860 | 100 | 13 | 5 | 1 |
| Legna – Stufa tradizionale | 480 | 100 | 13 | 5 | 300 |
| Legna – Caminetto chiuso | 380 | 100 | 13 | 4 | 500 |
| Legna – Stufa o caldaia innovativa | 380 | 100 | 13 | 4 | 300 |
| Legna – Stufa a pellet/cippato/legna | 76 | 100 | 13 | 150 | 15 |
| Gas naturale | 0.2 | 35 | 0.5 | 25 | 5 |
| GPL | 0.2 | 50 | 0.2 | 10 | 2 |
| Gasolio | 5 | 50 | 47 | 20 | 3 |
| Olio combustibile | 15 | 150 | 146 | 16 | 12 |

Per quanto riguarda la qualità dell'aria si possono riportare alcuni dati in relazione alla tecnologia impiantistica e al vettore energetico adottato per il riscaldamento dei distretti urbani.

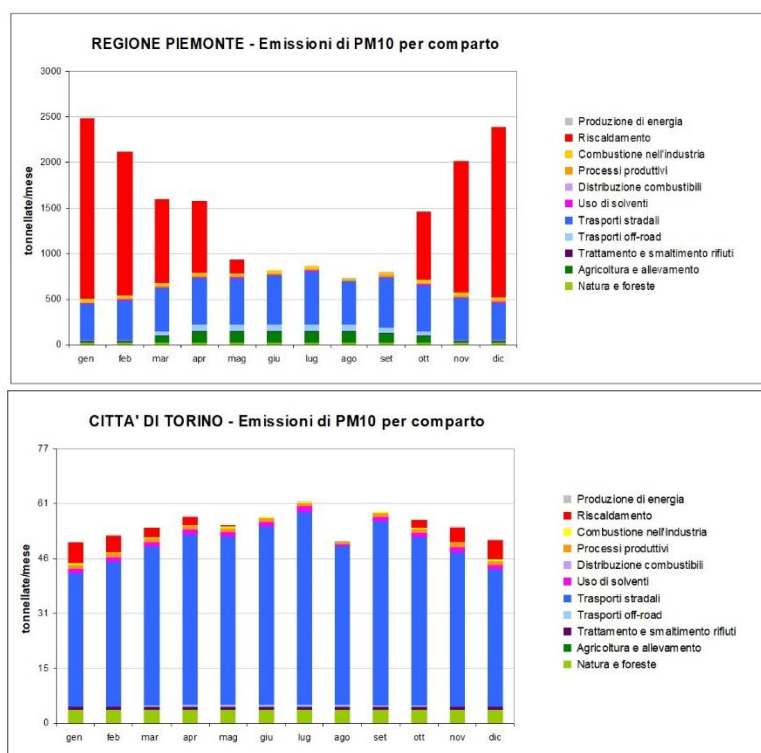


Figura 21 – Emissioni di particolato PM10, espresso in t/mese, rilevato nel 2019 nel Comune di Torino e nella Regione Piemonte (Fonte: ARPAV Piemonte).

L'adozione di un sistema di teleriscaldamento a livello urbano basato su cogenerazione, come nel caso della città di Torino (Figura 21), ha portato a una forte riduzione di particolato PM10 provocato dal comparto riscaldamento (circa 5%) degli edifici, mentre il settore dei trasporti risulta il responsabile principale (circa 80%). Tuttavia nel resto del territorio extraurbano la situazione è critica. Le emissioni di PM sono dovute soprattutto al riscaldamento a biomassa in linea con la promozione delle energie rinnovabili nella lotta al cambiamento climatico, che ha incrementato la combustione di biomassa legnosa in ambito domestico, in quanto fonte rinnovabile con emissioni neutre di CO₂ (carbon neutral).

Infatti, secondo i dati di AIEL [162], la diffusione delle stufe a pellet ha determinato una situazione di criticità per la gestione della qualità dell'aria, caratterizzata da un mercato e da un utilizzo incontrollati: la provenienza del combustibile è incerta, si ha un uso prevalente di pellet non certificato, l'installazione degli impianti non è corretta o non è gestita [177].

Una possibile soluzione è proposta da AIEL: intensificare l'impegno a incentivare la sostituzione dei vecchi e obsoleti apparecchi a biomassa e pellet con nuovi e moderni generatori che garantiscono elevati livelli di efficienza energetica e basse emissioni di polveri. Studi recenti [178,179] affermano infatti che l'adozione di teleriscaldamento basato su generatori centralizzati a biomassa permette un uso più sostenibile dal punto di vista ambientale della biomassa rispetto ai dispositivi domestici.

Con impianti a biomassa di grande capacità, utilizzabili a livello di condominio o di rete –intesi come BDHP (Biomass District Heating Plants), il beneficio principale consiste nella riduzione di CO₂ tra il 60% e l'80%; per quanto riguarda invece i macroinquinanti, le emissioni più impattanti sono relative a PM e NO_x, ma gli impianti sono sempre dotati di componenti e sezioni adeguate per il controllo e l'abbattimento delle emissioni: i moderni apparecchi a biomasse sono caratterizzati da emissioni di PM10 da 4 a 8 volte inferiori rispetto alle tecnologie più datate e tradizionali [179]. Il tema BDHP è molto dibattuto e, in generale, rappresenta una barriera non tecnica rispetto alla combustione delle biomasse.

3.2.1. Riepilogo

La definizione della prestazione energetica degli edifici e quindi l'applicazione della metodologia, è legata al concetto di energia primaria. Ogni Paese Membro è dotato di una propria normativa di riferimento che consideri i fattori di conversione dell'energia; per l'Italia il documento fondamentale di riferimento è il Decreto Minimi (D.M. 26/06/2015), che definisce indici, fattori, tipologie in base al tipo di fonte energetica e riporta anche i fattori di conversione per le emissioni di CO₂.

il prezzo dell'energia viene calcolato in un periodo di service life di 30 anni. Ciò implica l'adozione di uno scenario ipotetico dell'andamento dei prezzi dell'energia per il consumatore fino al 2050. In una situazione instabile a causa della Pandemia di COVID-19, l'andamento dei prezzi è di difficile previsione e pertanto questo studio ha adottato un trend dei prezzi di mercato dei vettori energetici registrato negli ultimi anni.

Le previsioni del prezzo del gas naturale implicite nei contratti future relativi ai prossimi 24 mesi consentono di stimare la possibile evoluzione del prezzo del PUN nei prossimi mesi. La relazione stimata tra prezzo del gas naturale e prezzo del PUN consente di dar conto in modo molto preciso della crescita del PUN fino a settembre 2021.

La crescita del PUN nei mesi più recenti e, soprattutto, i livelli raggiunti nei giorni scorsi, sono tuttavia solo parzialmente giustificati dal livello del prezzo del gas naturale. Alla crescita del prezzo del PUN hanno concorso altri fattori, la cui natura dovrà essere oggetto di ulteriori analisi. In termini di previsione si suppone che questi fattori siano temporanei riportando il PUN a riflettere esclusivamente le dinamiche del prezzo del gas naturale. Qualora essi risultassero di altra natura, è probabile che il PUN registri nei prossimi mesi una flessione meno accentuata di quella qui prevista.

Il focus specifico sull'inquinamento atmosferico da biomassa (in particolare il particolato PM10) evidenzia come il problema sia dovuto ancora alla larga diffusione di combustione di legna in camini e stufe tradizionali, soprattutto nelle zone di maggiore disponibilità come le aree rurali di pianura e nelle vallate alpine e prealpine. Nonostante la crescente innovazione tecnologica e la diffusione di impianti di combustione a biomassa anche di grande taglia e destinati a centrali di teleriscaldamento, l'emissione di particolato PM10 per impianti a biomassa presenta ancora valori non comparabili con quelli di teleriscaldamento basato su cogenerazione a gas.

.....

.....

4. STRUMENTI

Tool di calcolo in regime dinamico e semi-stazionario

Il capitolo descrive tre software selezionati per la parte applicativa della ricerca, focalizzandosi sulle caratteristiche principali e sui moduli utilizzati. Si tratta di due tool proprietari con approccio dinamico (CEA e EURECA) e un tool sviluppato appositamente per la ricerca e l'applicazione della metodologia del progetto Annex 75.

L'obiettivo di questa analisi consiste nel creare un database di informazioni che saranno poi utilizzate nella fase di ottimizzazione e di individuazione delle cost optimal measures di intervento.

La scelta è stata definita in base al modello di calcolo adottato, e quindi anche alla tipologia di utente e alle competenze necessarie per l'utilizzo.

Per il calcolo in regime dinamico vengono quindi descritti i software CEA e la recente piattaforma EURECA, mentre per il calcolo in regime semi-stazionario viene presentato un tool in formato di foglio elettronico sviluppato appositamente per la ricerca al fine di individuare il fabbisogno energetico di quartiere e le soluzioni energeticamente efficienti e convenienti di intervento di riqualificazione.

Una parte di quanto esposto di seguito è stato pubblicato in una versione estesa in [89].

4.1. Calcolo in regime dinamico con il software City Energy Analyst CEA

City Energy Analyst (CEA) è uno strumento open-source sviluppato dall'Architecture and Building Systems (A/S) Group dell'ETH di Zurigo, che permette l'analisi e l'ottimizzazione degli impianti energetici nei quartieri cittadini, la modellazione energetica di dataset di edifici, lo sviluppo di strategie di retrofit a livello di quartiere, la pianificazione urbana, le emissioni di CO₂ e i benefici economici delle strategie di retrofit. Inoltre, permette ai professionisti di pianificare impianti energetici si quartiere e valutare il possibile sfruttamento delle energie rinnovabili sul posto [145,180].

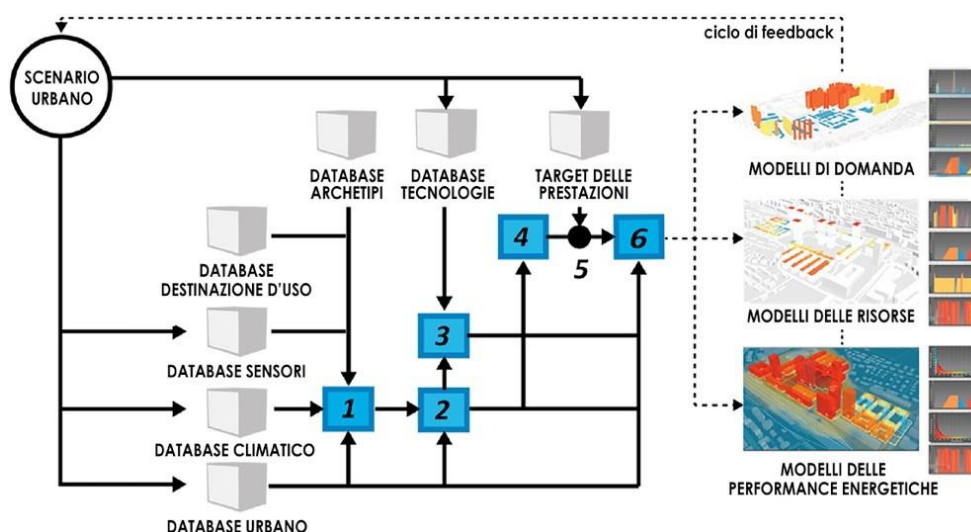


Figura 22 – Processo di calcolo di City Energy Analyst (CEA).

Il software, sviluppato usando il linguaggio di programmazione Python nella sua versione 2.7, è costruito come un'estensione di ArcGIS versione 10.3. Il framework di CEA per l'analisi energetica utilizza sette database e sei moduli di calcolo (Figura 22).

Per l'obiettivo di questa ricerca i database più importanti sono: climatico, urbano e archetipi. Il database climatico contiene dati storici relativi alle caratteristiche atmosferiche come la temperatura, l'umidità relativa e la radiazione solare della località oggetto di interesse.

Il database urbano contiene informazioni geo-referenziate relative a edifici, infrastrutture e topografia del luogo. Include anche le caratteristiche degli edifici come la superficie calpestabile, l'altezza, il rapporto S/V, il tipo di utilizzo, la data di costruzione e l'ultima ristrutturazione.

Il database degli archetipi descrive le caratteristiche dell'involucro e della parte impiantistica (HVAC) del patrimonio edilizio analizzato. Si basa su dati statistici, ma possono essere usati dati reali da altre fonti.

Per i moduli di calcolo, vengono usate formule sviluppate nell'ambito del gruppo di ricerca A/S [180]. Questi moduli sono progettati per simulare il potenziale di disponibilità delle risorse, l'ottimizzazione e la visualizzazione dei sistemi energetici degli edifici, passando dal singolo edificio alla scala del distretto. Per questo, viene presa in considerazione una catena di approvvigionamento semplificata che include tutti i flussi di energia nei sottosistemi di generazione, conversione, distribuzione, emissione e trasmissione a livello di quartiere. Le formule basate sulla norma EN ISO 13790:2008 [181] sono utilizzate per il calcolo dinamico del fabbisogno energetico degli edifici. Nel modello, il fabbisogno finale di energia è suddiviso nei principali usi ed è stimato su base oraria [145].

4.2. Calcolo in regime dinamico con il software EURECA

Il software EURECA, anch'esso basato su Python, è stato recentemente presentato da Prativiera et al. [182]. La piattaforma EURECA implementa un modello 5R1C descritto nella norma EN ISO 13790:2008, gestendo sia dati GeoJSON che CityJSON per definire la geometria degli edifici. Si tratta di un software di simulazione bottom-up per prevedere il fabbisogno e il consumo orario di energia per il riscaldamento e il raffrescamento applicato a grandi quartieri e città.

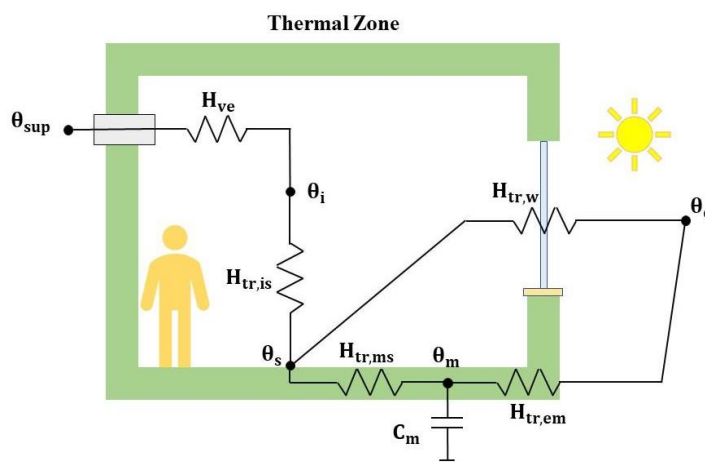


Figura 23 – Schema della rete termica 5R1C [47].

Diversi software di modellazione energetica degli edifici urbani (UBEM) utilizzano modelli semantici geo-referenziati per descrivere gli edifici, le strade, la vegetazione e le infrastrutture delle città, per rappresentare le geometrie 3D delle città e le loro proprietà e attributi.

In particolare, EURECA può gestire modelli CityJSON che corrispondono a modelli GeoJSON 3D e 2D derivati da ESRI Shapefiles ricostruendo le geometrie degli edifici, permettendo così la rappresentazione di città che non sono ancora disponibili con modelli 3D georeferenziati e aumentando la flessibilità di questi software. Anche se il processo di caricamento dell'input geometrico è leggermente diverso tra i file CityJSON e GeoJSON, essi permettono la creazione dell'oggetto Edificio dopo il processo di creazione e identificazione delle superfici dell'edificio stesso e la correlazione con l'uso finale e la classe di età. La gestione dei dati di input gestiti dalla classe Building crea la zona termica e i relativi parametri di rete, seguendo lo schema di calcolo descritto da Prata et al. [182]. Anche se il modello dettagliato di Zona termica applicato nella modellazione di un singolo edificio porta a stime accurate del comportamento termico degli edifici, l'alto livello di informazioni dettagliate e il relativo sforzo computazionale per l'elaborazione degli input evidenziano la necessità di modelli di zona termica semplificati per gli scenari urbani. EURECA calcola le dispersioni di trasmissione e ventilazione e l'inerzia termica dell'edificio attraverso una rete elettrica equivalente che combina tutte le strutture dell'edificio, suddivise in cinque resistenze termiche e una capacità termica, come descritto nella Figura 23.

Il modello di una zona termica semplice può essere costruito da tre nodi termici, il nodo i (aria interna), il nodo s (tutte le superfici) e il nodo m (tutta la massa delle strutture) e due nodi di condizioni limite, il nodo sup (fornitura di aria) e il nodo e (aria esterna). I cinque coefficienti di trasmissione termico sono:

- il coefficiente di trasmissione termica della ventilazione H_{ve} ;
- il coefficiente di trasmissione delle superfici vetrate $H_{tr};w$;
- la conduttanza di accoppiamento tra il nodo m e il nodo e $H_{tr};em$;
- la conduttanza di accoppiamento tra il nodo s e il nodo m $H_{tr};ms$, che combinata con la precedente dà il coefficiente di trasmissione termica delle strutture opache $H_{tr};op$;
- la conduttanza di accoppiamento tra il nodo i e il nodo s $H_{tr};is$.

La capacità termica C_m , che comprende tutte le inerzie termiche di zona, è calcolata secondo la norma UNI EN ISO 13786 [183]. I guadagni termici solari e interni sono suddivisi in tre componenti, ciascuno collegato a un nodo della rete. Un sistema lineare di tre equazioni e quattro termini incogniti si ottiene scrivendo il bilancio termico ad ogni nodo termico, che può essere risolto impostando il flusso di calore (calcolando la temperatura dell'aria) o la temperatura dell'aria interna (calcolando il flusso di calore) [184]. La simulazione viene eseguita per ogni edificio del quartiere ad ogni timestep impostato dall'utente. Le condizioni esterne, cioè la temperatura del bulbo secco, la radiazione solare, la velocità del vento, l'umidità relativa, sono derivate da file di dati meteorologici da file climatico di EnergyPlus con estensione .epw [185].

4.3. Calcolo in regime semi-stazionario con foglio di calcolo

Ai fini dell'applicazione della metodologia esposta è stato sviluppato un foglio di calcolo, in modo tale da avere uno strumento finalizzato all'individuazione di interventi ottimali in caso di riqualificazione di edifici di un quartiere residenziale.

Il software, sviluppato per una precedente ricerca [186,187] è stato implementato con specifiche tecniche per la valutazione di contesti urbani. Il modello è di facile utilizzo e consiste in fogli elettronici di calcolo su base MS Excel, che forniscono il fabbisogno e consumo mensile di energia primaria per il riscaldamento, il raffrescamento e la produzione di acqua calda sanitaria per uso domestico per ogni edificio considerato, utilizzando il metodo semi-stazionario come descritto nella norma UNI 11300 [160].

Il tool è diviso in due sezioni, Input e Assessment. La prima sezione contiene i dati di input che descrivono le caratteristiche degli edifici e del quartiere; la seconda è focalizzata sull'identificazione degli interventi e degli scenari di riqualificazione, al fine di valutare e identificare la soluzione ottimale in termini di energia primaria, emissioni e costi globali.

A seguire una descrizione delle sezioni. Si precisa che un esempio applicativo del foglio di calcolo viene proposto successivamente nel capitolo dedicato all'applicazione dei tool in regime dinamico e semplificato sul caso studio oggetto di questa ricerca.

Sezione Input

Sono compresi 6 fogli che descrivono il caso studio in considerazione in termini di dati climatici, dati geometrici dell'edificio, definizione della trasmittanza termica dell'involucro opaco e vetrato con l'obiettivo di calcolare e identificare il fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti, fabbisogno e uso di energia primaria e potenza di picco.

Il foglio ***Dati Climatici*** descrive le caratteristiche climatiche e la posizione geografica della località. I dati meteorologici fanno riferimento al database del Comitato Termotecnico Italiano (CTI) [188] che fornisce i valori orari per ogni stazione di riferimento rispetto all'anno climatico tipo calcolato secondo la norma UNI EN ISO 15927 [189].

I fogli ***Dimensioni Edifici*** e ***Superfici Finestre*** riportano i dati geometrici del distretto in modo da individuare le diverse superfici disperdenti degli edifici. Nel primo vengono identificati degli edifici per nome secondo valore della particella catastale e vengono riportate le dimensioni dei volumi raccolte da fonti di archivio o da rilievo sul campo. Le informazioni richieste sono principalmente: catalogo e mappa catastale, superficie e perimetro dell'impronta a terra, numero dei piani, altezza complessiva da terra a quota di gronda, altezza dei piani non climatizzati, e numero di abitazioni per ogni livello. Il secondo foglio integra le informazioni dell'involucro opaco definendo l'involucro trasparente ed elaborando la superficie vetrata delle unità residenziali. Anche in questo caso si possono utilizzare fonti da archivio che tuttavia sono generalmente difficili da reperire e pertanto è consigliabile effettuare una ricerca sul campo e analizzare alcuni edifici campione del quartiere, per poi calcolarne la percentuale media di superficie vetrata. Nello specifico si riporta per gli edifici selezionati il numero di serramenti e la superficie lorda per ogni tipologia di serramento. In seguito, rapportando la superficie ottenuta per la superficie totale delle pareti e facendo la media dei risultati ottenuti, si ricava un valore medio applicabile a tutto il quartiere.

Nel foglio ***Tipologie Edifici*** viene riportata la classificazione dei fabbricati attraverso un codice che sintetizza la tipologia costruttiva e impiantistica per ciascun edificio. Il foglio è costituito da un catalogo in cui l'utente definisce il tipo di edificio e lo caratterizza inserendo i valori di trasmittanza termica dei componenti dell'involucro opaco (pareti esterne, copertura, basamento) e trasparente (serramenti) e i valori dei rendimenti dell'impianto installato (Rendimento di emissione, regolazione, distribuzione, produzione, globale). Attraverso il sistema di codifica è possibile inserire anche gli interventi migliorativi per involucro e impianto e quindi definire gli scenari di riqualificazione di ciascuna tipologia di edificio.

Un foglio specifico è dedicato al calcolo del fabbisogno di acqua calda sanitaria (**ACS**) che si basa sul calcolo del consumo pro-capite giornaliero.

Il foglio **Database** è il più importante di questa sezione perché riassume i dati precedentemente raccolti e permette di elaborare i dati energetici degli edifici e del quartiere: fabbisogno, consumo, e potenza di picco per riscaldamento, acqua calda sanitaria e raffrescamento. Di fatto gli output di calcolo elaborati in questa sezione costituiscono la base per la sezione successiva. Una serie di **Grafici**, personalizzabili dall'utente, sono elaborati di default: descrivono la qualità dell'involucro (dispersioni termiche dei componenti) e presentano in grafici a barre gli indici di energia primaria per ciascun edificio suddivisi per tipologia di consumo e vettore energetico.

Sezione Assessment

Anche questa sezione è divisa per fogli di calcolo che elaborano aspetti economici, energetici e ambientali al fine di individuare lo scenario ottimale di intervento.

Il foglio **Computo Intervento** presenta il computo metrico estimativo dell'intervento migliorativo sull'involucro architettonico. Le opere sono suddivise per costi di investimento, manutenzione ordinaria e straordinaria: questo aspetto comporta quindi una progettazione in funzione della vita utile dell'edificio perché ha l'obiettivo di individuare le opere suddivise per periodo, prevedendo le possibili attività e relativi costi di manutenzione che solitamente vengono effettuati in edilizia

Si precisa che il foglio è personalizzabile dall'utente in funzione del progetto di riqualificazione ed è possibile inserire voci parametriche di costo qualora disponibili. Nello specifico il computo metrico di questa ricerca è stato elaborato con riferimento ai principali interventi edilizi di riqualificazione edilizia con riferimento alla classificazione prevista dal Decreto Minimi [51] attualmente in vigore e le opere previste sono inoltre riconducibili all'effettiva pratica edilizia per il centro storico di Venezia. Le voci di prezzo riportate fanno riferimento al prezzario della Regione Veneto [190], al Prezzario del Comune di Venezia e a dati ricavati da indagini di mercato con listini e preventivi effettuati ad hoc.

Nel foglio **Tabella Interventi** vengono riassunti i costi del computo di ciascun scenario e viene elaborato il costo per ciascun anno del periodo di vita utile degli edifici solitamente 30 anni.

Nel foglio viene applicato il metodo del costo globale e pertanto, con l'applicazione del tasso di interesse si ottiene il costo globale dell'intervento architettonico. Nel caso di più scenari con applicazione di diversi materiali e costi questo foglio permette di fatto un confronto tra i costi totali di riqualificazione degli edifici tramite l'attualizzazione all'anno zero di tutti i costi annuali previsti in precedenza.

A seguire si passa ai fogli che trattano gli interventi nella parte impiantistica, valutando caratteristiche e costi globali (costi di investimento, manutenzione ordinaria e straordinaria) per le varie tipologie.

Nel foglio **Generatore** vengono considerati i generatori, sia per soluzioni centralizzate (reti di teleriscaldamento) che decentralizzate (generatore unico per condominio o per singola unità abitativa). Nello specifico il foglio offre un catalogo di soluzioni per tipo di vettore energetico (elettricità, gas naturale, biomassa) e ne riporta efficienza termica ed elettrica, taglie di dimensionamento, e appunto prezzi di mercato da listino o prezzi parametrici. Inoltre, il foglio è collegato ai fogli Tipologie Edifici e Database della sezione Input, ovvero è collegato ai valori di fabbisogno e di picco di potenza per ciascun edificio e per ciascuno scenario di intervento.

Il foglio **Rete di Distribuzione** viene utilizzato qualora sia adottata una soluzione centralizzata. Sono infatti presenti i dimensionamenti della rete di teleriscaldamento descrivendo per ogni tipologia il numero di tubazioni, la relativa lunghezza e il diametro per ogni segmento. A questi vengono poi applicati dei prezzi parametrici al metro lineare per diametro, i costi di installazione della sottostazione, di manutenzione globale annuale.

Sono presenti anche due fogli nel caso di scenari che prevedono l'adozione di impianti con fonti da energia rinnovabile. I fogli **Fotovoltaico** e **Solare Termico** comprendono il costo globale e il dimensionamento dei pannelli (superficie coperta e energia elettrica prodotta) e offrono un catalogo di soluzioni con diverse caratteristiche divise per categoria (dimensioni, potenza, efficienza e costo) che può essere personalizzato dall'utente. Si precisa che i due fogli descritti sono collegati alle informazioni riportate in Dati Climatici e Dimensioni Edifici della sezione Input.

Il foglio **Coefficienti** presenta una lista dei principali vettori energetici e ne descrive le caratteristiche funzionali all'applicazione della metodologia del Cost Optimal. Sono elencati i fattori di conversione di Energia Primaria come riportato nel Decreto Minimi [51] e successivi aggiornamenti, i relativi valori di emissioni di CO₂ equivalente per unità di energia. Sono presenti inoltre i prezzi di mercato relativi all'utenza domestica ricavati da indagini di mercato e da archivio storico Eurostat [1]. Sempre su base statistica viene riportato per ogni vettore un andamento annuale dei prezzi per il periodo 2020-2050, che corrisponde al periodo di vita utile di trent'anni fissato per la ricerca.

Gli ultimi due fogli di calcolo consentono infine di calcolare gli output per individuare lo scenario ottimale. Il foglio **Consumi** elabora tutti i dati riportati nei fogli precedenti e calcola il consumo di Energia Primaria e di emissioni di CO₂ per ogni scenario ipotizzato, quindi per ogni tipo di intervento su involucro e impianto combinato. Il foglio **Costo Globale** raccoglie tutte le voci di costo per categoria, (ovvero costi di investimento, di manutenzione, di esercizio) di ogni scenario e applica infine l'attualizzazione per il periodo considerato adottando lo stesso approccio descritto in precedenza.

Infine sono presenti due fogli di riepilogo che presentano i risultati. In **Output** viene rappresentato il grafico standard di valutazione del metodo Cost Optimal che confronta appunto i valori di Energia Primaria ed emissioni rispetto a quelli dei Costi Globali per ogni scenario e permette di individuare quindi lo scenario di intervento più vantaggioso rispetto alla situazione attuale (Reference). Per valutare il solo aspetto economico dello scenario, il foglio **Payback** analizza i tempi di ritorno dell'investimento iniziale e permette di verificare per ogni scenario la possibilità di ammortizzare l'investimento iniziale prima della fine del periodo di studio, di conseguenza si distinguono gli interventi più vantaggiosi in termini economici.

Definizione delle modalità di calcolo delle prestazioni energetiche

Con maggiore dettaglio vengono di seguito descritte le caratteristiche specifiche adottate per il calcolo nel foglio elettronico.

Come anticipato il riferimento dei dati climatici è il database del Comitato Termotecnico Italiano (CTI) [188]. Lo strumento supporta anche i dati climatici convenzionali indicati dalla norma nazionale UNI 10349 -1:2016 che contiene i dati medi mensili (temperatura dell'aria, pressione del vapore acqueo, velocità del vento di riferimento, irradiazione solare globale, irradiazione solare diretta, irradiazione solare diffusa) calcolati su anni di riferimento e sviluppati dal CTI per 110 località italiane [38].

Per questa ricerca sono stati implementati anche i dati climatici storici (periodo 2011-2018) della città di Venezia, ricavati dalla stazione meteo climatica di "Osservatorio Cavanis Venezia" situata nel centro storico [191]. In particolare, la valutazione tramite modello semi-stazionario assume e calcola, per ogni località, i valori medi mensili della temperatura dell'aria nelle vicinanze dell'edificio, la radiazione solare incidente per ogni orientamento in verticale e sul piano orizzontale, e la temperatura della volta celeste. Il periodo di riscaldamento è determinato in base alla zona climatica e ai gradi giorno di riscaldamento locali (HDD), come stabilito dal D.P.R. 412/93 [37] e dal D.P.R. 74/2013 [192].

I dati geometrici dell'edificio sono calcolati secondo i valori dell'area calpestabile dell'edificio, l'altezza lorda del piano, il numero di piani, il numero di abitazioni per ogni livello. Per esempio, la superficie delle finestre potrebbe essere compilata dai dati rilevati o assunta come un valore percentuale relativo alla superficie del pavimento riscaldato.

Per il calcolo del fabbisogno termico è stata adottata la norma UNI/TS 11300-1:2014, applicando la seguente formula (Equazione 2) [43]:

$$Q_{H,nd} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,g} (Q_{int} + Q_{sol}) [kWh] \quad \text{Equazione 2}$$

dove

- $Q_{H,nd}$ scambio totale di energia per il riscaldamento degli ambienti
- $Q_{H,tr}$ dispersioni termiche attraverso la trasmissione
- $Q_{H,ve}$ dispersioni termiche attraverso la ventilazione
- Q_{int} guadagni termici interni
- Q_{sol} guadagni termici solari
- $\eta_{H,g}$ fattore di utilizzo dei guadagni termici

Le caratteristiche termiche dei componenti dell'involucro opaco e vetrato dell'edificio sono descritte in modo semplificato dai valori della trasmittanza termica (intesa come non comprendente dei ponti termici) e della trasmittanza di energia solare vetrata (Equazione 3):

$$Q_{H,tr} = 0,024 \cdot \left(\sum_i b_{tr,i} U_i A_i \right) \cdot (T_{int} - T_{ext}) \cdot \tau + Q_{tr,ir} [kWh] \quad \text{Equazione 3}$$

dove

- U_i trasmittanza termica dell'iesima superficie che compone l'involucro termico (W/m^2K)
- A_i area dell'iesima superficie che compone l'involucro termico (m^2)
- $b_{tr,i}$ coefficiente di correzione per il trasmissione termica a seconda del tipo di superficie iesima. Per il suolo, la cantina e le superfici condivise non-adiabatiche si ottiene 0,5, per superfici condivise adiabatiche 0, per superfici vetrate 1, altrimenti 1,05
- T_{int} temperatura interna della stanza, fissata a $21^\circ C$ (K)
- T_{ext} temperatura esterna media mensile (K)
- τ estensione del periodo di riscaldamento per ogni mese, in giorni
- 0,024 fattore di conversione dimensionale
- $Q_{tr,ir}$ dispersioni termiche dovute alla radiazione, calcolate come nella ISO 13790:2008 (kWh)

Le dispersioni termiche attraverso la ventilazione (Equazione 4) sono fissate secondo un tasso di scambio d'aria fissato a 0.3 h-1 per edifici residenziali, coerentemente con le ipotesi del metodo semplificato nella UNI/TS 11300-1.

$$Q_{H,ve} = 6.67 \cdot 10^{-3} \cdot c \rho_{air} n_{ve} V_{heated} (t_{int} - t_{ext}) \cdot \tau [kWh]$$

Equazione 4

dove

$c \rho_{air}$ capacità termica volumetrica dell'aria fissata a 1.2 kJ/(m³K)
 n_{ve} tasso di ricambio d'aria, fissato a 0.3 h⁻¹
 V_{heated} volume riscaldato (m³)
 $T_{int,}$ temperatura della zona interna fissata a 20°C (K)
 T_{ext} temperatura esterna media mensile (K)
 τ estensione del periodo di riscaldamento per ogni mese, in giorni
 $6,67 \cdot 10^{-3}$ fattore di conversione dimensionale.

I guadagni termici interni sono fissati secondo un valore medio (4 W/m²) per la superficie del pavimento riscaldato, compresi i guadagni dovuti agli occupanti e alle attrezzature. Questo valore può essere suddiviso in base alla tipologia dell'edificio: 2.58 W/m² per case monofamiliari o 5.57 W/m² per condomini o case plurifamiliari.

I guadagni solari termici interni sono calcolati facendo riferimento alla superficie media del pavimento per ogni alloggio, secondo la seguente formula (Equazione 5)

$$Q_{int} = \begin{cases} 0.024 \cdot (5.294 - 0.01557 A_f/n_{fs}) A_f \cdot \tau, & \text{when } A_f < 170 \\ 0.024 \cdot 4 A_f \cdot \tau, & \text{when } A_f > 170 \end{cases} [kWh]$$

Equazione 5

dove

A_f superficie netta di pavimento (m²)
 n_{fs} numero di piani
 τ estensione del periodo di riscaldamento per ogni mese, in giorni
 0.024 fattore di conversione dimensionale.

I guadagni termici solari sono calcolati secondo la radiazione solare globale media mensile stagionale e secondo valori fissi come: 0.9 per il fattore di correzione dovuto all'ombra degli oggetti adiacenti; 0.6 per il fattore di assorbimento solare; 0.04 m²K/W di resistenza termica della superficie; 0.2 per il fattore di riduzione dovuto al telaio della finestra. Inoltre, l'area delle pareti, la trasmittanza termica, la trasmittanza dell'energia solare per le superfici opache e vetrate sono calcolate per ogni orientamento.

Infine, il fattore di utilizzo per i guadagni termici ($\eta_{H,g}$) è determinato secondo EN ISO 13790:2008, assumendo $a_{H,0}=1$ e $t_{H,0}=15$ h.

Le efficienze dei sottosistemi (emissione, controllo, distribuzione, produzione) sono definite in base ai tipi di sistemi adottati attraverso i valori precalcolati riportati nella sezione specifica del database.

L'impianto di riscaldamento è simulato con funzionamento continuo, con valore di riferimento a 20 °C per tutta la settimana durante il periodo di riscaldamento, indipendentemente dai periodi di occupazione dell'edificio. La stessa impostazione è fissata per il periodo di raffrescamento, con setpoint pari a 26 °C.

I risultati sono riportati in termini di energia termica utile per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e il raffrescamento ($Q_{C,nd}$) e in termini di energia primaria globale per il riscaldamento ($EP_{,H}$), il raffrescamento ($EP_{,C}$) e per l'acqua calda per uso domestico ($EP_{,w}$) normalizzati sulla superficie del pavimento riscaldato.

5. CASO STUDIO – Quartiere Santa Marta a Venezia

Il caso studio si focalizza sull'analisi del quartiere di Santa Marta a Venezia, in particolare sugli interventi di edilizia popolare a Venezia avviati dallo IACP (Istituto Autonomo Case Popolari, attualmente Azienda Territoriale per l'Edilizia Residenziale ATER) tra il 1914 e il 1936; si tratta di un complesso edilizio residenziale di tipologia a condominio.

L'obiettivo è quello sviluppare un caso studio applicativo per il progetto Annex 75, al fine di validarne la metodologia proposta, di validare il tool di calcolo sviluppato, di utilizzare le tecnologie di district energy, di individuare la strategia di intervento più conveniente attraverso un processo di ottimizzazione delle performance energetiche, del contenimento delle emissioni GHG e dei costi globali da sostenere durante il ciclo di vita utile.

5.1. Prologo

Il quartiere residenziale di Santa Marta a Venezia è stato selezionato in base a due criteri principali: il periodo storico di costruzione e la replicabilità della metodologia di intervento a scala di distretto da proporre a livello nazionale.

Il 26% del patrimonio italiano infatti è stato costruito prima del 1945 [12] e il caso studio è un campione rappresentativo della situazione italiana dei centri storici caratterizzati da edifici residenziali multipiano appartenenti al periodo tra le due guerre mondiali. Inoltre si tratta di edilizia sociale convenzionata costruita da enti statali con simili tipologie costruttive e architettoniche in tutto il territorio nazionale.

5.2. Quadro storico e urbano dell'area di Santa Marta di Venezia

L'area di Santa Marta è situata all'estremità occidentale di Venezia e si presenta come una ramificazione del sestiere di Dorsoduro. Come si osserva dalle mappe dei catasti ottocenteschi, in particolare dalla pianta prospettica del de' Barbari (Figura 24), l'insediamento ha una conformazione naturale di nucleo isolato, completato dalla presenza di orti del complesso monastico di Santa Marta (Figura 25).



Figura 24 – Jacopo de' Barbari (1460/70 – 1516), 1,315 x 2,818 metri sei pannelli, Veduta di Venezia del 1500, Museo Correr, Venezia. Con inquadramento dell'area di Santa Marta.

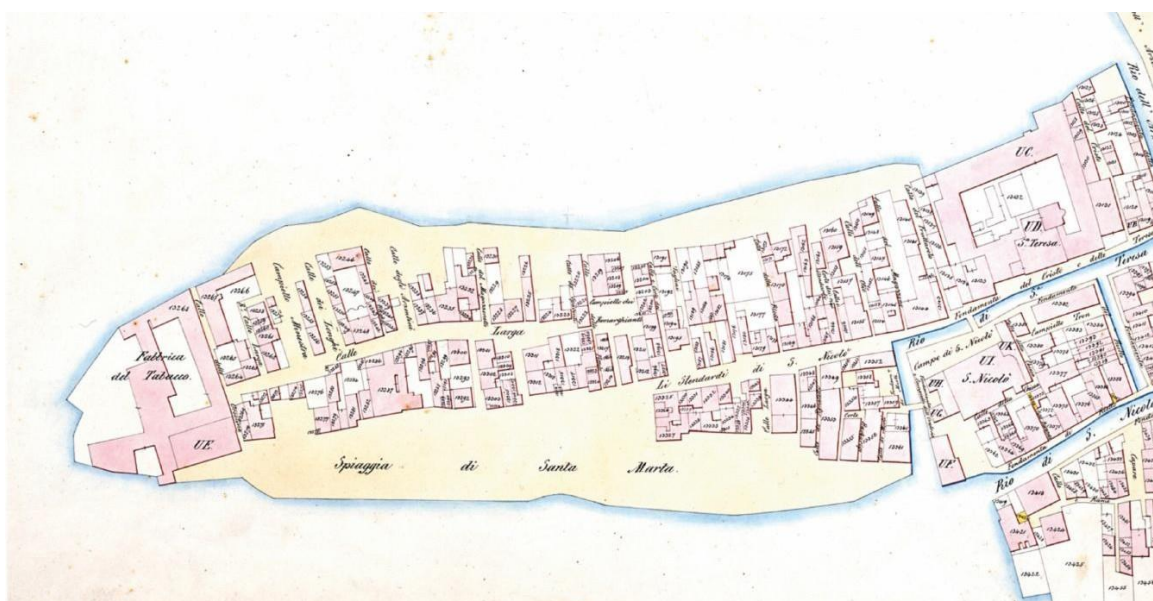


Figura 25 – Catasto Napoleonico 1808-1811, Sestiere Dorsoduro

La conformazione naturale del lembo di terra ne ha dettato l'assetto urbanistico; infatti il quartiere si presenta come una struttura urbana semplice ed ordinata formata da corti e da calli parallele che privilegiano l'affaccio sulle opposte via d'acqua a nord e a sud, abitata nel passato da poveri pescatori.

Dall'analisi cronologica delle mappe e fonti storiche emerge un quadro di profondi cambiamenti subiti tra la fine del 1800 e la prima metà del 1900. Secondo le planimetrie del Catasto Napoleonico, l'area inizialmente manteneva una configurazione di stretta penisola allungata verso ovest, il cui tracciato urbano strutturava i lotti in senso nordovest sudest, mentre lo sviluppo delle calli era parallelo alle due vie d'acqua a Nord e a Sud. Solo successivamente, tra il 1838 e il 1842 nel Catasto Austriaco (Figura 26), compaiono i primi cambiamenti dell'area. Si nota la presenza di una nuova area denominata Campo di Marte separata da Santa Marta dal Rio dei Sechi. Per quanto riguarda invece la struttura urbana non erano state apportate modifiche significative [193].

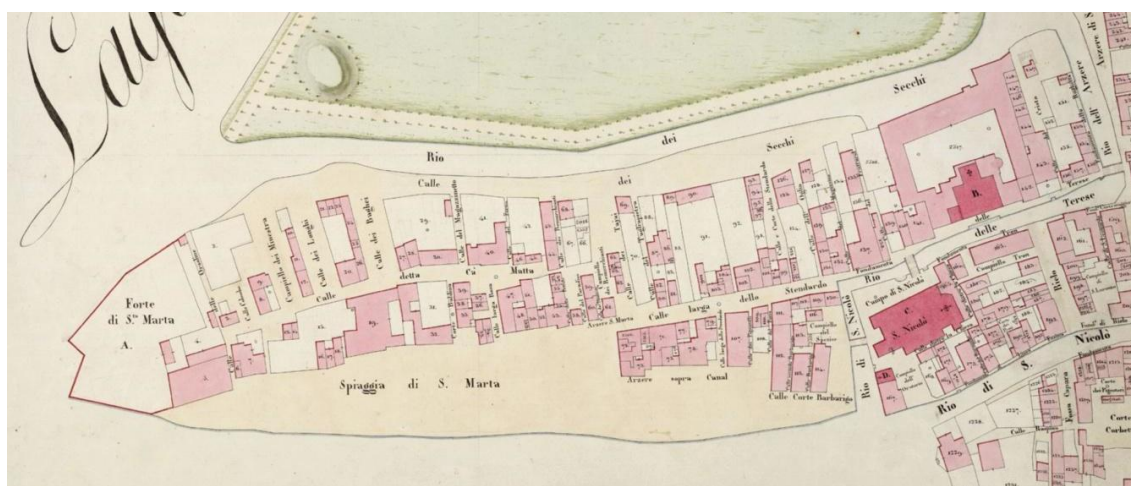


Figura 26 – Catasto Austriaco 1838-1842, Sestiere Dorsoduro

5.3. Trasformazioni dell'assetto urbano e costruzione del Cottonificio 1867- 1913

A fine Ottocento si collocano le prime profonde trasformazioni urbane del quartiere. Il Campo di Marte, grazie all'interramento del Rio dei Sechi, venne collegato a Santa Marta e vennero edificati grandi complessi industriali che cominciarono a sovrapporsi all'edificato esistente, andando ad ampliare le rive verso il canale della Giudecca (Figura 27).



Figura 27 – Catasto Austro-Italiano 1867-1913, Sestiere Dorsoduro

Nacque nel 1883 il Cottonificio allo scopo di esercitare, nel centro storico, la filatura del cotone, della seta e della lana. Il progetto iniziale prevedeva la realizzazione di un complesso che avrebbe occupato parzialmente il Campo di Marte, ma alla fine venne costruito un solo edificio lungo il Rio San Nicolò, che ad oggi, ospita una sede dell'Istituto Universitario di Architettura di Venezia (IUAV).

Ad ovest del volume principale, a inizio Novecento, vengono edificati nuovi edifici con funzione di magazzini a supporto dell'attività del Cottonificio [194]. Di questi alcuni verranno poi demoliti, mentre rimarrà la presenza dell'edificio a pianta rettangolare con coperture a shed, denominato oggi "Cubo", posto a ridosso del perimetro orientale dell'area del Cottonificio stesso. Attualmente il "Cubo" ospita aule e laboratori dell'Università Ca' Foscari, mentre il complesso dell'ex-Cottonificio e parte dei magazzini è stato riconvertito nella sede universitaria dell'Università IUAV di Venezia. La costruzione del Cottonificio necessitava anche di abitazioni per le maestranze e per le loro famiglie; pertanto nel 1920 la Società Cottonificio Veneziano chiese al Comune di Venezia la disponibilità dell'area adiacente alla fabbrica per realizzare il progetto di un quartiere popolare (Figura 28).



Figura 28 – Vista aerea del quartiere di Santa Marta (anni Trenta)

Nel 1921 il Comune di Venezia finanziò il progetto con un mutuo di 8 milioni di lire e nel 1924 lo IACP (Istituto Autonomo Case Popolari) iniziò la costruzione del quartiere in un'area di 20.000 mq dedicando l'opera a Benito Mussolini [195]. Il quartiere venne ultimato nel 1928 con la realizzazione di 14 edifici, per complessivi 148 alloggi destinati alle maestranze.

A questo primo lotto, seguì pochi anni dopo la realizzazione di altri blocchi residenziali costruiti dalla Cooperativa dei Ferrovieri. Un ulteriore ampliamento venne promosso alla fine degli anni Venti: il 16 luglio 1929 la Gazzetta di Venezia annunciava l'offerta allo IACP, da parte della SADE, Società Adriatica Di Elettricità [195], compagnia idroelettrica privata fondata nel 1905 da Giuseppe Volpi, di 3 milioni di lire per la costruzione di nuove case a Santa Marta in cui alloggiare 1.000 persone.

La donazione era stata decisa personalmente da Volpi il presidente della società elettrica. In questa seconda fase vennero costruiti 365 nuovi alloggi, seguendo il progetto di Paolo Bertanza, *"...di schietto sapore veneziano, perché gli ingegneri dell'Istituto fecero ogni sforzo per mantenere popolarissimi, con un'impronta di architettura veneziana, e crearono sottoportici con campielli e movimentarono la rigidezza dei nitidi cubi edilizi"* [196].



(a)



(b)

Figura 29 – L'area portuale di Santa Marta in una foto storica degli anni '60 (a) e come si presenta attualmente (b).

5.4. Gli interventi dello IACP

Quella che oggi si chiama “politica per la casa”, a Venezia ha origini antiche e connotati di “modello”. Si potrebbe risalire addirittura al XIV secolo, quando la Serenissima Repubblica stabiliva di costruire “case per marinai infermi” con risorse dello Stato, delle Scuole (le antiche confraternite o corporazioni di mestiere) e dei privati [197].

A fine dell'Ottocento la solidarietà sociale nel settore dell'abitazione trova espressione concreta nella Commissione per le Case Sane ed Economiche (1893), un ente autonomo costituito da Municipio e Cassa di Risparmio che gestiva i fondi destinati alla costruzione di abitazioni, che diventavano di fatto di proprietà municipale e il cui reddito serviva a finanziare altre costruzioni.

A inizio del Ventesimo secolo la popolazione a basso reddito viveva in condizioni precarie e il Governo Italiano intervenne con l'adozione della “Legge Luzzatti” (Legge n. 251 del 31 maggio 1903) [198] che istituiva l'Istituto Case Popolari (ICP), affinché provvedesse a fornire alloggi a basso costo che rispettassero le ultime norme igieniche e sanitarie.

Il Comune di Venezia incaricò la Commissione di studiarne le modalità istituzionali e operative e, il 14 giugno 1913, ne approvò la costituzione e lo statuto. Dopo qualche mese, l'8 febbraio 1914, il Re d'Italia firmò il Regio Decreto che istituiva l'Istituto Autonomo per le Case Popolari di Venezia (IACP), sostituendo le attività della Commissione Case Sane ed Economiche per risolvere le condizioni di estremo degrado e sovraffollamento del patrimonio residenziale presente nel centro storico. L'istituzione cambiò nome nel corso degli anni fino agli anni Novanta, attualmente è costituito come Azienda Territoriale per l'Edilizia Residenziale (ATER) [199].

All'Istituto vennero conferite alcune aree fabbricabili e 686 alloggi costruiti dalla Commissione nel centro storico di Venezia, a Castello (Sant'Anna, Quintavalle, Corte Colonne), a Cannaregio (San Giobbe, San Leonardo, Gesuiti), a Dorsoduro (San Rocco dove, alla Domus Civica, era stato installato il primo impianto di riscaldamento centralizzato a termosifoni). Alla fine della guerra sorsero al Lido i 221 alloggi di Città Giardino, con una tipologia di progettazione urbanistica che teneva conto delle tendenze allora in auge, mentre con criteri più tradizionali si costruì a Sant'Agnese, nel Campo di Marte alla Giudecca, alla Madonna dell'Orto. Ancora a Venezia, dal 1926 al 1940, l'Istituto – in quel tempo denominato Istituto Fascista Autonomo Case Popolari – costruì case a Santa Marta (il “Quartiere Benito Mussolini”, con 393 alloggi su di un'area di 22.000 metri quadrati), a Sacca San Girolamo (244 alloggi), alla Celestia (161 alloggi) e a Sant'Elena (il “Quartiere Vittorio Emanuele III”, con 283 alloggi) [200,201].

Subito dopo le guerre mondiali, la mancanza di unità abitative dovuta alla distruzione e all'immigrazione di persone dalle campagne verso le città industriali portò alla necessità di un'enorme capacità abitativa in breve tempo. Pertanto, diverse tipologie architettoniche appartenenti a quel periodo storico furono poi replicate in tutta la città e nell'intera nazione. L'istituto che si è occupato fin dall'inizio della costruzione e della gestione di questi complessi, l'ICP Istituto Case Popolari, era un ente nazionale diffuso in tutte le maggiori città italiane. Per questo motivo, l'alta replicabilità di questo caso studio può avere valenza nazionale per il retrofit dei quartieri di edilizia sociale [201].

5.5. Il quartiere Santa Marta

In generale nel centro storico di Venezia tra il 1910 e il 1950 sono stati costruiti diversi blocchi residenziali di edilizia popolare, in totale circa 3000 alloggi distribuiti nei vari Sestrieri (Figura 30).



Figura 30 – La figura mostra la mappa del centro storico di Venezia in cui sono evidenziati in verde gli edifici popolari per famiglie a basso reddito all'interno dei Sestrieri.

Il quartiere Santa Marta - nome completo "Case IACP Santa Marta" - si trova nella parte ovest di Venezia, nel sestriere Dorsoduro (Figura 31)



Figura 31 – Vista satellitare e visualizzazione 3D del quartiere di Santa Marta a Venezia

Fu costruito a partire dal 1920 quando l'amministrazione comunale iniziò la costruzione di 14 edifici per un numero di appartamenti attorno alle 150 unità per persone a basso reddito e per i lavoratori del vicino cotonificio. Nel 1930 il quartiere fu ampliato con un secondo intervento per costruire 365 nuovi appartamenti distribuiti in 21 edifici Elettricità [195]. Anche se la forma è irregolare, la dimensione del quartiere è di circa 400 m per 150 m, per un'area di circa 0,05 km². Il quartiere è composto principalmente da edifici plurifamiliari a più piani, e solo quattro edifici possono essere classificati come a uso misto per la presenza di spazi commerciali o ristoranti al piano terra.

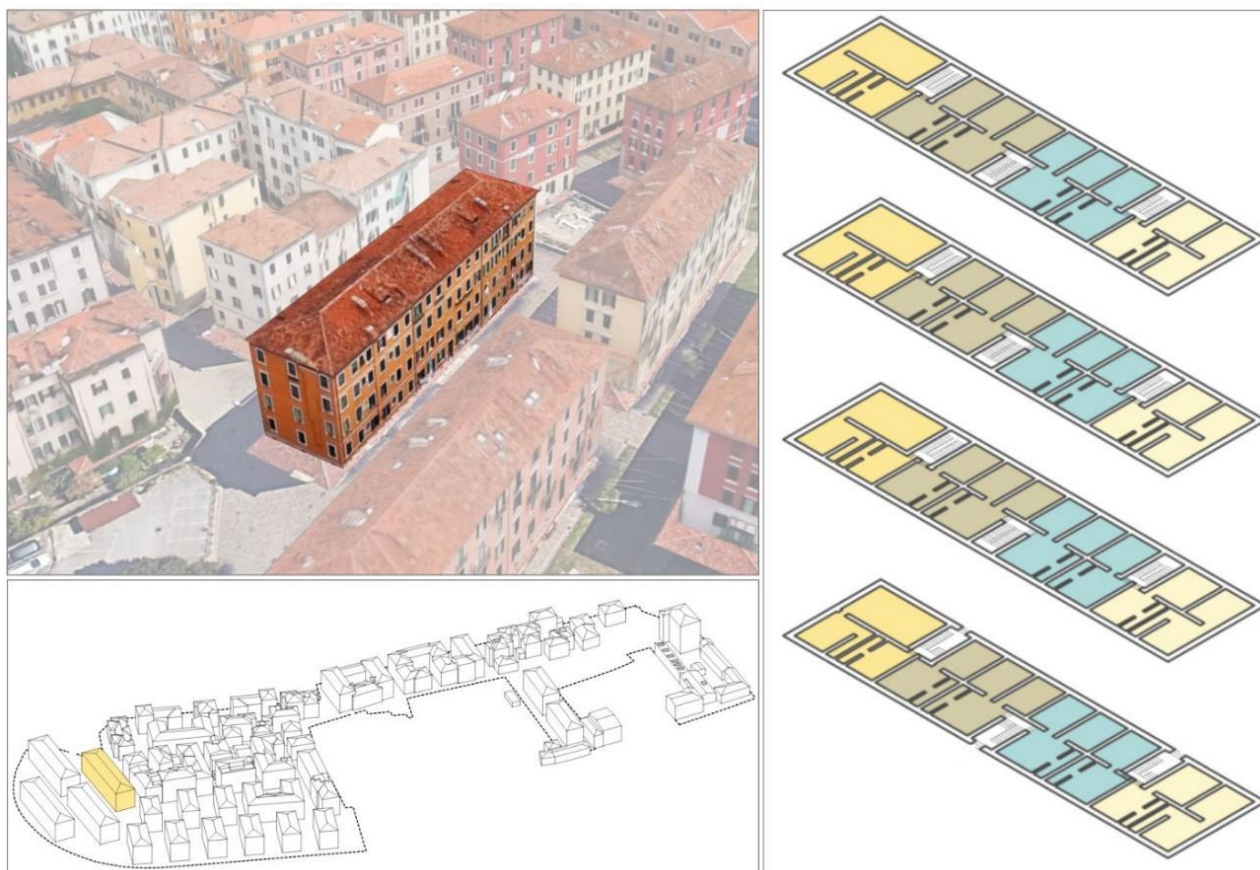


Figura 32 – Edificio rappresentativo del primo gruppo costruito tra il 1920 e il 1928, con una forma rettangolare regolare. Vista aerea da Google Earth, mappa 3D e planimetrie [202].

A seconda del periodo di costruzione, gli edifici possono essere divisi in due gruppi che differiscono nella geometria dell'edificio. Il primo gruppo (Figura 32) di case plurifamiliari è stato costruito tra il 1920 e il 1928 e ha un'impronta rettangolare regolare con una dimensione costante sul lato corto di 12,5 m, mentre la lunghezza del lato lungo varia tra i diversi edifici con valori compresi tra 20 e 50 metri. Tutti gli edifici di questo gruppo hanno 4 piani e un numero di appartamenti per piano che varia tra 2 e 6 a seconda delle dimensioni dell'edificio.

Il secondo gruppo (Figura 33) fu costruito tra il 1930 e il 1936. Le geometrie sono più complesse e variabili ma riconducibili alla tipologia dell'edificio a cortile o a forma di "C", con impronta a terra (footprint) variabile da 150 a 1500 m². Non c'è corrispondenza nemmeno per quanto riguarda il numero di piani per edificio: edifici a 2 piani si fondono con edifici fino a 5 piani. Queste differenze si riflettono anche nel numero di appartamenti che vanno da edifici con una sola unità abitativa per piano a edifici con ben 15 unità per piano.



Figura 33 – Edificio rappresentativo del secondo gruppo costruito tra il 1930 e il 1936, di forma irregolare, costruito intorno a un cortile centrale, simile a una "C". Vista aerea da Google Earth, mappa 3D e planimetrie [202].

Le case considerate nel caso studio sono state costruite per porre fine alle precarie condizioni di vita delle classi meno abbienti, quindi dovevano essere a basso costo, ma dovevano essere conformi alle ultime norme igieniche e sanitarie. Per questo motivo, le costruzioni dovevano essere semplici e facili da realizzare.

Le tecnologie costruttive utilizzate per l'involucro dell'edificio sono state le stesse nelle due fasi: edifici con muratura piena a due teste e intonacata, copertura lignea, solai in latero-cemento, serramenti con telaio ligneo e vetro singolo. Per la descrizione completa si rinvia ai capitoli successivi.

La dotazione impiantistica dei fabbricati è standard e ha subito diversi aggiornamenti pur rimanendo fedele alla originale rete di approvvigionamento.

Il riscaldamento è fornito agli appartamenti da una caldaia a gas centralizzata installata in ogni edificio, anche se si è constatato che in alcuni condomini si trova un impianto singolo per ciascun appartamento (e in questo caso il generatore è disposto sia per riscaldamento che ACS).

I sistemi di raffreddamento non erano previsti al momento della costruzione e non sono attualmente presenti nella maggior parte degli edifici. In alcuni casi, un semplice condizionatore monosplit o multisplit per un solo appartamento è stato installato privatamente nel corso degli anni dagli utenti (proprietari o inquilini).

L'acqua calda sanitaria (ACS) è fornita da uno scaldabagno elettrico installato in ogni appartamento che, nel caso di riscaldamento con impianto condominiale, funziona solo nel periodo estivo.

Per quanto riguarda il riscaldamento l'efficienza complessiva utilizzata per definire le caratteristiche della caldaia considera le efficienze di generazione, distribuzione, emissione e regolazione, a condizione che le tubature non siano comunemente isolate a causa dell'età della costruzione, e che il calore sia emesso principalmente da radiatori in ghisa. L'efficienza complessiva di questo tipo di sistema è dell'80%.

5.6. Le caratteristiche architettoniche, geometriche e termofisiche nello stato attuale

Ai fini dell'applicazione della metodologia sul caso studio, sono state effettuate operazioni di rilievo e di analisi del quartiere Santa Marta in modo tale da ottenere un database delle caratteristiche architettoniche, geometriche e termofisiche degli edifici.

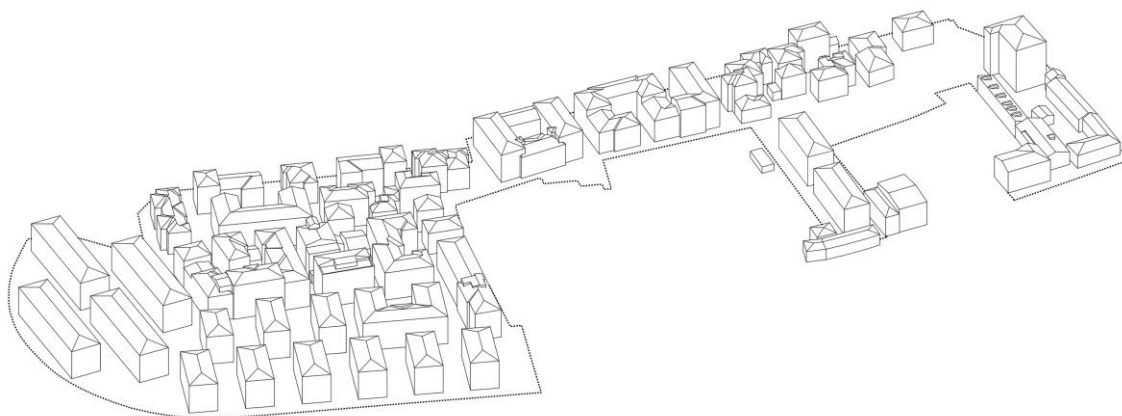


Figura 34 – Vista assometrica del quartiere Santa Marta

Innanzitutto i fabbricati del quartiere sono stati classificati con codice alfanumerico secondo il relativo codice catastale, ovvero il numero di mappale, in modo da rendere univoca l'identificazione; nel caso di edifici geometricamente complessi e/o costituiti da diverse unità condominiali, è stata effettuata una ripartizione del volume ed è stato aggiunto un pedice al mappale (es. 3210a, 32210b, 3210c).

Come già descritto in precedenza, la geometria degli edifici viene ricondotta a semplici volumi che discretizzano le dimensioni degli immobili esistenti (Figura 34). Per fare questo è necessaria un'approfondita analisi sulle tipologie architettoniche e sulle complessità secondo cui si sviluppa il quartiere. Infatti non tutti gli edifici presentano volumetrie regolari in altezza e pianta, in alcuni casi si riscontrano differenze di piani nello sviluppo in altezza, oppure edifici costituiti da corpi di fabbrica diversi tra loro.

La classificazione dei volumi viene quindi dettagliata non solo per particella catastale, ma anche per altezza, per questo alcuni edifici sono classificati secondo il codice catastale seguito da una lettera che ne indica le differenti porzioni (Figura 35). In totale vengono considerati 52 volumi.



Figura 35 – Planimetria catastale in cui sono individuati e codificati gli edifici del quartiere secondo numero di mappale.

Dopo la classificazione e suddivisione dei volumi è stata effettuata un'analisi dei vincoli geometrici degli edifici.

Innanzitutto, la suddivisione degli edifici in base ai diversi corpi di fabbrica ha generato delle superfici che corrispondono alle pareti contigue e comuni ai vari corpi di fabbrica: in sintesi sono state quindi generate delle superfici adiabatiche che non vengono considerate nel calcolo delle dispersioni termiche per il calcolo del fabbisogno energetico in quanto corrisponde a pareti che separano due ambienti riscaldati.

Per quanto riguarda le coperture degli edifici e la definizione degli ambienti posti all'ultimo piano dei fabbricati, non è stato possibile effettuare un sopralluogo o avere dati certi dell'utilizzo dei sottotetti: si è ipotizzato quindi il sottotetto come locale abitati e pertanto ambiente climatizzato. Di conseguenza si è stabilito che i volumi siano delimitati nella parte superiore da un solaio orizzontale che presenta le caratteristiche costruttive della copertura inclinata. Si tratta di una semplificazione che sicuramente comporta un aumento del volume totale climatizzato del quartiere e un aumento delle dispersioni termiche dell'involucro edilizio, tuttavia rappresenta lo scenario peggiore in cui valutare le ipotesi di intervento e di fatto la superficie di copertura rappresenta solo una parte minore dell'involucro disperdente, come meglio descritto successivamente.

Infine si considera il basamento degli edifici, che a Venezia confina termicamente con il terreno non essendo presenti piani interrati. Tuttavia, considerando la storia costruttiva del quartiere, alcuni edifici infatti presentano vani non riscaldati che separano il primo piano abitato dal terreno e questi sono principalmente gli edifici della ferrovia di ultima costruzione. L'esistenza di questi vani è visibile dalla presenza di aperture di piccole dimensioni schermate da inferriate alla base dell'edificio. Anche in questo caso il fabbisogno è determinato dal volume climatizzato e pertanto la presenza dei vani a magazzino, intesi come ambienti non climatizzati, viene scomputata dal totale e non considerata.

5.6.1. Definizione delle geometrie degli edifici

In relazione a quanto detto in precedenza per raccogliere le dimensioni necessarie a proporzionare il quartiere, ci si basa sui dati forniti dal GeoPortale Regionale, attraverso il Catalogo dei Dati Territoriali. Tale strumento consente di ricercare, consultare, scaricare i dati e i servizi territoriali messi a disposizione dalla Regione Veneto nella carta tecnica regionale, in formato CAD .dwg e in formato GIS .shp.

Si evince che i dati raccolti non siano sufficienti a poter descrivere tutte le caratteristiche geometriche descritte in precedenza. Per esempio l'altezza dei vani non climatizzati alla base degli edifici è una misura assente nelle cartografie. Oltre a questo la documentazione ufficiale risente anche di inesattezze per quanto riguarda l'altezza totale degli edifici, che nel file .dwg risulta differente per ogni vertice dell'edificio preso in considerazione e nel file .shp non viene citata. Risultano invece attendibili la superficie dell'impronta a terra e il perimetro in pianta.

Anche per queste complicazioni è stato necessario svolgere un sopralluogo nel sito riportando le misure di altezza reale e l'altezza dei vani non climatizzati (Tabella 5).

Tabella 5 – Dimensioni dei volumi del quartiere.

| Particella Catastale [-] | Piani [-] | Superficie [m ²] | Altezza [m] | Altezza Magazzino non climatizzato [m] | Perimetro [m] | | |
|--------------------------------|--------------|---------------------------------|----------------|--|------------------|-------|--------|
| | | | | | h max | h min | TOTALE |
| 19 | 4 | 199.90 | 14.15 | | 58.62 | | |
| 20 | 4 | 575.08 | 13.87 | 0.90 | 118.54 | | |
| 32 | 4 | 246.88 | 14.24 | 0.80 | 67.50 | | |
| 35 | 4 | 237.71 | 14.21 | 0.80 | 66.49 | | |
| 40 | 1 | 166.93 | 3.73 | | 58.74 | | |
| 42 | 3 | 554.30 | 10.18 | | 142.48 | | |
| 58 | 4 | 566.57 | 13.26 | | 126.95 | | |
| 68 | 3 | 169.31 | 10.36 | | 61.04 | | |
| 137 | 2 | 274.95 | 6.50 | | 88.91 | | |
| 2619 | 5 | 289.65 | 13.06 | | 74.05 | | |
| 2720 | 4 | 273.98 | 9.90 | | 69.26 | 59.93 | 9.33 |
| 2841 | 4 | 571.94 | 14.62 | 0.90 | 115.69 | | |
| 2842 | 4 | 610.97 | 14.48 | 0.90 | 122.12 | | |
| 2843 | 4 | 568.16 | 14.50 | 0.90 | 115.28 | | |
| 2844 | 4 | 271.16 | 14.52 | 0.90 | 70.31 | | |
| 2845 | 4 | 271.59 | 14.46 | 0.90 | 70.31 | | |
| 2846 | 4 | 279.86 | 14.56 | 0.90 | 71.22 | | |
| 2847 | 4 | 266.76 | 14.46 | 0.90 | 69.74 | | |
| 2848 | 4 | 272.40 | 14.52 | 0.90 | 70.44 | | |
| 2849 | 4 | 273.53 | 14.53 | 0.90 | 70.53 | | |
| 2862 | 3 | 312.03 | 12.13 | | 92.34 | | |
| 3147 | 3 | 273.24 | 11.47 | | 74.85 | | |
| 3148 | 2 | 129.60 | 7.50 | | 46.00 | | |
| 3151 | 5 | 286.27 | 17.48 | | 82.27 | | |
| 3152 | 3 | 168.07 | 11.42 | | 57.64 | | |
| 3153 | 4 | 275.71 | 14.69 | | 76.23 | | |
| 3155 | 4 | 577.21 | 14.68 | | 130.32 | | |
| 3160 | 4 | 198.47 | 13.98 | | 74.67 | | |
| 3163 | 3 | 193.41 | 10.73 | | 68.24 | | |
| 3314 | 4 | 668.18 | 14.00 | | 153.98 | | |
| 3940 | 4 | 327.52 | 14.98 | | 82.45 | | |
| 4105 | 4 | 317.89 | 11.59 | | 79.74 | | |

| Particella Catastale [-] | Piani [-] | Superficie [m ²] | Altezza [m] | Altezza Magazzino non climatizzato [m] | Perimetro [m] | | |
|--------------------------------|--------------|---------------------------------|----------------|--|------------------|-------|------------|
| | | | | | h max | h min | TOTALE |
| 2809a | 3 | 152.30 | 9.94 | | 57.58 | | |
| 2809b | 4 | 287.32 | 12.90 | | 78.68 | 58.04 | 20.64 |
| 2809c | 3 | 145.73 | 9.94 | | 60.12 | | |
| 2809d | 4 | 265.16 | 12.90 | | 73.55 | 53.79 | 19.75 |
| 30a | 4 | 341.42 | 14.80 | 1.30 | 106.77 | | |
| 30b | 5 | 273.03 | 18.07 | 1.30 | 77.04 | 45.75 | 31.28 |
| 30c | 4 | 642.65 | 14.80 | 1.30 | 148.51 | | |
| 3154a | 4 | 158.66 | 14.14 | | 54.84 | 45.62 | 9.22 |
| 3154b | 3 | 115.57 | 10.70 | | 46.61 | | |
| 3156a | 4 | 288.53 | 14.26 | | 81.20 | 75.05 | 6.15 |
| 3156b | 3 | 150.67 | 11.48 | | 61.34 | | |
| 3156c | 5 | 235.95 | 17.20 | | 73.91 | 62.77 | 11.14 |
| 3159a | 3 | 82.44 | 11.12 | | 37.87 | | |
| 3159b | 5 | 107.65 | 17.30 | | 43.87 | 25.65 | 18.14 |
| 3161a | 3 | 91.07 | 10.63 | | 41.54 | | |
| 3161b | 4 | 111.20 | 13.98 | | 46.10 | 21.78 | 9.58 |
| 3162a | 4 | 126.58 | 13.98 | | 52.33 | 38.76 | 4.61 |
| 3162b | 2 | 20.84 | 6.95 | | | | |
| 3210a | 3 | 192.35 | 9.77 | | 60.95 | | |
| 3210b | 4 | 391.71 | 12.85 | | 103.60 | 83.29 | 20.30 |
| 3210c | 3 | 140.48 | 9.77 | | 50.48 | | |
| 3210d | 4 | 382.05 | 12.85 | | 100.41 | 90.91 | 9.50 |
| Totale | | 15,373 | | | | | 571 |

Si precisa che in Tabella 5 il valore del perimetro degli edifici con superfici contigue viene riportato in funzione delle misure dell'altezza. Questi dati ci sono utili per capire qual è la superficie delle pareti che dividono l'interno dall'esterno senza considerare le pareti adiabatiche. Tale distinzione di perimetro è stata fatta solo per gli edifici che presentano l'altezza maggiore rispetto ai volumi contigui: l'operazione effettuata calcola la superficie complessiva delle pareti e poi si sottrae la superficie ottenuta moltiplicando il perimetro con altezza minore per l'altezza dell'edificio contiguo.

La superficie vetrata viene elaborata considerando un valore medio pari a 16.14% (valore arrotondato a 15% secondo le disposizioni di input nel modello di CEA) di involucro trasparente in rapporto alla superficie totale delle pareti. Tale valore deriva dall'analisi di 13 edifici tipo, dei quali sono state rilevate le dimensioni delle aperture ed è stato conteggiato il numero di infissi durante il sopralluogo.

Elaborando tutti i dati si ottengono quindi i valori riportati in Tabella 6:

Tabella 6 – Valori dimensionali elaborati dai dati rilevati

| Particella Catastale [-] | Volume V [m ³] | Superficie Utile Af [m ²] | Sup. Pareti Ap [m ²] | Sup. Finestre Aw [-] | Sup. Basamento Ag [m ²] | Sup. Copertura Ar [m ²] | Rapporto di Forma S/V [-] |
|--------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------------|----------------------------|---|---|---------------------------------|
| 19 | 2,829.43 | 707.42 | 697.59 | 123.10 | 176.85 | 199.96 | 0.25 |
| 20 | 7,978.86 | 2,035.15 | 1,309.83 | 231.15 | 508.79 | 575.26 | 0.26 |
| 32 | 3,516.57 | 873.66 | 745.88 | 131.63 | 218.41 | 246.95 | 0.25 |
| 35 | 3,378.85 | 841.22 | 734.74 | 129.66 | 210.30 | 237.78 | 0.25 |
| 40 | 616.08 | 146.08 | 157.12 | 27.73 | 146.08 | 165.17 | 0.24 |
| 42 | 5,585.66 | 1,455.87 | 1,168.05 | 206.13 | 485.29 | 548.69 | 0.26 |
| 58 | 7,431.43 | 1,982.72 | 1,382.86 | 244.03 | 495.68 | 560.44 | 0.27 |
| 68 | 1,658.22 | 424.70 | 484.02 | 85.42 | 141.57 | 160.06 | 0.26 |

| <i>Particella Catastale</i> [-] | <i>Volume</i> <i>V [m³]</i> | <i>Superficie Utile</i> <i>Af [m²]</i> | <i>Sup. Pareti</i> <i>Ap [m²]</i> | <i>Sup. Finestre</i> <i>Aw [-]</i> | <i>Sup. Basamento</i> <i>Ag [m²]</i> | <i>Sup. Copertura</i> <i>Ar [m²]</i> | <i>Rapporto di Forma</i> <i>S/V [-]</i> |
|--|--------------------------------|---|--------------------------------------|---|---|---|--|
| 137 | 1,606.61 | 437.22 | 452.44 | 79.84 | 218.61 | 247.17 | 0.27 |
| 2619 | 3,775.25 | 1,278.34 | 818.26 | 144.40 | 255.67 | 289.07 | 0.34 |
| 2720 | 2,683.89 | 959.10 | 584.49 | 103.14 | 239.77 | 271.10 | 0.36 |
| 2841 | 8,364.39 | 2,024.05 | 1,376.68 | 242.94 | 506.01 | 572.12 | 0.24 |
| 2842 | 8,849.31 | 2,162.09 | 1,453.22 | 256.45 | 540.52 | 611.14 | 0.24 |
| 2843 | 8,240.93 | 2,010.67 | 1,371.78 | 242.08 | 502.67 | 568.34 | 0.24 |
| 2844 | 3,938.55 | 959.63 | 836.71 | 147.65 | 239.91 | 271.25 | 0.24 |
| 2845 | 3,928.49 | 961.15 | 836.71 | 147.66 | 240.29 | 271.68 | 0.24 |
| 2846 | 4,075.93 | 990.37 | 847.54 | 149.57 | 247.59 | 279.94 | 0.24 |
| 2847 | 3,858.65 | 944.06 | 829.92 | 146.46 | 236.02 | 266.85 | 0.24 |
| 2848 | 3,956.55 | 964.02 | 838.25 | 147.93 | 241.00 | 272.49 | 0.24 |
| 2849 | 3,975.70 | 968.01 | 839.32 | 148.11 | 242.00 | 273.62 | 0.24 |
| 2862 | 3,854.43 | 843.13 | 864.42 | 152.55 | 281.04 | 317.76 | 0.22 |
| 3147 | 3,121.79 | 722.16 | 668.81 | 118.02 | 240.72 | 272.17 | 0.23 |
| 3148 | 972.30 | 229.32 | 312.78 | 55.20 | 114.66 | 129.64 | 0.24 |
| 3151 | 5,127.58 | 1,297.22 | 1,161.72 | 205.01 | 259.44 | 293.34 | 0.25 |
| 3152 | 1,857.58 | 431.59 | 485.66 | 85.71 | 143.86 | 162.66 | 0.23 |
| 3153 | 4,164.76 | 1,003.00 | 948.59 | 167.40 | 250.75 | 283.51 | 0.24 |
| 3155 | 8,476.09 | 2,042.69 | 1,661.57 | 293.22 | 510.67 | 577.39 | 0.24 |
| 3160 | 2,826.62 | 715.31 | 825.86 | 145.74 | 178.83 | 202.19 | 0.25 |
| 3163 | 2,044.71 | 505.62 | 620.23 | 109.45 | 168.54 | 190.56 | 0.25 |
| 3314 | 9,274.16 | 2,343.58 | 1,745.87 | 308.09 | 585.90 | 662.44 | 0.25 |
| 3940 | 4,907.75 | 1,159.05 | 840.99 | 148.41 | 289.76 | 327.62 | 0.24 |
| 4105 | 3,700.46 | 1,129.55 | 1,016.62 | 179.40 | 282.39 | 319.28 | 0.31 |
| 2809a | 1,603.32 | 427.99 | 300.02 | 52.94 | 142.66 | 161.30 | 0.27 |
| 2809b | 3,613.29 | 990.94 | 829.69 | 146.42 | 247.73 | 280.10 | 0.27 |
| 2809c | 1,504.02 | 401.48 | 443.40 | 78.25 | 133.83 | 151.31 | 0.27 |
| 2809d | 3,368.19 | 923.72 | 784.30 | 138.41 | 230.93 | 261.10 | 0.27 |
| 30a | 5,139.89 | 1,228.64 | 1,043.71 | 184.18 | 307.16 | 347.29 | 0.24 |
| 30b | 4,378.18 | 1,071.47 | 939.02 | 165.71 | 214.29 | 242.29 | 0.24 |
| 30c | 9,104.96 | 2,176.45 | 1,593.84 | 281.27 | 544.11 | 615.20 | 0.24 |
| 3154a | 2,114.78 | 529.11 | 603.98 | 106.58 | 132.28 | 149.56 | 0.25 |
| 3154b | 1,302.30 | 322.94 | 411.59 | 72.63 | 107.65 | 121.71 | 0.25 |
| 3156a | 4,166.91 | 1,033.78 | 944.87 | 166.74 | 258.45 | 292.21 | 0.25 |
| 3156b | 1,628.32 | 376.35 | 528.90 | 93.33 | 125.45 | 141.84 | 0.23 |
| 3156c | 4,028.41 | 1,035.74 | 1,045.97 | 184.58 | 207.15 | 234.21 | 0.26 |
| 3159a | 902.83 | 215.43 | 350.85 | 61.91 | 71.81 | 81.19 | 0.24 |
| 3159b | 1,812.00 | 463.19 | 463.74 | 81.84 | 92.64 | 104.74 | 0.26 |
| 3161a | 956.17 | 238.67 | 251.40 | 44.37 | 79.56 | 89.95 | 0.25 |
| 3161b | 1,528.57 | 386.82 | 359.66 | 63.47 | 96.71 | 109.34 | 0.25 |
| 3162a | 1,797.83 | 454.96 | 447.30 | 78.93 | 113.74 | 128.60 | 0.25 |
| 3162b | 145.95 | 36.88 | 81.23 | 14.33 | 18.44 | 20.85 | 0.25 |
| 3210a | 1,853.08 | 503.26 | 421.17 | 74.32 | 167.75 | 189.67 | 0.27 |
| 3210b | 4,747.82 | 1,307.15 | 953.85 | 168.33 | 326.79 | 369.48 | 0.28 |
| 3210c | 1,386.27 | 376.48 | 324.01 | 57.18 | 125.49 | 141.89 | 0.27 |
| 3210d | 4,880.43 | 1,343.66 | 1,099.27 | 193.99 | 335.91 | 379.80 | 0.28 |
| Totale | 202,541.11 | 51,392.86 | 43,140.29 | 7,612.99 | 13,480.14 | 15,241.27 | |

5.6.2. Definizione delle tecnologie

Per poter fare corrette analisi termiche e diagnosi energetiche del quartiere Santa Marta a Venezia è necessario studiare i singoli edifici, sia dal punto di vista dimensionale che tecnologico (Figura 36).

Come anticipato le tecnologie costruttive utilizzate per l'involucro dell'edificio sono semplici e sono rimaste inalterate nel tempo, ad eccezione dei serramenti che sono stati sostituiti localmente o comunque a livello di unità abitativa.



Figura 36 – Vista fotografica di un edificio del quartiere durante il sopralluogo.

Le pareti esterne sono in muratura di mattoni pieni, senza alcun tipo di isolamento, e intonaco sia sul lato interno che su quello esterno. Il piano terra consiste in una lastra di cemento non isolata posata su una fondazione con piastrelle sulla superficie interna. Un tetto inclinato in legno senza isolamento e con tegole in cotto copre l'edificio. Alcune differenze si trovano nell'involucro trasparente: le finestre a doppio vetro con telaio in legno hanno sostituito alcuni sistemi a vetro singolo con telaio in legno, a seconda della volontà dei proprietari di rinnovare l'unità abitativa.

I parametri qualitativi delle abitazioni sono stati determinati attraverso verifiche e rilievo in loco e successivamente confrontati con le fonti normative, in particolare alla UNI/TR 11552 [203] per ricavare i dati tecnici riferiti al periodo di costruzione degli edifici datati tra il 1920 e il 1930.

Pareti

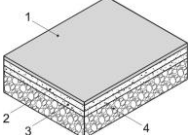
Tabella 7 – Stratigrafia chiusura verticale - parete perimetrale.

| Chiusura Verticale - Parete Perimetrale - MLP01 - Muratura in Mattoni Pieni | | | | | | | | |
|---|----|---------------------------------|----------|----------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | n° | Strato | Spessore | Densità | Calore Specifico | Conduktività Termica | Resistenza Termica | Trasmittanza Termica |
| | | | d | ρ | c | λ | R | U |
| | | | [mm] | [kg/m ³] | [J/(kg K)] | [W/m K] | [m ² K/W] | [W/m ² K] |
| | | Resistenza superficiale interna | | | | | 0,13 | |
| | 1 | Intonaco interno | 15 | 1400 | 1000 | 0,70 | 0,03 | 35,000 |
| | 2 | Mattoni pieni | 250 | 1800 | 1000 | 0,72 | 0,35 | 2,880 |
| | 3 | Intonaco esterno | 20 | 1400 | 1000 | 0,90 | 0,02 | 45,000 |
| | | Resistenza superficiale esterna | | | | | | 0,04 |
| Trasmittanza U Totale | | | | | | | 1,351 | |

La datazione del quartiere di Santa Marta permette di constatare che le pareti perimetrali degli edifici sono costruite con mattoni pieni e rivestite sia internamente che esternamente con intonaco. Precisamente, da dati di rilievo, le pareti sono composte da mattoni pieni disposti a due teste per uno spessore totale di 25 cm a cui si aggiungono 2 cm per lato di intonaco (Tabella 7).

Basamento

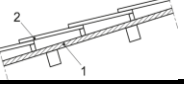
Tabella 8 – Stratigrafia chiusura orizzontale - solaio a terra.

| Chiusura Orizzontale - Solaio a terra - SOL08 - Solaio contro-terra in calcestruzzo | | | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------------------------------|----------|----------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | n° | Strato | Spessore | Densità | Calore Specifico | Conduktività Termica | Resistenza Termica | Trasmittanza Termica |
| | | | d | ρ | c | λ | R | U |
| | | | [mm] | [kg/m ³] | [J/(kg K)] | [W/m K] | [m ² K/W] | [W/m ² K] |
|  | Resistenza superficiale interna | | | | | | 0,13 | |
| | 1 | Pavimentazione interna - Gres | 15 | 1700 | 1000 | 1,47 | 0,01 | 98,000 |
| | 2 | Malta di cemento | 30 | 2000 | 1000 | 1,40 | 0,02 | 46,667 |
| | 3 | Calcestruzzo alleggerito | 100 | 1200 | 1000 | 0,33 | 0,30 | 3,300 |
| | 4 | Ghiaione – ciottoli di fiume | 200 | 1700 | 1000 | 1,20 | 0,17 | 6,000 |
| Resistenza superficiale esterna | | | | | | | 0,04 | |
| Trasmittanza U Totale | | | | | | | 1,410 | |

Sebbene, come già detto in precedenza, non tutti gli edifici presentino vani riscaldati a contatto con il suolo, viene considerato omogeneamente per tutto il quartiere, un solaio contro terra composto da una pavimentazione in gres posta su un massetto in calcestruzzo alleggerito (Tabella 8).

Copertura

Tabella 9 – Stratigrafia chiusura superiore – copertura.

| Chiusura Superiore - Copertura - CIN05 - Copertura inclinata in legno | | | | | | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------|----------|----------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | n° | Strato | Spessore | Densità | Calore Specifico | Conduktività Termica | Resistenza Termica | Trasmittanza Termica |
| | | | d | ρ | c | λ | R | U |
| | | | [mm] | [kg/m ³] | [J/(kg K)] | [W/m K] | [m ² K/W] | [W/m ² K] |
|  | Resistenza superficiale interna | | | | | | 0,13 | |
| | 1 | Assito in legno | 30 | 550 | 1600 | 0,15 | 0,20 | 5,000 |
| | 2 | Tegole / coppi in laterizio | | | | | | |
| | Resistenza superficiale esterna | | | | | | | 0,04 |
| Trasmittanza U Totale | | | | | | | 2,500 | |

La copertura inclinata, realizzata con un assito in legno e da semplici coppi in laterizio, ha spessore totale di circa 3 cm e costituisce l'unica soluzione tecnologica dei fabbricati (Tabella 9).

La copertura lignea è costituita da elementi lignei chiamati terzere o semplicemente travi, poggianti sui muri interni ortogonali a quelli perimetrali e disposte parallele alla linea di gronda. Sopra l'orditura principale sono collocati un'orditura secondaria costituita da travicelli o correnti, l'impalcato, in legno o laterizio e infine il manto di copertura.

La zona interna alla muratura è poi maggiormente soggetta a degrado da agenti fungini xilofagi. Infine la rottura a taglio, essendo di tipo fragile, è più temibile rispetto alle altre. Per questi motivi, spesso è presente una staffatura metallica di presidio in grado di impedire eventuali movimenti tra le due aste, qualora ce ne fosse necessità.

Finestre

I serramenti presenti sugli edifici sono in legno con vetro singolo, tipica scelta tecnologica degli anni Settanta. Il legno è infatti il materiale tradizionalmente più usato per la produzione di serramenti. È caratterizzato da un basso coefficiente di trasmittanza termica pari a 5.8 W/m²K, da un aspetto gradevole, dall'attitudine ad essere lavorato e dal soddisfacente comportamento in esercizio. I serramenti analizzati nel quartiere sono risultati, nella maggior parte, in pessime condizioni dovute allo scarso livello di manutenzione e agli attacchi degli agenti atmosferici molto significativi nella città lagunare. Per quanto riguarda il vetro invece il quartiere presenta diverse tipologie di applicazione, alcune anche con vetri singoli originali soffiati a mano.

Dal sopralluogo effettuato nel quartiere, si è riscontrato che in alcuni casi sono stati fatti dei lavori di sostituzione degli infissi stessi. Nonostante la maggior parte degli edifici mantenga l'infisso originale schermato da balconi in legno, molte utenze hanno preferito l'applicazione, in un secondo momento, di un doppio infisso mantenendo interno il serramento originale e esterno uno nuovo in alluminio. Vista però la scarsa prestazione dell'infisso originale nel processo di calcolo tutti gli infissi vengono considerati con caratteristiche originali in favore di sicurezza.

Riepilogo caratteristiche termiche dell'involucro edilizio

Nella Tabella 10 vengono riepilogate le caratteristiche stratigrafiche e termiche dei componenti tecnologici allo stato attuale.

Tabella 10 – Trasmissione termica e componenti degli elementi dell'involucro.

| <i>Componenti</i> | <i>Elementi (elenco da lato esterno a interno)</i> | <i>Trasmittanza termica [W/(m² K)]</i> |
|----------------------------|--|---|
| Muro esterno | Intonaco esterno (2 cm) Mattoni pieni (25 cm) Intonaco interno (1,5 cm) | 1.35 |
| Basamento | Massetto (30 cm) Getto di calcestruzzo (10 cm) Massetto tradizionale (3 cm) Pavimento in gres porcellanato (1,5 cm) | 1.41 |
| Tetto | Piastrelle di terracotta (1,2 cm) Pannello di legno (3 cm) | 2.5 |
| Finestre con vetro singolo | Telaio di legno Vetri singoli | 5.8 |

Si nota come le proprietà termiche siano ampiamente distanti dai requisiti termici richiesti per gli edifici nuovi (almeno di 5 volte maggiori); rappresentano infatti un involucro edilizio consolidato e perfettamente in linea con il periodo storico in cui è stato costruito, ma che non è mai stato riqualificato a causa dei vincoli e della tutela della Sovrintendenza che quindi non è conforme ai più aggiornati standard di comfort e soprattutto di efficientamento energetico.

5.7. Il quartiere oggi

Attualmente il quartiere è stato al centro di trasformazioni edilizie e sociali che coinvolgono soprattutto le realtà pubbliche piuttosto che quelle private e residenziali.

La consolidata presenza del polo universitario e l'attività dell'Autorità Portuale hanno portato allo sviluppo di una politica residenziale che rende la zona ambita e molto ricercata. Nonostante sia una periferia ex industriale è quindi un'area capace di rinnovarsi e di conservare al contempo un fascino singolare legato all'isolamento, alla serialità e alla riconoscibile impronta veneziana delle abitazioni dell'edilizia sociale.

Dal punto di vista prettamente sociologico si possono fissare alcuni punti rilevanti legati all'occupazione e all'anagrafica.

Santa Marta è di fatto un quartiere esclusivamente residenziale con più di 560 alloggi, circa un terzo di tutti gli alloggi popolari del centro storico [204], e non sono presenti attività commerciali, a parte qualche servizio (tabaccheria, fornaio e ristorazione). In questo contesto esiste inoltre una quota di alloggi pari al 10% che risulta sfitto e non abitato, un dato che è allineato con il tasso di occupazione degli alloggi nell'intero Comune di Venezia [205], secondo il quale gli alloggi sfitti risultano circa l'8% del totale.

In particolare va rilevato che, secondo i dati forniti da ATER e Comune di Venezia su un'indagine del 2017, gli alloggi di edilizia residenziale sociale nel Comune di Venezia corrispondono a circa 11 mila unità e il 17% del totale degli alloggi risulta vuoto, pur considerando entro tale percentuale anche le abitazioni in manutenzione (13%) e in stato di prima assegnazione (4%), la quota di alloggi popolari effettivamente sfitti (1405) si riduce al 13% [206]. Secondo analisi elaborate dall'ATER la motivazione principale è legata alla necessità di manutenzione negli alloggi sfitti a causa della vetustà e della necessità di adeguamento impiantistico; infatti nel 2018 l'ATER ha previsto una spesa media di circa 21.000 € per alloggio a fronte di una stima totale dei costi per la riqualificazione del patrimonio di 11.497.026 € [207]. La mancanza di manutenzione infatti può portare a conseguenze quali manifestazione di fenomeni di degrado per condensa e ponti termici che alterano le prestazioni energetiche e il comfort delle unità contigue fino all'abbassamento del valore immobiliare delle unità.

Analizzando la situazione dei nuclei abitativi, per questo studio sul quartiere Santa Marta non è stato possibile accedere ai dati relativi agli alloggi per motivi di privacy. Tuttavia, dai sopralluoghi effettuati e dalle interviste fatte agli abitanti, è stata riscontrata la presenza di realtà sociali di natura differente: la maggior parte degli abitanti corrisponde a persone anziane, con età superiore ai 65 anni, mentre il resto è diviso tra studenti universitari fuorisede e famiglie residenti con numero di componenti variabile.

Anche in questo caso la situazione è comparabile con quanto riscontrato nell'intero Comune. L'indice demografico e di invecchiamento dei nuclei assegnatari delineano le principali criticità dell'edilizia pubblica cittadina, evidenziando soprattutto l'inadeguatezza dello stock abitativo rispetto alla realtà dell'abitare contemporaneo [206]. Analizzando l'anagrafica degli inquilini degli alloggi comunali Venezia [205] e ATER [208] si riscontra che, in entrambi i casi, il 60% dei nuclei assegnatari sono costituiti da over 65, raggiungendo percentuali di vecchiaia pari a più del doppio di quelle dell'intero comune (27%). Per quanto riguarda la struttura della famiglia, i nuclei monofamiliari e quelli formati da due persone rappresentano quasi l'80% dei nuclei totali. Pertanto le trasformazioni dei nuclei familiari incidono sullo stock abitativo pubblico in termini di sottoutilizzo, determinando il ribaltamento delle problematiche storicamente legate a questioni di sovraffollamento [206].

In questo scenario sociale vanno inserite alcune note riguardanti lo stato di conservazione degli edifici esistenti. Lo stato attuale a livello architettonico si presenta in buono stato, almeno nell'involucro esterno, ma bisogna considerare che ormai si tratta di edifici costruiti cento anni fa, quindi con tecnologie e con standard edilizi che non trovano più corrispondenza con le norme attuali soprattutto per quanto riguarda l'efficientamento energetico e il comfort, nella sua accezione più ampia del termine.

Nel quartiere le strutture edilizie esistenti sono ancora quelle originarie e non è stato effettuato alcun intervento migliorativo se non la sostituzione dei infissi esterni, e le prestazioni dell'involucro opaco sono lontane dai requisiti fissati dalle normative in termini di contenimento energetico; anche l'impiantistica è rimasta inalterata, al massimo si è riscontrato il passaggio da impianto di climatizzazione invernale singolo a uno di tipo condominiale. In questa situazione i consumi energetici e le relative emissioni di gas inquinanti rappresentano una voce di costo per l'utente e il comfort all'interno delle unità risente della mancanza di adeguamento a standard più aggiornati.

5.8. Riepilogo

Note sulle caratteristiche del Quartiere Santa Marta:

- Campione rappresentativo: il patrimonio italiano costruito fino agli anni Cinquanta su iniziativa pubblica e sociale rappresenta una porzione rilevante dello stock edilizio che può essere riqualificata a livello architettonico, ma necessita sicuramente di un adeguamento di efficientamento energetico.
- Tipologia architettonica: stesso periodo di costruzione e quindi stessa tipologia costruttiva dell'epoca per tutti gli edifici IACP; cambia la geometria e quindi i volumi, e, di conseguenza, cambia il rapporto di forma S/V che è rappresenta un parametro fondamentale della normativa italiana per la caratterizzazione degli edifici dal punto di vista della certificazione energetica e per la definizione degli interventi di riqualificazione edilizia.
- Conseguente replicabilità e adattabilità dello studio di riqualificazione: la tecnologia è stata la stessa a livello nazionale, cambiano sensibilmente le caratteristiche e le proprietà dei materiali da costruzione utilizzati.
- Società: si tratta di quartiere residenziale, nello specifico abitato per lo più da utenza anziane da coppie: pertanto le varie unità sono costantemente abitate e anche se sottoutilizzate.
- Opportunità: quartiere residenziale con richiesta di mercato, percentuale di affitto che è già in fase di manutenzione.
- Involucro edilizio consolidato e risalente ancora al periodo di costruzione; conseguenti proprietà fisico termiche molto basse e non idonee agli standard attuali per comfort ed efficientamento energetico.

6. APPLICAZIONE

6.1. Confronto e taratura metodo di calcolo semplificato e dinamico

Il patrimonio edilizio residenziale rappresenta uno dei maggiori attori nel consumo di energia e nelle emissioni di gas serra, quindi è fondamentale ridurre il consumo di energia. Gli strumenti di simulazione stanno diventando sempre più accurati per soddisfare i nuovi requisiti sia per i singoli edifici che a livello di quartiere, anche se non sono accessibili agli utenti non specializzati come i politici. La ricerca riguarda la valutazione del fabbisogno di energia per il riscaldamento degli edifici di un quartiere storico rappresentativo del patrimonio edilizio italiano. L'analisi mette a confronto il metodo di calcolo in regime semi-stazionario, più accessibile agli utenti non professionisti, con due strumenti dinamici e specialistici per la progettazione energetica su scala urbana.

L'obiettivo consiste nella valutazione del possibile scostamento dei risultati tra i metodi di calcolo dinamico e quello semi-stazionario, nonché l'individuazione di eventuali limiti e opportunità nell'applicazione di quest'ultima procedura, che tuttavia è attualmente lo strumento di calcolo ufficiale a livello nazionale che recepisce la direttiva 2010/31/UE.

Una parte di quanto esposto di seguito è stato pubblicato in una versione estesa in [89].

6.1.1. Metodologia e settaggio delle simulazioni al computer

L'analisi è stata eseguita confrontando la simulazione semi-stazionaria, condotta utilizzando il foglio di calcolo MS Excel, sviluppato appositamente per questa ricerca, con i due software City Energy Analyst (CEA) [209,210], sviluppato dall'ETH di Zurigo, e focalizzato sulla simulazione energetica dei quartieri urbani, e con il software EURECA (Energy Urban Resistance Capacitance Approach) [182,211,212], basato sull'approccio resistenza-capacità suggerito dalla norma EN ISO 13790:2008 [181].

Il test analizza il quartiere residenziale di Santa Marta a Venezia con l'obiettivo di calcolare e confrontare il fabbisogno di riscaldamento utilizzando due diversi metodi di calcolo e tre diversi modelli.

I software utilizzati sono stati impostati con gli stessi dati di input come le informazioni climatiche, la geometria dell'edificio, le caratteristiche termo-fisiche dell'involucro edilizio, i valori di efficienza e la capacità del sistema impiantistico, l'uso delle attività e la densità di popolazione degli edifici che sono stati descritti nei paragrafi precedenti.

I successivi capitoli descrivono alcuni approfondimenti sulle impostazioni di calcolo.

Dati climatici

Venezia è caratterizzata da un clima subtropicale (Cfa) con inverni freddi ed estati calde e umide in base alla classificazione Köppen-Geiger [213,214]. La vicinanza del mare Adriatico mitiga la calda temperatura estiva porta stagionalmente venti freddi e caldi, in particolare, i casi di venti caldi durante l'inverno attenuano le basse temperature in diversi periodi. Le temperature variano molto durante l'anno, oscillando tra i -0.1°C di gennaio e i 27.7°C di luglio. In media ci sono 78 giorni di pioggia all'anno e le precipitazioni annuali sono mediamente di 748.4 mm.

I dati climatici utilizzati per entrambi i software sono estratti dal file meteo di EnergyPlus della stazione di Venezia Tesserà al fine di fare un confronto utilizzando la stessa fonte [185,215].

I dati estratti dal file con estensione .epw per le città italiane si riferiscono a due fonti: l'International Weather for Energy Calculation (IWEC), tipici file meteo ASHRAE, e la raccolta dati climatici italiani "Gianni De Giorgio" (IGDG), basata su dati registrati nel periodo tra il 1951 e il 1970 [216].

Secondo gli standard italiani, Venezia si trova nella zona climatica E, avendo 2.345 Gradi Giorno, cioè Heating Degree Days (HDD). Questo valore deriva dal DPR 412/1993, una legge che contiene per tutte le principali località italiane il valore corrispondente di HDD [37], basato sulla norma europea EN ISO 15927-6 2007 che specifica la definizione, il metodo di calcolo e la presentazione dei dati utilizzati per stimare l'energia consumata per il riscaldamento [217]. Sulla base di questo dato, vengono definiti i limiti per l'uso del riscaldamento: in questo caso per la zona E corrisponde al periodo dal 15 ottobre al 15 aprile per un massimo di 14 ore di riscaldamento al giorno [192].

Come descritto in precedenza, la determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici può adottare due diversi archivi ufficiali: la norma UNI 10349-1:2016, che riporta i dati medi mensili climatici come utilizzati nel metodo semi-stazionario indicato nella EN ISO 13790:2008, e un archivio (come l'archivio EnergyPlus Weather) con valori orari di anni di riferimento utilizzati nelle procedure di simulazione dinamica.

Come si può vedere dal confronto nella Tabella 11, i valori relativi alla temperatura esterna e all'irraggiamento globale medio mensile erano abbastanza diversi tra le due fonti riportate. Il file .epw si basa su rapporti meteorologici degli anni '70, mentre la norma UNI 10349 è stata rivista utilizzando misure meteorologiche effettuate in anni più recenti; pertanto, lo strumento del foglio di calcolo gestisce i valori medi mensili ottenuti dal file climatico con estensione .epw.

Tabella 11 – Confronto dei dati meteorologici.

| Mese\Fonte | Temperatura di bulbo secco – media giornaliera [$^{\circ}\text{C}$] | | Radiazione orizzontale globale – media giornaliera [kWh/m^2] | |
|------------|---|------------------|--|------------------|
| | Venice.epw | UNI 10349-1:2016 | Venice.epw | UNI 10349-1:2016 |
| Gennaio | 2.64 | 3.10 | 0.88 | 1.25 |
| Febbraio | 3.89 | 3.70 | 1.15 | 2.25 |
| Marzo | 7.75 | 8.70 | 2.56 | 3.47 |
| Aprile | 12.03 | 12.90 | 3.71 | 4.69 |
| Maggio | 17.24 | 19.00 | 5.02 | 6.08 |
| Giugno | 20.76 | 22.40 | 5.47 | 7.17 |
| Luglio | 23.82 | 23.80 | 5.68 | 7.53 |
| Agosto | 22.75 | 23.80 | 4.68 | 6.14 |
| Settembre | 19.62 | 18.70 | 3.35 | 4.39 |
| Ottobre | 13.93 | 14.00 | 1.96 | 2.72 |
| Novembre | 8.68 | 8.40 | 0.91 | 1.47 |
| Dicembre | 4.00 | 4.90 | 0.73 | 1.14 |

Geometria

La geometria degli edifici si basa sui dati riportati negli archivi catastali regionali e sulle misure effettuate nel rilievo geometrico.

A tal fine è stato utilizzato un database catastale, precisamente il Catalogo online dei Dati Territoriali della Regione Veneto, successivamente modificato e convertito in formato shape (.shp e .shx) per essere accessibile da CEA.

Le modifiche geometriche apportate riguardano le altezze e le footprint degli edifici. Nel registro catastale, le celle catastali della mappa sono costituite da diversi edifici e quindi hanno altezze diverse. Quindi, la modifica consiste nel dividere i mappali (o celle catastali) in mappali più piccoli con altezze omogenee.

Gli edifici analizzati rappresentano la situazione reale attuale e sono caratterizzati da volumi regolari e omogenei e sono stati classificati per numero di mappale e altezza omogenea, ottenendo 54 edifici, come già precedentemente descritto (Figura 35).

Tuttavia, si nota una discordanza nella lettura e associazione dei dati catastali da parte del CEA: i valori di footprint utilizzati dal CEA sono diversi o meglio discretizzati, secondo i segmenti che compongono il profilo geometrico della superficie stessa. In questo caso studio, la superficie totale del quartiere è la stessa sia in CEA che nel catasto, tuttavia le differenze alla scala del singolo edificio hanno delle conseguenze nell'elaborazione dei parametri per ottenere la superficie di pavimento, la superficie utile riscaldata, il volume e le superfici esposte, sia le pareti opache che la frazione di finestra. In particolare, la superficie complessiva elaborata dal CEA è inferiore solo dell'1% rispetto ai dati catastali.

Gli stessi input devono essere definiti per confrontare i software: in CEA è stato applicato un valore pari a 0.8845 come rapporto tra superficie netta e superficie lorda. Questo valore corrisponde nel foglio elettronico di calcolo all'applicazione della formula per la superficie A_f , basata sullo spessore dei muri esterni di circa 0.30 m misurato da un rilievo in loco.

La modellazione della geometria in CEA si svolge in diverse fasi. In primo luogo, la definizione delle footprint degli edifici utilizzando un'applicazione GIS gratuita e open-source, come QGIS nella versione 3.10.0 che permette all'utente di analizzare e modificare i dati geospaziali [218] o di importare mappe 2D georeferenziate. Questo processo è associato dall'uso di un provider di mappe come Open Street Map [219], ovvero un file tabellare che contiene diverse informazioni sugli edifici comprese le caratteristiche necessarie per la simulazione del modello. Sfortunatamente, questa situazione non si applica al caso studio in quanto il file è incompleto e incongruente con i dati di rilievo. Come conseguenza della mancanza di una raccolta esaustiva di dati e di un'unitarietà tra i vari database, le uniche informazioni riportate nel modello 2D sono l'area e il perimetro degli edifici.

Questa situazione richiede l'utilizzo di database aggiuntivi che registrano i dati per i parametri mancanti [220,221]. La prima fonte utilizzata sono le mappe catastali del Comune di Venezia attraverso le quali sono state ottenute informazioni sull'altezza degli edifici e sul numero di piani. Le mappe catastali riassumono anche l'uso finale dello spazio che permette una prima classificazione approssimativa del tipo di edificio. Dopo questa prima definizione, è necessario un arricchimento dei dati per fornire maggiori informazioni sull'uso e sul numero di piani dell'edificio. Utilizzando ulteriori mappe catastali e portali di web mapping, i dati ottenuti sono stati convalidati e ulteriormente confermati attraverso l'uso di fornitori di mappe online come Bing Maps o Google Maps [222,223]. L'ultimo passo è la definizione della vetustà degli edifici. Attraverso varie mappe storiche, è possibile risalire approssimativamente agli anni in cui gli edifici sono stati costruiti, e poiché esiste anche una relazione dettagliata, è stato possibile definire l'annata degli edifici [193].

Come spiegato in precedenza, EURECA gestisce un file GeoJSON per ottenere le informazioni geometriche; di conseguenza è stato utilizzato lo stesso shapefile elaborato da CEA. Anche se lo shapefile di input è lo stesso, l'area complessiva del quartiere ha una sovrastima dello 0.7% rispetto a CEA a causa dell'approssimazione interna del metodo di calcolo della footprint.

Guadagni interni

Valori di riferimento affidabili riguardanti i guadagni termici interni rappresentativi del tipico uso residenziale sono dati dalla norma EN 16798 [224]. Essa definisce una densità di occupazione di 30 m²/persona per edifici residenziali multifamiliari simili al caso studio, corrispondente a circa quattro persone per appartamento. Data l'età degli edifici e i pochi interventi di adeguamento effettuati negli anni, le infiltrazioni d'aria sono fissate costantemente a 0.3 ricambi d'aria all'ora [224]. In base a quanto espresso nella norma ISO 17772:2018 [225] e nella norma UNI/TS 11300-1, per i carichi da elettrodomestici è stato utilizzato il valore base di 8 W/m² e per l'illuminazione 2.7 W/m², considerando la tipologia degli occupanti [160]. Nei software di calcolo in regime dinamico, i carichi interni sono stati applicati secondo i profili di programmazione riportati in Figura 37.

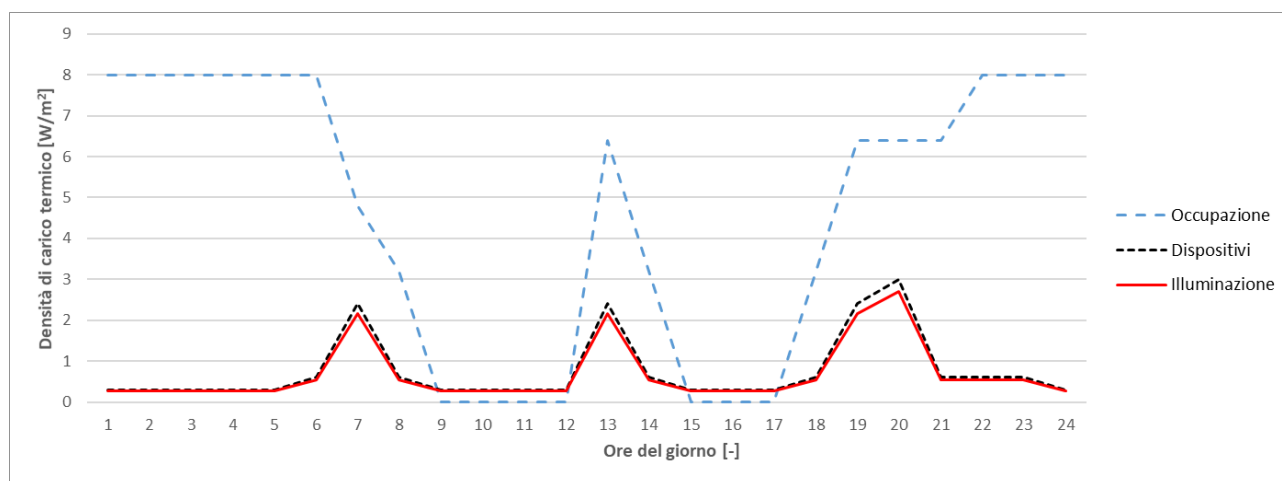


Figura 37 – Profilo di densità di carico termico interno di un edificio residenziale durante una settimana.

In generale, i guadagni interni sono stati valutati in base agli utenti effettivi e ai dati dell'indagine. Il quartiere di Santa Marta è abitato prevalentemente da persone anziane, quindi il programma adottato si riferisce a un tipo di utente che trascorre la maggior parte del tempo in casa e a un uso continuo durante la settimana, senza differenze tra i giorni feriali e il fine settimana. Gli elettrodomestici e l'illuminazione presentano un profilo di programmazione simile perché il valore di riferimento è lo stesso secondo la norma UNI/TS 11300-1 (4 W/m²) e la programmazione adottata si riferisce ai dati dell'indagine e presenta lo stesso andamento.

Guadagni solari

I guadagni termici solari possono influenzare fortemente il carico di riscaldamento-raffrescamento, specialmente con componenti vetrate a basso rendimento, perciò è stata sviluppata una valutazione dettagliata dei guadagni termici solari. Il calcolo dei guadagni solari implementato con il metodo semi-stazionario si basa solo sulle superfici vetrate utilizzando un valore medio stagionale della radiazione solare incidente per ogni orientamento, ma non considera l'ombreggiamento reciproco degli edifici.

I valori considerati nel modello del foglio di calcolo sono i dati climatici per la località di Venezia estratti dal file climatico .epw, considerando appunto i valori di irradiazione solare media giornaliera mensile (Tabella 12).

Tabella 12 – Irradiazione solare media mensile giornaliera su un piano verticale per l'orientamento per il periodo invernale.

| | <i>Sud</i> | <i>Est</i> | <i>Ovest</i> | <i>Nord</i> |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | [kWh/m ²] | [kWh/m ²] | [kWh/m ²] | [kWh/m ²] |
| Gennaio | 2.18 | 1.42 | 1.45 | 0.89 |
| Febbraio | 2.07 | 1.34 | 1.37 | 0.84 |
| Marzo | 3.15 | 2.05 | 2.09 | 1.29 |
| Aprile | 3.12 | 2.02 | 2.06 | 1.27 |
| Ottobre | 3.11 | 2.02 | 2.06 | 1.27 |
| Novembre | 2.08 | 1.35 | 1.38 | 0.85 |
| Dicembre | 2.02 | 1.31 | 1.34 | 0.82 |
| Media | 2.43 | 1.58 | 1.61 | 0.99 |

Al contrario, i guadagni solari sono stimati in CEA sulla base della radiazione solare oraria [180] incidente sulla superficie del vetro e sono calcolati con l'algoritmo hemispheric view-shed di Fu et al. [226], implementato in ArcGIS 10.2.1 [227]. I guadagni termici solari degli edifici sono calcolati dal motore di simulazione DAYSIM [228], integrato in CEA e considera inoltre l'ombreggiamento reciproco tra gli edifici.

La radiazione solare implementata per EURECA è basata sulla norma EN ISO 13790:2008, ulteriormente migliorata con il modello del Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) proposto da Arasteh et al. [229]. Il modello definisce profili dipendenti dall'angolo per la riflettanza, trasmissione e SHGC usando i valori di trasmittanza termica e il coefficiente di guadagno di calore solare con incidenza normale (SHGC_n), considerando la finestra come uno strato equivalente semplificato.

6.1.2. Risultati

Sono state eseguite diverse simulazioni per stimare il fabbisogno di energia per il riscaldamento degli ambienti mediante l'uso di tre software. In particolare, un set di 3 simulazioni è stato utilizzato per valutare l'influenza di diversi input sui risultati della simulazione:

- S01 - tasso di infiltrazione e guadagni interni trascurati, per considerare solo l'influenza delle dispersioni di trasmissione dell'involucro;
- S02 - valutazione del tasso di infiltrazione fissato a 0.5 h⁻¹;
- S03 - calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento considerando sia i guadagni termici interni che le infiltrazioni.

I risultati ottenuti con i diversi strumenti sono stati descritti nel dettaglio nei paragrafi seguenti.

Caso S01

Quando si esegue la prima simulazione, il caso S01, senza guadagni interni né tasso di infiltrazione, il fabbisogno energetico per il riscaldamento degli spazi degli edifici è legato solo alle dispersioni di trasmissione termica attraverso l'involucro.

La Figura 38 descrive il fabbisogno energetico per il riscaldamento di un singolo edificio. Mentre il CEA e il metodo semi-stazionario hanno una differenza trascurabile, il metodo 5R1C implementato in EURECA sovrastima leggermente l'energia richiesta (in media circa il 10% rispetto al CEA e l'11% rispetto a MS Excel), probabilmente a causa della superficie delle pareti esterne calcolata leggermente più alta e dei diversi metodi applicati per il calcolo della radiazione solare spiegati nel paragrafo precedente.

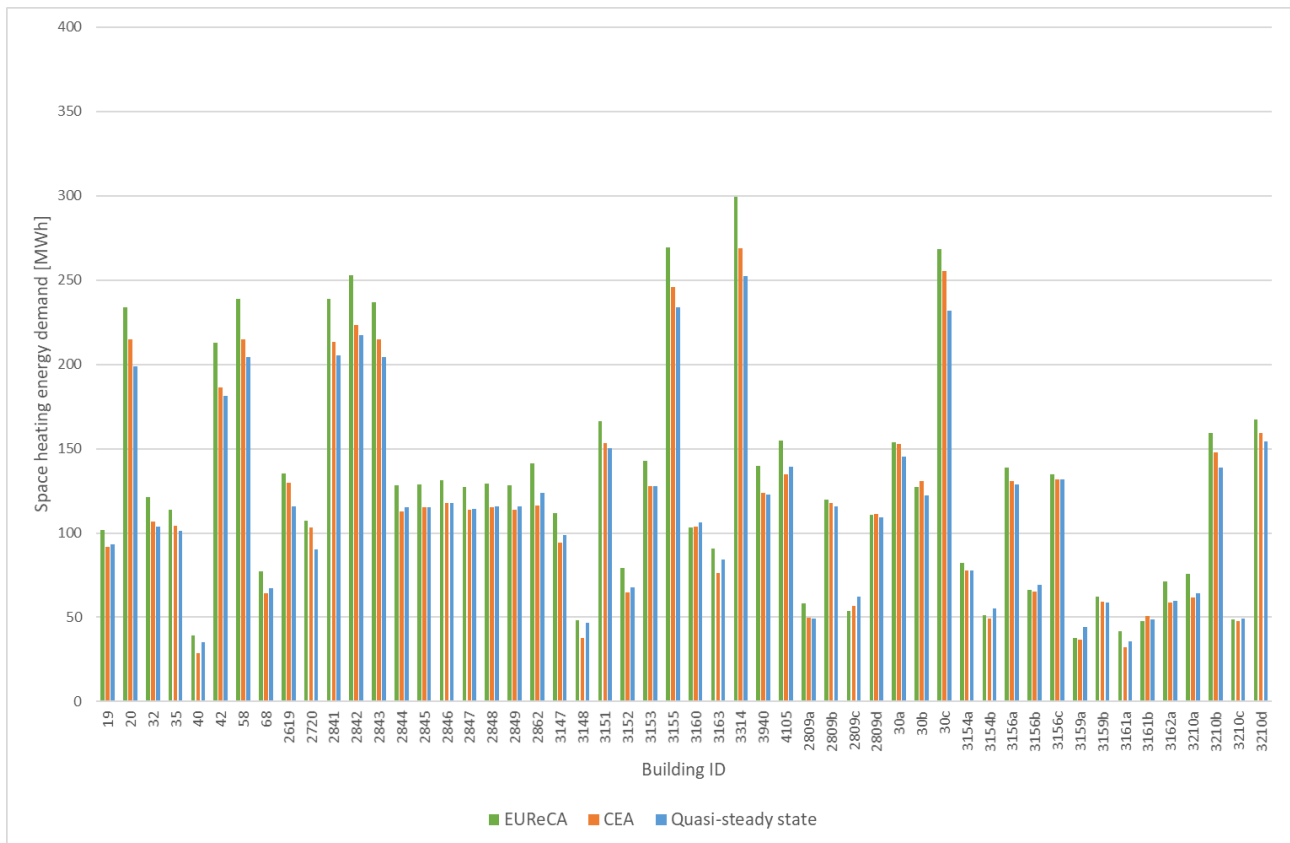


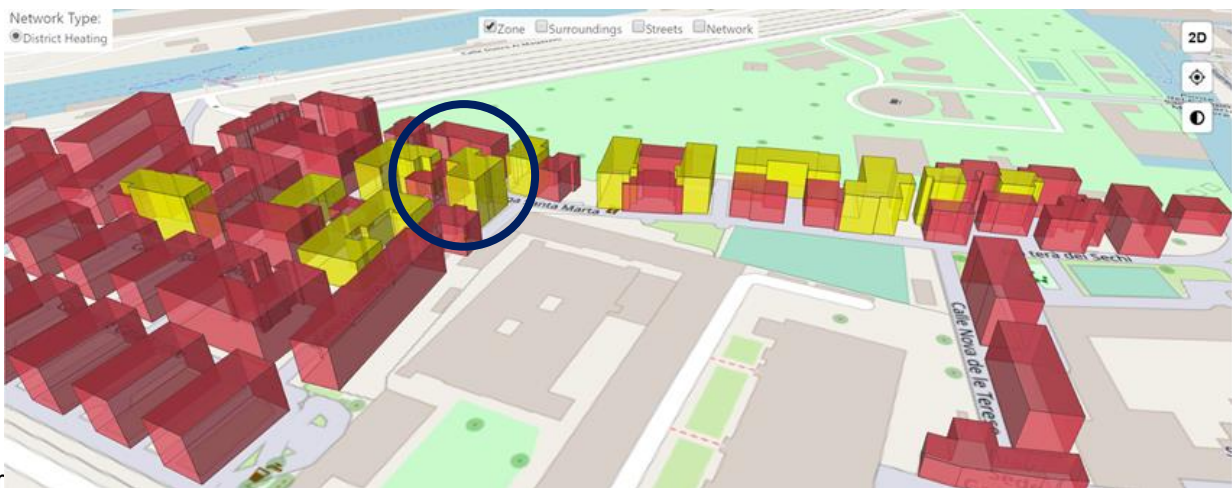
Figura 38 – Stima del fabbisogno energetico per il riscaldamento dovuto alle dispersioni per trasmissione dell'involucro.

La capacità termica delle pareti interne è calcolata allo stesso modo da CEA e EURECA, considerando l'area delle partizioni interne pari a 2.5 volte la superficie interna del pavimento, come indicato dalla norma EN ISO 13790:2008. Tuttavia, le pareti interne non sono state incluse nel foglio di calcolo MS Excel, contribuendo così al divario tra i diversi risultati.

In generale, utilizzando il file del foglio di calcolo e i dati catastali, una semplificazione della geometria è dovuta essere applicata nel caso di edifici contigui con diverse altezze o numero di piani, quindi alcune superfici non sono state considerate nella modellazione e possono aver influenzato i risultati finali. Infatti, la Figura 39 evidenzia gli edifici che presentano diverse altezze all'interno della stessa unità e della variabilità geometrica dell'area delle pareti verticali che possono influenzare le dispersioni di trasmissione termica.



a)



b)

Figura 39 – Modellazione geometrica e termica dell'edificio del caso studio: a) vista in pianta, evidenziati in giallo gli edifici che presentano altezze diverse all'interno della stessa unità; b) vista 3D, focus su un edificio campione del caso di contiguità e della differenza di livelli.

Caso S02

In questa seconda simulazione si valuta l'impatto delle dispersioni di ventilazione. Nel metodo semi-stazionario, la ventilazione è riferita al volume riscaldato e alla temperatura media mensile, mentre in CEA il tasso di dispersioni termiche dovute alla ventilazione è calcolato secondo la seguente Equazione 6 [181]:

$$\phi_{ve} = H_{ve} \cdot (T_{a,in} - T_{a,sup}) [kWh] \quad \text{Equazione 6}$$

$$\text{where } H_{ve} = Cp_a \cdot Ae \cdot (\dot{v}_{ve} + \dot{v}_{inf}) [kWh/K]$$

dove

- $c_{p,air}$ capacità termica volumetrica dell'aria fissata a 1,2 kJ/(m³K)
- A_e pavimento condizionato rea (m²)
- v_{ve} portata volumetrica specifica di aria fresca necessaria per la qualità dell'aria (m³/h m²)
- v_{inf} portata specifica di infiltrazione di aria esterna (m³/h m²)
- $T_{a,in}$ temperatura dell'aria interna (K)
- $T_{a,sup}$ temperatura dell'aria di immissione (K)

Pertanto, il calcolo in CEA dipende dall'area riscaldata per piano e dalla differenza di temperatura oraria, ma in particolare dal tipo di occupazione e dal suo profilo di programmazione. Le differenze con EURECA possono essere legate ai diversi calcoli effettuati, perché il metodo resistenza-capacità si basa sul volume riscaldato, che è in media inferiore del 3% rispetto a CEA (Figura 40).

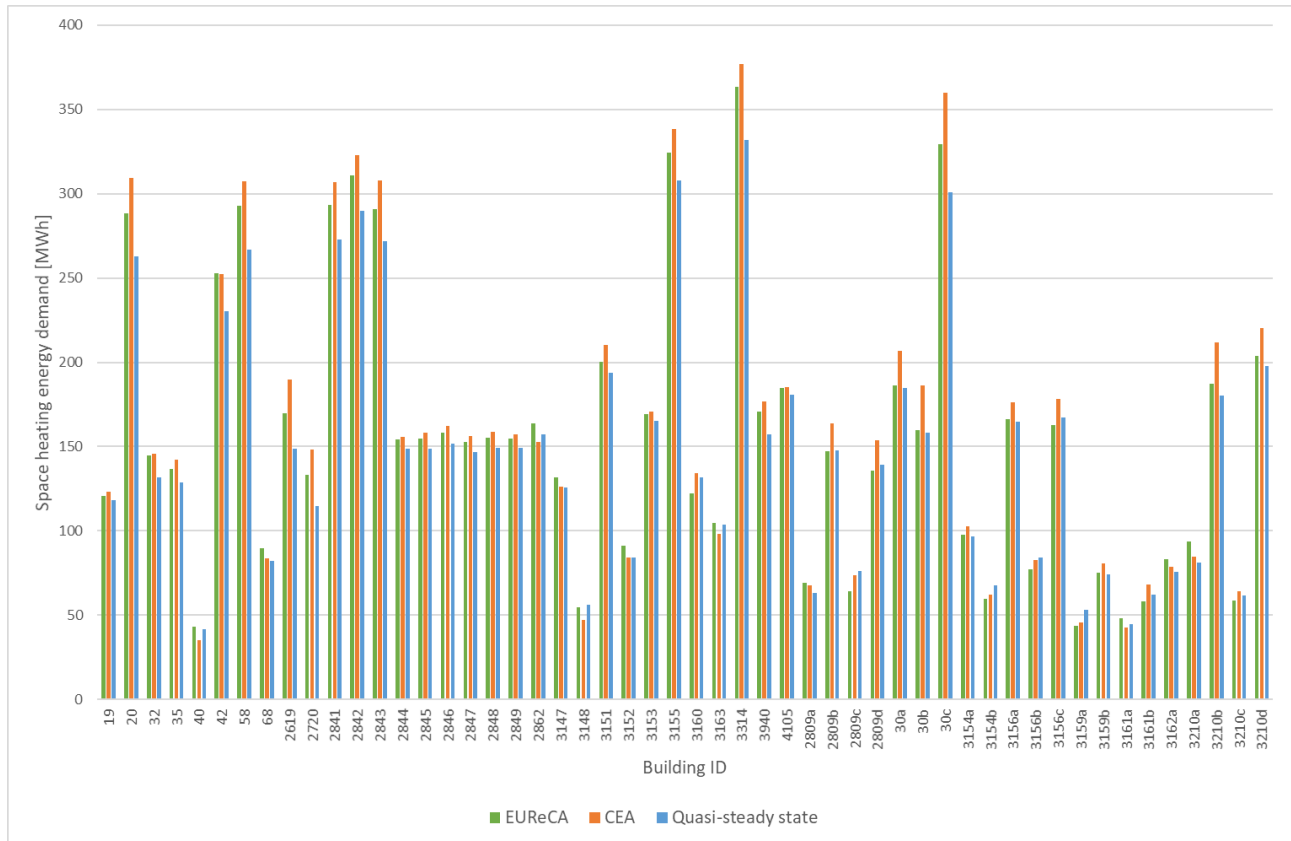


Figura 40 – Valutazione del fabbisogno energetico per il riscaldamento nel periodo di riscaldamento considerando le dispersioni per trasmissione e ventilazione.

Caso S03

Nella terza simulazione, il caso S03, viene calcolato il fabbisogno totale di riscaldamento del quartiere (Figura 41).

Sia EURECA che CEA sovrastimano il fabbisogno di energia per il riscaldamento degli spazi a livello di singolo edificio, rispetto al software sviluppato con un foglio di calcolo MS Excel. Questa differenza è dovuta a due questioni principali.

Prima di tutto, mentre CEA e EURECA considerano l'ombreggiamento reciproco tra gli edifici inclusi nel GeoJSON, l'ombreggiamento degli edifici circostanti non è considerato nel foglio di calcolo elettronico. Pertanto, i guadagni solari sono calcolati per l'intero periodo di esposizione come se gli edifici non fossero situati in un contesto urbano. Inoltre, la modellazione 3D utilizzata per la simulazione del regime dinamico ha influenzato l'ombreggiamento dell'edificio su se stesso per le stesse ragioni già spiegate nella Figura 39.

Inoltre, nel software semplificato la geometria dei singoli edifici è basata sulla superficie e sul perimetro della footprint. L'area esterna verticale complessiva, che è responsabile della maggior parte delle dispersioni di trasmissione, è calcolata in base al perimetro che non considera le superfici adiabatiche che delimitano gli edifici adiacenti. D'altra parte, la superficie vetrata è stata calcolata con un rapporto finestra-parete (WWR) pari al 20%, calibrato sulle informazioni raccolte con il rilievo in loco.

Il metodo del regime semi-stazionario sottostima il fabbisogno di energia in modo significativo rispetto ai software dinamici, mentre le simulazioni precedenti hanno presentato risultati simili. La differenza principale è legata all'implementazione dei carichi interni, perché il fattore di utilizzo considerato nella norma ha mostrato alcuni risultati critici per gli edifici storici o comunque edifici esistenti [230–232].

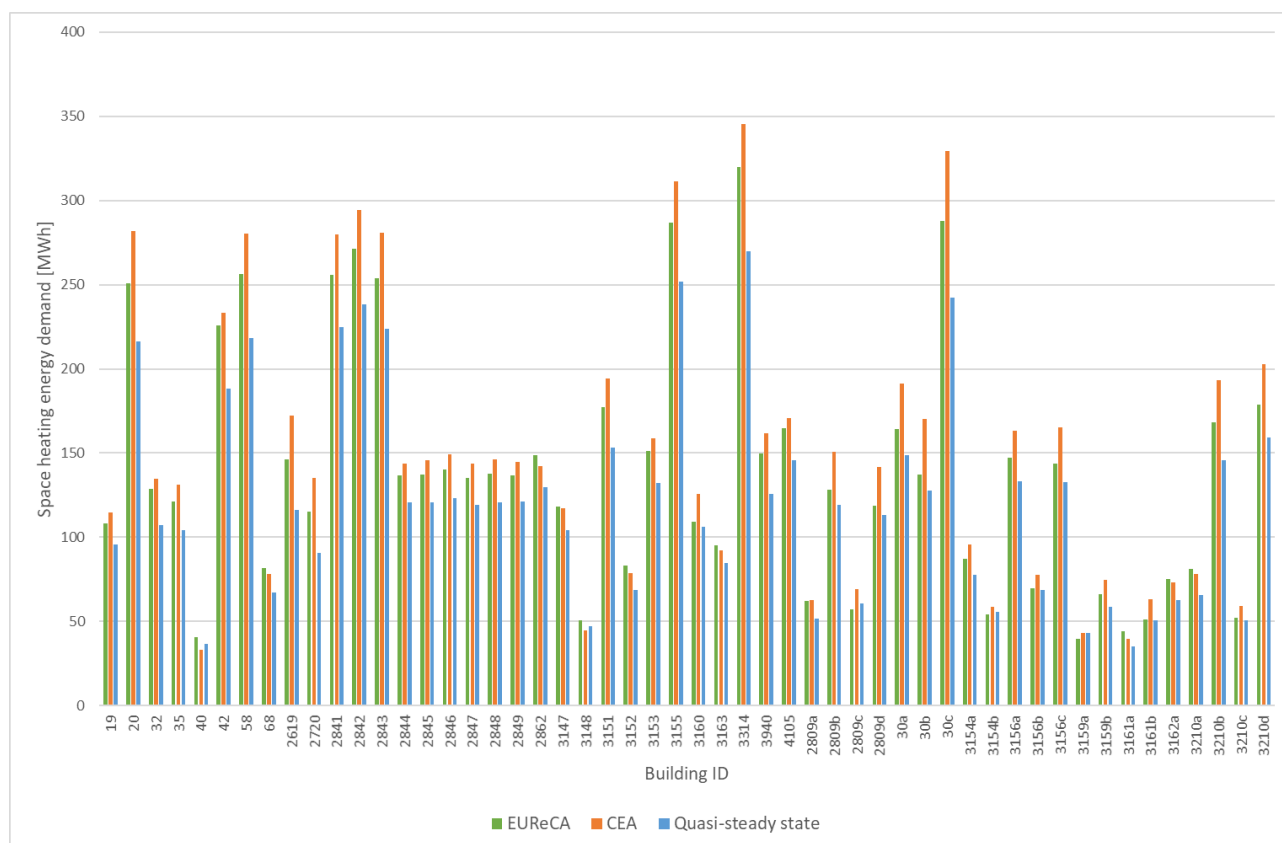


Figura 41 – Valutazione del fabbisogno energetico per il riscaldamento degli spazi nel periodo di riscaldamento considerando il contributo dei carichi interni.

6.1.3. Discussione

Il confronto dei dati di input e di output mostra alcune differenze nell'assunzione dei dati da parte di CEA e EURECA. Per quanto riguarda l'input geometrico, il valore del perimetro utilizzato nei calcoli è discretizzato da CEA che esclude i bordi sotto una certa soglia di lunghezza. Si presume che la discretizzazione sia implementata per semplificare i layout dallo shapefile o dal file catastale, tuttavia, la semplificazione influenza la definizione di altri input geometrici e di calcolo come il volume riscaldato e l'area esterna laterale complessiva.

I due metodi utilizzano input diversi per il calcolo dei carichi interni. MS Excel utilizza un valore totale medio per la superficie climatizzata, mentre CEA e EURECA non considerano il numero di appartamenti per edificio, utilizzando il parametro di densità di occupazione previsto dalla EN 16798:2019-1 [224] e questo implica una differenza di valore nei guadagni interni. Tuttavia, i risultati sono simili e sono considerati accettabili dato il minimo impatto sul calcolo del fabbisogno complessivo di riscaldamento. Infatti, i guadagni termici di occupazione relativi al guadagno termico orario sensibile e latente sono dovuti al tasso di occupazione.

Anche se i guadagni solari sono calcolati con metodi diversi, l'adozione di dati orari o stagionali implica che i guadagni solari hanno una maggiore influenza sulla disparità di valore impattando in modo diverso sul fabbisogno energetico per il riscaldamento degli ambienti.

La Tabella 13 presenta i risultati ottenuti analizzati livello di quartiere. Nonostante le differenze evidenziate su scala di singolo edificio, in una prospettiva più ampia sia CEA che EURECA mostrano risultati promettenti rispetto al metodo semi-stazionario (percentuali in nero) con l'assenza di infiltrazioni e carichi interni che implica l'uso di profili di utilizzo. Il caso S02 include una portata costante, valutata sulla base della superficie riscaldata del pavimento in CEA, che aumenta il fabbisogno energetico di riscaldamento del 9% rispetto a MS Excel, mentre EURECA è solo il 4% superiore al foglio di calcolo MS Excel, perché il metodo di calcolo si basa sul volume che è in media leggermente più piccolo.

I due strumenti dinamici calcolano un fabbisogno energetico significativamente più alto quando includono i carichi interni perché implicano l'uso di specifici profili di funzionamento. D'altra parte, il metodo semi-stazionario implementa carichi costanti per tutto il giorno, aumentando così il contributo dei carichi interni e diminuendo la necessità di riscaldamento degli spazi. Inoltre, EURECA divide i carichi interni sensibili come radianti e convettivi e la loro frazione dipende dalle equazioni fornite dalla norma EN ISO 13790:2008. Inoltre, il calore fornito dall'impianto ideale è stato suddiviso in 50% radiante e 50% convettivo in EURECA, giustificando le differenze rispetto al CEA.

Tabella 13 – Fabbisogno energetico totale del distretto [MWh]: la percentuale in nero confronta con il metodo semi-stazionario, la percentuale rossa confronta i due strumenti in regime dinamico.

| | MS Excel Spreadsheet [MWh] | CEA [MWh] | EURECA [MWh] |
|-----|-------------------------------|-----------------|----------------------|
| S01 | 6.018 | 6.115 (+2%) | 6.707 (+11%)(+9%) |
| S02 | 7.732 | 8.435 (+9%) | 8.083 (+4%)(-4%) |
| S03 | 6.274 | 7.769 (+19%) | 7.149 (+12%)(-9%) |

Quando si confrontano i due strumenti dinamici (percentuale rossa), il modello 5R1C tende a sottostimare la domanda di energia per il riscaldamento rispetto al CEA, ad eccezione del caso S01, (+ 9%). Tuttavia, questo margine di errore è accettabile quando si tratta di analisi di simulazione su larga scala – infatti la differenza tra i due tools è di circa 10 kWh/m² di fabbisogno totale - perché è principalmente legato alle diverse definizioni di input e al metodo di calcolo.

6.1.4. Conclusioni

Lo studio analizza l'applicazione di tre metodi per le richieste di energia per il riscaldamento a livello distrettuale al fine di comprendere ed evidenziare i vantaggi e i limiti dell'applicazione di un metodo semi-stazionario e di approcci dinamici. I risultati dell'applicazione ad un caso di studio specifico a Venezia, il quartiere residenziale di Santa Marta, portano ad alcune considerazioni finali.

Le dispersioni termiche per trasmissione sono comparabili come previsto anche se ulteriori analisi dovrebbero stimare il contributo dei ponti termici, non ancora sviluppato nel foglio di calcolo MS Excel. Il calcolo e il valore delle dispersioni per infiltrazione riducono il divario tra i due metodi, anche se le formule di calcolo sono diverse.

Il calcolo analitico dei guadagni termici solari mostra il loro potenziale impatto sul fabbisogno di riscaldamento complessivo sia a livello di singolo edificio che di distretto, poiché il calcolo semi-stazionario non considera l'ombreggiamento reciproco degli edifici e sovrastima il contributo dei guadagni solari per un valore medio di circa il 47%.

Per quanto riguarda la simulazione del distretto, le reti semplificate resistenza-capacità mostrano una buona previsione della domanda di energia del distretto sottostimando il fabbisogno di energia a livello di distretto del 9% rispetto ad altri strumenti dinamici, dimostrando così la precisione e l'affidabilità dell'approccio proposto con un minore sforzo di calcolo.

L'applicazione del più semplice metodo in regime semi-stazionario implementato in un file MS Excel potrebbe essere utile per utenti non specializzati, come funzionari o politici o urbanisti che hanno implicazioni pratiche nello sviluppo delle città e dovrebbero essere in grado di avere un'idea generale delle possibili strategie per pianificare quartieri sostenibili.

Gli sviluppi futuri sono indirizzati a valutare la domanda di raffrescamento e di acqua calda domestica (ACS) a livello di quartiere per valutare l'uso energetico estivo e per valutare la riqualificazione e la sostituzione degli impianti in base all'impatto del consumo di ACS.

Il passo successivo è quello di analizzare la ristrutturazione dell'intero quartiere per migliorare le condizioni dell'involucro edilizio e l'installazione di impianti più efficienti per ridurre il consumo energetico e i costi globali (investimento e manutenzione).

6.1.5. Riepilogo

Lo studio mostra come il metodo semi-stazionario preveda un attendibile fabbisogno energetico per gli edifici, in linea con i risultati ottenuti dai due strumenti dinamici, nel momento in cui si considerano solo la geometria e le infiltrazioni come input. Tuttavia, il metodo semplificato sottostima significativamente il fabbisogno energetico rispetto alle simulazioni CEA e EURECA quando si introducono i carichi interni. I risultati sottolineano la potenziale applicazione del metodo semi-stazionario per prevedere il fabbisogno energetico, anche se gli strumenti dinamici sono più affidabili ma molto più complessi e finalizzati a una progettazione avanzata. Le maggiori differenze ottenute dai due metodi riguardano l'impatto dei guadagni termici solari sul fabbisogno complessivo di riscaldamento sia a livello di singolo edificio che di quartiere.

I diversi risultati degli strumenti hanno dato prova di una lacuna nell'uso dello strumento più semplice; tuttavia, l'approccio semi-stazionario applicato ha dimostrato precisione soprattutto nella parte di dispersione e di definizione geometrica e può essere considerato affidabile. Inoltre l'impiego di un minore sforzo di calcolo ne permette l'adozione anche da parte di utenti non professionali ma coinvolti nel processo di pianificazione urbana, soprattutto policy makers, tecnici urbanistici e amministrazioni pubbliche.

6.2. Calcolo del caso studio del quartiere di S. Marta a Venezia

Viene sviluppata un'analisi energetica dello stato di fatto degli edifici del quartiere di S. Marta per determinarne la richiesta di energia termica ed elettrica. Successivamente si applica la metodologia di cost-optimal, individuando diversi scenari di intervento che vengono verificati attraverso simulazioni al fine di individuare la soluzione più conveniente.

Lo studio individua diversi interventi di miglioramento delle prestazioni energetiche nei componenti edilizi dell'involucro (muro esterno, copertura, basamento, serramento) e nel sistema impiantistico considerando diversi vettori energetici (gas naturale, corrente elettrica, biomassa) e diverse soluzioni tecnologiche, considerando anche l'applicazione di sistemi da fonti di energia rinnovabile (solare termico e fotovoltaico).

Una parte di quanto esposto di seguito è in fase di elaborazione per la pubblicazione in [233] e in revisione per atti di convegno [234].

La metodologia del cost optimal presentata nei capitoli precedenti viene approfondita applicandola al caso studio del quartiere di Santa Marta a Venezia.

Gli obiettivi dell'analisi sono riconducibili a tematiche di feedback, validità e replicabilità.

Innanzitutto, il caso studio è stato individuato come caso pilota italiano per verificare la validità della metodologia proposta all'interno del progetto Annex 75. Il compito è quello di testare la procedura, applicare il workflow, fornire feedback alla comunità dei partecipanti, dichiarare e discutere i risultati ottenuti e infine rispondere alle questioni della ricerca che sono state individuate negli scopi del programma di ricerca.

Come già anticipato, il quartiere rappresenta una tipologia edilizia di case popolari che è molto diffusa sul territorio nazionale e le soluzioni proposte potranno sicuramente essere tarate almeno su contesti simili o almeno riproposte per edifici della stessa fascia climatica in Italia.

6.2.1. Il caso Reference

Il primo passo consiste nell'individuare il caso studio e descrivere lo stato di fatto, definito caso Reference, per calcolare i fabbisogni energetici del distretto.

Il settaggio del modello, il metodo di calcolo sono gli setti presentati nel capitolo precedente, dedicato alla taratura dei software. Tuttavia nelle simulazioni che vengono di seguito presentate sono evidenti alcune differenze di risultato, in quanto il settaggio predisposto nel confronto doveva tener conto anche delle caratteristiche dei software utilizzati.

Nello specifico il Reference presenta i dati ricavati dal rilievo e sondaggio operato in fase di analisi e pertanto le differenze applicate consistono nell'adozione di dati di input quali: percentuale di area finestrata (15%), consumo di ACS giornaliero pro-capite (40 l/ab), superficie climatizzata calcolata sulla superficie utile e non sulla footprint, trasmittanza delle pareti pari a 1.35 W/m²K, le infiltrazioni d'aria fissate costantemente a 0,3 ricambi d'aria all'ora, tasso di ventilazione minimo d'aria esterna per persona (8.3 l/s) e infine nel confronto non erano stati considerati due edifici corrispondenti ai mappali 137 e 3162b a causa delle dimensioni della particella non compatibili con EURECA.

Di seguito sono sintetizzati i parametri che descrivono il distretto (Tabella 14).

Tabella 14 – Parametri di calcolo per la tipologia di edifici nel quartiere

| <i>Parametro</i> | <i>Unità</i> | <i>tipologia di edificio</i> |
|--|-------------------------|------------------------------|
| Informazioni sull'edificio | | |
| numero di edifici per tipologia | | 54 |
| Periodo di costruzione | | 1920-1936 |
| Geometria | | |
| Superficie lorda del pavimento riscaldato (GHFA) | m ² | 58,605.96 |
| Superficie utile del pavimento riscaldato | m ² | 51,392.86 |
| Volume riscaldato | m ³ | 138,249.51 |
| Area della facciata inclusa la superficie delle finestre | m ² | 50,753.28 |
| Area del tetto se tetto a falde | m ² | 15,241.27 |
| La stanza sotto il tetto è riscaldata o no? | Si/No | Si |
| Area delle finestre a nord | m ² | 1,569.25 |
| Area delle finestre a est | m ² | 2,239.31 |
| Area delle finestre a sud | m ² | 1,571.48 |
| Area delle finestre a ovest | m ² | 2,232.96 |
| Numero di piani fuori terra | - | 1-5 |
| Uso | | |
| Tipo di utilizzo | | Residenziale |
| Superficie per occupante | m ² /persona | 30.45 |
| Temperatura interna di progetto per riscaldamento | °C | 20 |
| Consumo medio di elettricità (escluso riscaldamento, raffreddamento, ventilazione) | kWh/(m ² a) | 28 |
| Sistemi HVAC | | |
| Tipo di sistema di riscaldamento esistente (caldaia, pompa di calore, ...) | | Caldaia |
| Vettore energetico esistente (gas, elettricità, ecc.) | | Gas naturale |
| È installato un sistema di ventilazione senza recupero di calore? | Si/No | No |
| È installato un sistema di ventilazione con recupero di calore? | Si/No | No |
| Tasso di ventilazione | ach | 0.3 |
| Il sistema di raffreddamento è installato? | Si/No | No |
| Consumo di acqua calda | l/persona/giorno | 40 |

Simulazione del fabbisogno energetico annuale e determinazione della potenza di picco

Come già anticipato nel capitolo precedente è stata effettuata una procedura di simulazione in regime dinamico, nello specifico si fa riferimento alla modellazione tramite CEA.

In questo modo il calcolo determina su base oraria i fabbisogni energetici e le potenze di picco di ciascun edificio e quindi del quartiere.

Innanzitutto si determinano le prestazioni dell'involucro e si ricavano i valori di dispersioni e apporti termici.

Tabella 15 – Descrizione delle dispersioni e degli apporti termici per ciascun edificio

| <i>Particella Catastale</i> | <i>Scambio termico per trasmissione</i> <i>QH,tr [kWh]</i> | <i>Scambio termico per ventilazione</i> <i>QH,ve [kWh]</i> | <i>Guadagni interni</i> <i>Qint [kWh]</i> | <i>Guadagni solari</i> <i>Qsol [kWh]</i> |
|-----------------------------|---|---|--|---|
| <i>[-]</i> | | | | |
| 19 | 90,862 | 20,184 | 11,560 | 18,674 |
| 20 | 195,679 | 53,919 | 29,618 | 34,654 |
| 32 | 101,312 | 23,147 | 13,789 | 19,892 |
| 35 | 99,110 | 22,287 | 13,510 | 19,588 |
| 40 | 35,539 | 4,764 | 2,910 | 4,350 |
| 42 | 178,977 | 39,561 | 25,798 | 31,571 |
| 58 | 200,704 | 52,530 | 31,166 | 36,402 |
| 68 | 65,720 | 11,540 | 7,408 | 12,990 |
| 137 | 73,672 | 10,693 | 5,808 | 12,465 |
| 2619 | 113,421 | 27,095 | 23,841 | 22,196 |
| 2720 | 89,125 | 19,546 | 18,600 | 15,570 |
| 2841 | 201,587 | 57,750 | 29,552 | 36,455 |
| 2842 | 213,700 | 61,689 | 32,512 | 38,409 |
| 2843 | 200,651 | 57,368 | 29,472 | 36,325 |
| 2844 | 112,924 | 27,380 | 16,015 | 22,326 |
| 2845 | 112,979 | 27,423 | 16,031 | 22,329 |
| 2846 | 115,036 | 28,257 | 16,320 | 22,624 |
| 2847 | 111,732 | 26,936 | 15,856 | 22,146 |
| 2848 | 113,225 | 27,505 | 16,060 | 22,371 |
| 2849 | 113,467 | 27,619 | 16,100 | 22,398 |
| 2862 | 121,373 | 27,493 | 15,553 | 22,354 |
| 3147 | 97,209 | 21,586 | 10,847 | 17,834 |
| 3148 | 45,757 | 7,478 | 4,029 | 8,493 |
| 3151 | 146,340 | 35,955 | 24,408 | 31,745 |
| 3152 | 66,201 | 12,901 | 7,912 | 12,977 |
| 3153 | 125,011 | 30,662 | 19,021 | 26,009 |
| 3155 | 229,109 | 62,445 | 31,643 | 45,135 |
| 3160 | 103,236 | 20,409 | 12,258 | 22,445 |
| 3163 | 82,389 | 15,113 | 8,843 | 16,742 |
| 3314 | 247,729 | 66,867 | 38,842 | 46,478 |
| 3940 | 120,401 | 28,346 | 21,208 | 22,337 |
| 4105 | 135,914 | 34,530 | 20,810 | 27,024 |
| 2809a | 48,526 | 11,630 | 7,864 | 7,978 |
| 2809b | 113,373 | 26,254 | 17,445 | 22,099 |
| 2809c | 60,792 | 10,909 | 7,498 | 13,066 |
| 2809d | 106,709 | 24,473 | 14,184 | 20,924 |
| 30a | 141,982 | 32,552 | 22,116 | 27,810 |
| 30b | 118,937 | 29,698 | 15,100 | 25,802 |
| 30c | 227,468 | 57,663 | 39,036 | 42,564 |
| 3154a | 75,712 | 15,097 | 9,909 | 16,326 |
| 3154b | 54,078 | 9,653 | 5,132 | 11,135 |
| 3156a | 125,752 | 29,496 | 17,393 | 25,590 |
| 3156b | 67,664 | 11,249 | 7,136 | 13,638 |
| 3156c | 128,007 | 28,707 | 18,842 | 28,084 |

| Particella Catastale | Scambio termico per trasmissione QH_{tr} [kWh] | Scambio termico per ventilazione QH_{ve} [kWh] | Guadagni interni Q_{int} [kWh] | Guadagni solari Q_{sol} [kWh] |
|----------------------|---|---|-------------------------------------|------------------------------------|
| [-] | | | | |
| 3159a | 43,267 | 6,439 | 3,951 | 9,576 |
| 3159b | 56,866 | 12,838 | 7,835 | 13,616 |
| 3161a | 34,990 | 7,134 | 4,251 | 8,383 |
| 3161b | 47,630 | 11,037 | 6,436 | 9,083 |
| 3162a | 58,309 | 12,981 | 5,860 | 11,697 |
| 3162b | 10,275 | 1,052 | 765 | 2,214 |
| 3210a | 63,509 | 13,675 | 8,815 | 12,396 |
| 3210b | 136,295 | 34,631 | 24,551 | 23,952 |
| 3210c | 48,353 | 10,230 | 5,523 | 9,705 |
| 3210d | 151,300 | 35,599 | 23,525 | 29,599 |
| 19 | 90,862 | 20,184 | 11,560 | 18,674 |
| Totale | 5.98 GWh | 1.42 GWh | 0.86 GWh | 1.16 GWh |

Nello specifico è evidente che lo scambio termico per trasmissione sia il fattore più influente (Tabella 15), pertanto si ritiene utile approfondire le prestazioni di ciascun componente edilizio: parete, copertura, basamento e finestre.

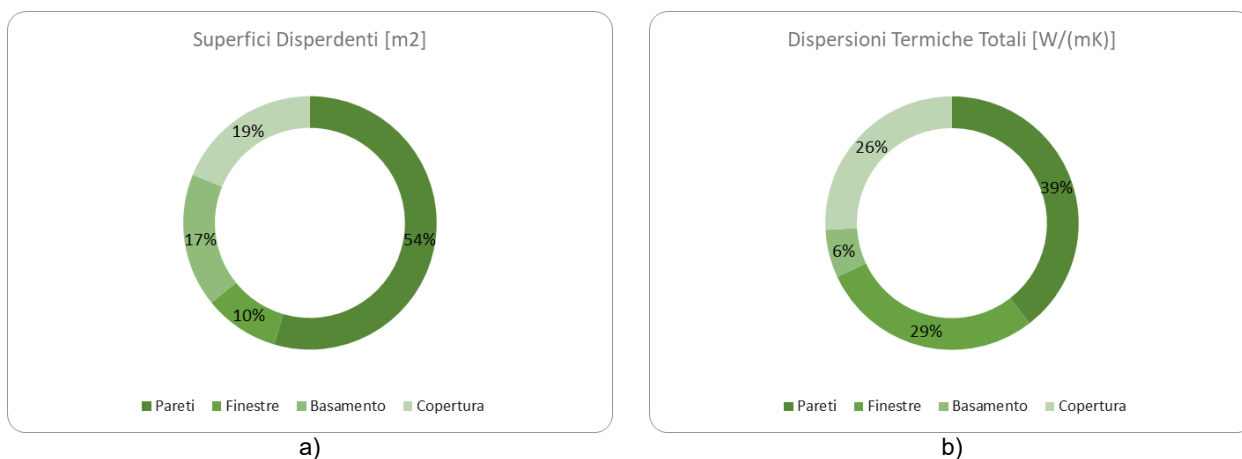


Figura 42 – Analisi dei componenti edilizi dello stato di fatto: a) distribuzione percentuale delle superfici disperdenti e b) delle dispersioni termiche

Considerando una superficie disperdente totale pari a 79,094.89 m² e considerando che il rapporto S/V medio degli edifici è pari a 0.25, risulta evidente (Figura 42) che le pareti verticali risultano l'elemento costruttivo più rilevante; al contempo considerando anche la tipologia e la stratigrafia dei componenti, le caratteristiche di resistenza termica sono piuttosto scarse e anche in questo caso le pareti risultano le superfici maggiormente influenti sulle prestazioni energetiche.

Questo dato porta in generale a valutare anche la strategia di intervento sui componenti e quindi il possibile ordine di priorità per intervenire sugli involucri edilizi. Ovviamente si tratta di una considerazione prettamente prestazione che va valutata in relazione ai costi e ai vincoli edilizi e sociali del contesto: nel caso di Venezia infatti gli edifici sono soggetti a tutela architettonica e a restrizioni dei regolamenti edilizi e delle prescrizioni della Sovrintendenza, pertanto è altamente complesso intervenire sulle facciate.

Si passa quindi al calcolo dei fabbisogni energetici annuali di riscaldamento, acqua calda sanitaria e energia elettrica per ciascun edificio (Tabella 16).

Tabella 16 – Descrizione dei fabbisogni energetici annuali di riscaldamento, acqua calda sanitaria e energia elettrica per ciascun edificio

| Particella Catastale [-] | Fabbisogno di Riscaldamento QH,nd [MWh] | Fabbisogno di ACS QW,nd [MWh] | Fabbisogno di Energia Elettrica QE,nd [MWh] |
|-----------------------------|--|----------------------------------|--|
| 19 | 130.91 | 24.28 | 19.64 |
| 20 | 321.36 | 55.81 | 56.20 |
| 32 | 153.98 | 29.71 | 24.25 |
| 35 | 150.34 | 28.97 | 23.35 |
| 40 | 39.33 | 4.13 | 4.12 |
| 42 | 266.76 | 44.15 | 40.80 |
| 58 | 320.85 | 57.52 | 55.55 |
| 68 | 89.44 | 15.17 | 12.45 |
| 2619 | 94.36 | 17.95 | 13.50 |
| 2720 | 196.13 | 36.76 | 35.34 |
| 2841 | 154.39 | 30.24 | 26.76 |
| 2842 | 319.71 | 55.83 | 55.94 |
| 2843 | 336.53 | 59.58 | 59.75 |
| 2844 | 320.36 | 55.82 | 55.56 |
| 2845 | 165.05 | 31.34 | 26.65 |
| 2846 | 167.24 | 32.03 | 26.68 |
| 2847 | 171.15 | 32.76 | 27.49 |
| 2848 | 164.95 | 31.26 | 26.21 |
| 2849 | 167.66 | 32.04 | 26.76 |
| 2862 | 166.48 | 32.02 | 26.88 |
| 3147 | 163.44 | 28.58 | 23.06 |
| 3148 | 134.51 | 24.16 | 20.11 |
| 3151 | 51.72 | 9.38 | 6.38 |
| 3152 | 220.70 | 38.06 | 35.11 |
| 3153 | 90.36 | 15.92 | 12.38 |
| 3155 | 181.14 | 32.16 | 27.12 |
| 3160 | 354.03 | 58.75 | 56.68 |
| 3163 | 142.59 | 21.47 | 19.46 |
| 3314 | 105.10 | 17.08 | 14.24 |
| 3940 | 393.32 | 65.87 | 65.54 |
| 4105 | 185.24 | 34.07 | 32.03 |
| 137-138 | 195.15 | 33.30 | 31.16 |
| 2809 a | 72.31 | 14.27 | 11.17 |
| 2809 b | 172.01 | 30.13 | 28.11 |
| 2809 c | 79.03 | 13.09 | 10.72 |
| 2809 d | 161.70 | 28.71 | 25.95 |
| 30 a | 217.37 | 35.45 | 33.41 |
| 30 b | 194.28 | 36.75 | 33.39 |
| 30 c | 373.99 | 60.83 | 62.77 |
| 3154 a | 108.72 | 19.01 | 15.56 |
| 3154 b | 67.35 | 12.45 | 8.53 |
| 3156 a | 185.46 | 30.79 | 28.27 |
| 3156 b | 88.52 | 14.79 | 11.11 |
| 3156 c | 187.51 | 30.79 | 28.91 |
| 3159 a | 49.78 | 9.18 | 6.07 |
| 3159 b | 84.86 | 15.41 | 13.19 |
| 3161 a | 46.18 | 10.05 | 6.69 |
| 3161 b | 71.72 | 13.85 | 10.87 |
| 3162 a | 83.56 | 15.04 | 12.39 |
| 3162 b | 10.85 | 2.94 | 1.03 |
| 3210 a | 89.97 | 17.90 | 14.12 |
| 3210 b | 220.71 | 40.03 | 38.28 |
| 3210 c | 68.34 | 13.25 | 10.31 |
| 3210 d | 230.79 | 39.40 | 37.39 |
| Totale | 8.98 GWha | 1.59 GWha | 1.44 GWha |
| Totale | 173.22 kWh/m² | 30.68 kWh/m² | 27.69 kWh/m² |

Per quanto riguarda il riscaldamento sono stati considerati anche i fattori correttivi per l'applicazione dei ponti termici. Per il calcolo di ACS è stato considerato un uso di riferimento pari a 60 litri al giorno per utente ed è stato applicato lo schema dei profili di uso residenziale come già evidenziato nei capitoli precedenti distribuiti secondo la norma EN 16798 [224]. Anche per la parte elettrica sono stati considerati gli stessi profili descritti in precedenza e corrispondono a circa 62.7 W/m² al giorno di consumo.

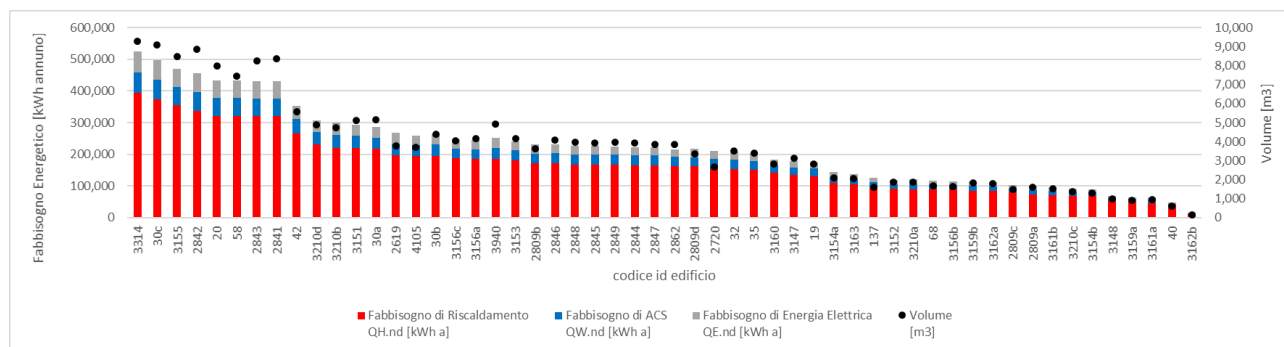


Figura 43 – Fabbisogni energetici (termici ed elettrici) annui in relazione al volume lordo dell'edificio

Come atteso il fabbisogno energetico degli edifici è in relazione al volume riscaldato o comunque strettamente correlato alle dimensioni della zona termica identificata (Figura 43). In analitico si possono considerare i valori calcolati in relazione alla superficie utile climatizzata per ciascun edificio (Figura 44): in media il fabbisogno di riscaldamento è pari a 186 kWh/m² annuo, 34 kWh/m² annuo per l'ACS e 28 kWh/m² annuo per la corrente elettrica.

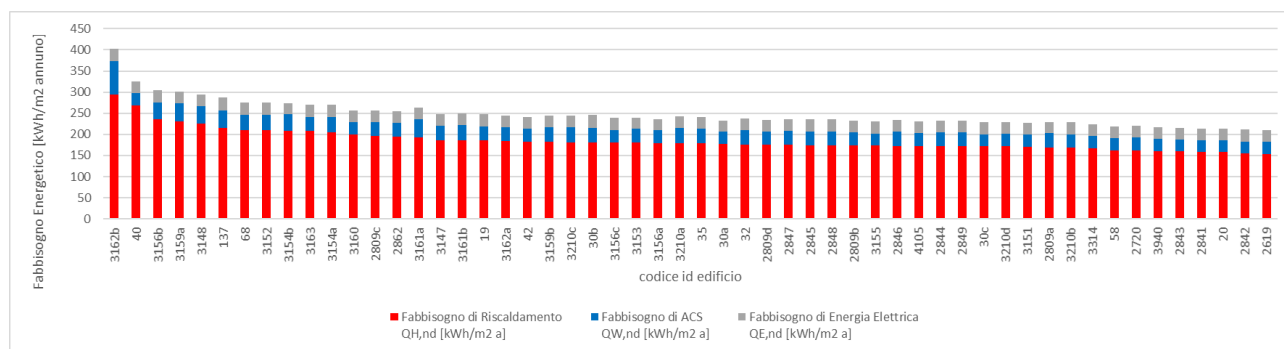


Figura 44 – Fabbisogni energetici (termici ed elettrici) per superficie climatizzata

I valori di fabbisogno di riscaldamento vanno opportunamente commentati. Dal grafico (Figura 44) si nota che un paio di edifici hanno valori quasi doppi rispetto alla media, ma si nota che corrispondono a edifici tra quelli con meno volume.

Inoltre come già evidenziato pur essendo edifici condominiale costruiti con medesime caratteristiche costruttive, presentano geometrie non decisamente standardizzate e inoltre si ribadisce che il calcolo tiene conto anche delle superficie adiabatiche e delle adiacenze tra edifici.

Per concludere l'analisi della domanda energetica si passa infine al calcolo dell'energia di picco, quindi la massima potenza richiesta dal quartiere durante l'anno (Tabella 17); nel grafico in Figura 45 sono riportati i valori decrescenti per ciascun edificio.

Tabella 17 – Descrizione del picco di energia annuale di riscaldamento, acqua calda sanitaria e energia elettrica per ciascun edificio

| <i>Particella Catastale</i> | <i>Energia di picco per Riscaldamento</i> <i>H,peak [kW]</i> | <i>Energia di picco per ACS</i> <i>W,peak [kW]</i> | <i>Energia di picco per Energia Elettrica</i> <i>E,peak [kW]</i> |
|-----------------------------|---|---|---|
| 19 | 97 | 7 | 9 |
| 20 | 236 | 15 | 25 |
| 32 | 113 | 8 | 11 |
| 35 | 110 | 8 | 10 |
| 40 | 28 | 1 | 2 |
| 42 | 193 | 12 | 18 |
| 58 | 238 | 16 | 25 |
| 68 | 66 | 4 | 6 |
| 137 | 71 | 5 | 6 |
| 2619 | 143 | 10 | 16 |
| 2720 | 111 | 8 | 12 |
| 2841 | 238 | 15 | 25 |
| 2842 | 252 | 16 | 27 |
| 2843 | 237 | 15 | 25 |
| 2844 | 124 | 9 | 12 |
| 2845 | 124 | 9 | 12 |
| 2846 | 127 | 9 | 12 |
| 2847 | 123 | 9 | 12 |
| 2848 | 125 | 9 | 12 |
| 2849 | 125 | 9 | 12 |
| 2862 | 121 | 8 | 10 |
| 3147 | 100 | 6 | 9 |
| 3148 | 39 | 2 | 3 |
| 3151 | 163 | 10 | 16 |
| 3152 | 66 | 4 | 6 |
| 3153 | 133 | 9 | 12 |
| 3155 | 258 | 16 | 25 |
| 3160 | 103 | 6 | 9 |
| 3163 | 78 | 5 | 6 |
| 3314 | 287 | 18 | 29 |
| 3940 | 139 | 9 | 14 |
| 4105 | 147 | 9 | 14 |
| 2809a | 53 | 4 | 5 |
| 2809b | 128 | 8 | 13 |
| 2809c | 58 | 3 | 5 |
| 2809d | 119 | 8 | 12 |
| 30a | 157 | 10 | 15 |
| 30b | 143 | 10 | 15 |
| 30c | 270 | 16 | 28 |
| 3154a | 79 | 5 | 7 |
| 3154b | 50 | 3 | 4 |
| 3156a | 135 | 8 | 13 |
| 3156b | 63 | 4 | 5 |
| 3156c | 139 | 8 | 13 |
| 3159a | 37 | 2 | 3 |
| 3159b | 63 | 4 | 6 |
| 3161a | 35 | 3 | 3 |
| 3161b | 52 | 4 | 5 |
| 3162a | 62 | 4 | 6 |
| 3162b | 8 | 1 | 0 |
| 3210a | 67 | 5 | 6 |
| 3210b | 163 | 11 | 17 |
| 3210c | 51 | 3 | 5 |
| 3210d | 170 | 11 | 17 |
| Totale | 6,612 | 429 | 640 |

Anche per questo dato va considerato il valore complessivo del picco termico che è pari a circa 5 MW di potenza richiesta, dato che tornerà utile per il dimensionamento nel caso di impianti di reti centralizzate.

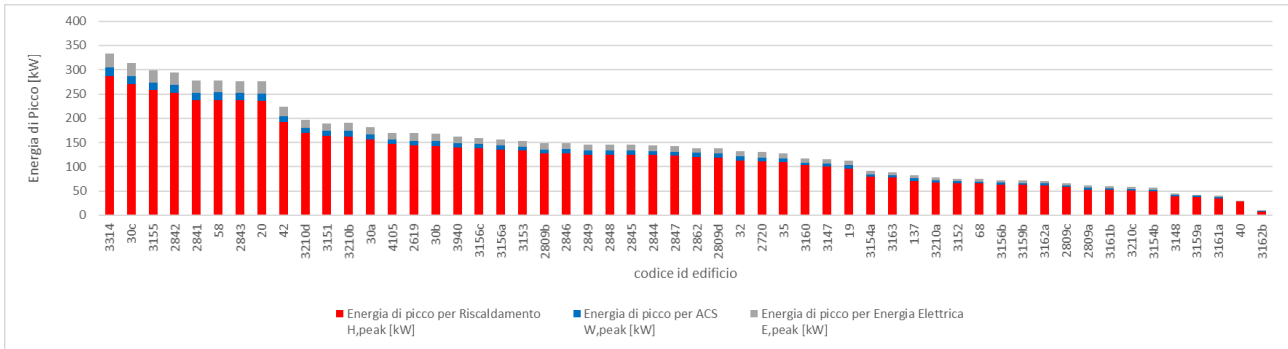


Figura 45 – Energia di picco annua distribuita per ciascun edificio

Tuttavia una migliore valutazione sul dimensionamento va fatta considerando un grafico che mostra la curva di carico di potenza per riscaldamento e ACS richiesta durante l'anno (Figura 46): valutando solo metà durata, che corrisponde al periodo invernale si può notare infatti che la potenza massima è richiesta solo per una breve tempo e che la maggior parte del tempo (range 50-80%) la potenza richiesta risulta quasi dimezzata rispetto alla massima, e ciò significa che la taglia di un impianto può essere ridotta o comunque si possono considerare anche sistemi ausiliari per la gestione delle situazioni di picco.

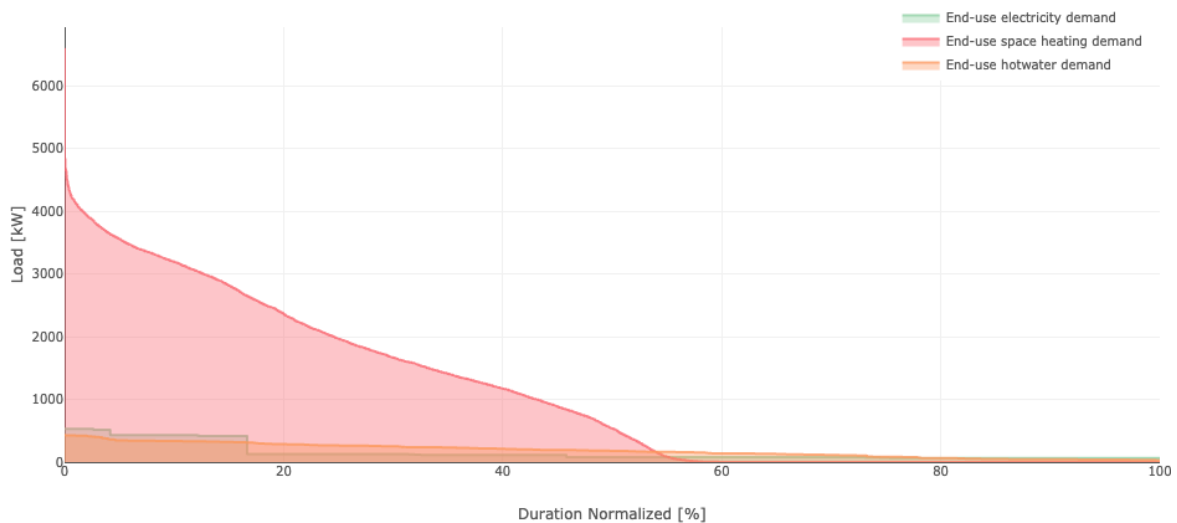


Figura 46 – Carico di potenza richiesto durante l'anno dal quartiere.

Infatti come ultima nota va considerato che il periodo in cui si verificano i picchi sono quelli rigidi del periodo invernale, in questo caso nel mese di gennaio secondo i dati del file climatico adottato.

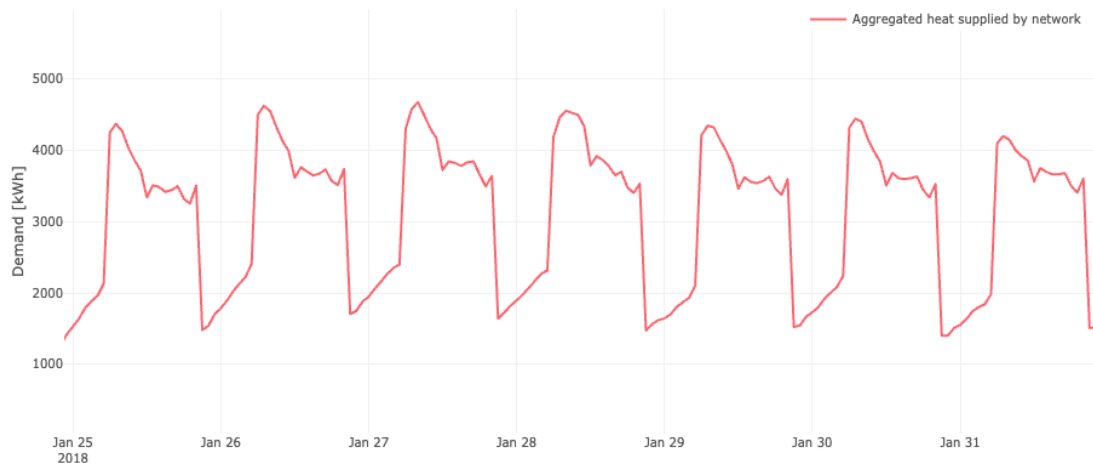


Figura 47 – Distribuzione dei picchi in una settimana tipo del periodo invernale.

Nel grafico riportato in Figura 47 si può vedere la curva di richiesta di energia per tutto il quartiere in una settimana invernale. Si evidenzia come per questo caso studio le prime ore del giorno corrispondano ai momenti della giornata in cui gli edifici richiedono più energia in relazione alla destinazione d'uso degli stessi e alle attività degli utenti.

6.2.2. Definizione dello schema di interventi di riqualificazione

La Figura 48 mostra lo schema di combinazioni di interventi di riqualificazione per il caso studio.

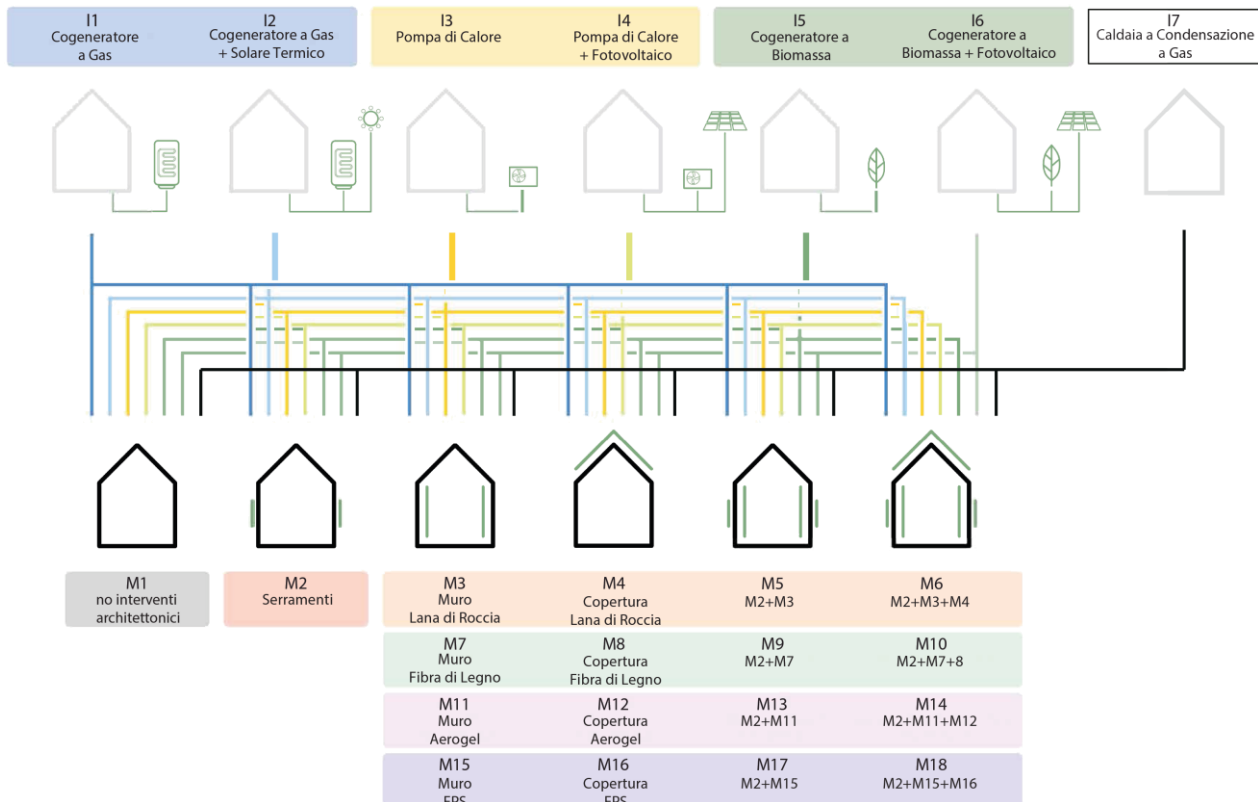


Figura 48 – Schema delle combinazioni di intervento adottate per il caso studio.

Si tratta di misure di intervento su involucro, codice alfanumerico M, che si applicano ai componenti edilizi (serramenti, muri esterni, copertura) da soli o in combinazione tra loro. Le varie soluzioni prevedono la medesima prestazione termica (ovvero sono definiti con trasmittanza termica equivalente) e lo stesso tipo di intervento, ovvero si tratta di sostituzione dei serramenti, intervento di isolamento a cappotto sulle pareti verticali e isolamento della copertura. La differenza riguarda l'impiego di diverso materiale isolante: lana di roccia, fibra di legno, aerogel ed EPS (polistirene espanso sinterizzato).

Si precisa che la misura M1 corrisponde all'intervento "anyway renovation" definito nella metodologia: è il caso che corrisponde allo stato di fatto in cui viene sostituito l'impianto di riscaldamento con uno di prestazione simile, ovvero corrisponde al caso in cui vengono considerati i costi globali ma non il miglioramento di efficienza energetica: quindi le performance energetiche rimangono inalterate e si valutano i costi di manutenzione ordinaria.

Ciascuna misura nell'involucro viene confrontata con l'intervento di sostituzione della parte impiantistica (codice alfanumerico I) per riscaldamento negli edifici nel quartiere. Due tipologie impiantistiche principali sono adottate, centralizzata e decentralizzata: la prima considera tre diversi vettori energetici (gas naturale, energia elettrica e biomassa) su cogeneratore (CHP, Combined Heat and Power) o pompa di calore, la seconda invece si limita alla sostituzione dell'impianto esistente negli edifici e/o negli alloggi con un impianto simile ma più performante, ovvero una caldaia a condensazione a gas naturale. Le soluzioni centralizzate comprendono anche l'abbinamento con sistemi con fonti di energia rinnovabile, in questo caso solare termico e fotovoltaico.

Lo schema complessivo consiste quindi nella verifica di circa 126 combinazioni di intervento per le quali saranno ricavati i risultati di energia primaria, emissioni di CO₂ e costi globali. I prossimi capitoli descrivono in analitico gli interventi selezionati.

6.2.3. Definizione degli interventi architettonici

Limiti normativi per i valori ammissibili di trasmittanza termica

Dopo aver analizzato lo stato di fatto del quartiere di Santa Marta, il caso Reference, sono evidenti le caratteristiche e le performance energetiche degli edifici, o meglio delle tipologie edilizie e costruttive individuate. Queste informazioni permettono di individuare i possibili interventi di riqualificazione degli edifici e le possibili strategie per migliorare il livello di efficienza energetica.

Gli obiettivi di questa analisi consistono nell'individuare e testare diverse soluzioni che permettano comunque di adempiere ai requisiti di legge fissati nel Decreto Minimi [51]. Nello specifico le trasmittanze termiche per gli edifici esistenti in relazione alla zona climatica sono come definito in Figura 49.

Pertanto per la riqualificazione del quartiere di Santa Marta gli interventi che verranno proposti dovranno attenersi a quanto espresso per la zona climatica E, ma per questa ricerca vengono adottati valori ancora più restrittivi in previsione di una possibile adesione a programmi di sovvenzione come il Conto Termico o a bonus fiscali come il Bonus 110 [235]. I valori adottati sono quindi: trasmittanza termica inferiore o pari a 0.25 W/m²K per le pareti perimetrali, a 0.20 W/m²K per le coperture; a 0.27 W/m²K per i basamenti; a 1.00 W/m²K per gli infissi.

| TABELLA 1 (Appendice B) Strutture opache verticali, verso l'esterno soggette a riqualificazione | | |
|---|--|---------------------|
| Zona climatica | U _{limite} [W/m ² K] | |
| | Dal 1° ottobre 2015 | Dal 1° gennaio 2021 |
| A-B | 0,45 | 0,40 |
| C | 0,40 | 0,36 |
| D | 0,36 | 0,32 |
| E | 0,30 | 0,28 |
| F | 0,28 | 0,26 |

| TABELLA 2 (Appendice B) Strutture opache orizz. o inclinate di copertura, verso l'esterno in riqal. | | |
|---|--|---------------------|
| Zona climatica | U _{limite} [W/m ² K] | |
| | Dal 1° ottobre 2015 | Dal 1° gennaio 2021 |
| A-B | 0,34 | 0,32 |
| C | 0,34 | 0,32 |
| D | 0,28 | 0,26 |
| E | 0,26 | 0,24 |
| F | 0,24 | 0,22 |

| TABELLA 3 (Appendice B) Strutture opache orizzontali di pavimento, verso l'ext. soggette a riqualificazione | | |
|---|--|---------------------|
| Zona climatica | U _{limite} [W/m ² K] | |
| | Dal 1° ottobre 2015 | Dal 1° gennaio 2021 |
| A-B | 0,48 | 0,42 |
| C | 0,42 | 0,38 |
| D | 0,36 | 0,32 |
| E | 0,31 | 0,29 |
| F | 0,30 | 0,28 |

| TABELLA 4 (Appendice B) Chiusure tecniche trasparenti e opache, cassonetti, con gli infissi, verso l'ext. e ambienti non climatiz. in riqualificazione | | |
|--|--|---------------------|
| Zona climatica | U _{limite} [W/m ² K] | |
| | Dal 1° ottobre 2015 | Dal 1° gennaio 2021 |
| A-B | 3,20 | 3,00 |
| C | 2,40 | 2,00 |
| D | 2,10 | 1,80 |
| E | 1,90 | 1,40 |
| F | 1,70 | 1,00 |

Figura 49 – Trasmittanze termiche limite per edifici esistenti come da Decreto Minimi.

Definizione dei materiali di intervento

In questa sezione si descrive la selezione di materiali isolanti applicate nelle misure di intervento. Il criterio adottato è stato quello di avere una panoramica sulle principali tipologie e valutarne: dimensionamento (ovvero spessore e quantità da impiegare al fine dei requisiti termici), prestazione energetica, convenienza e impatto ambientale. Sono descritti di seguito i quattro materiali analizzati.

Il primo materiale considerato è la lana di roccia. La scelta è stata dettata dal fatto che questo isolante è un prodotto molto diffuso e utilizzato frequentemente nella realizzazione di edifici con obiettivi di sostenibilità. È riciclabile e gli scarti della produzione sono per la maggior parte riciclati nel corso del processo produttivo. In termini di isolamento consente di risparmiare una quantità di energia oltre cento volte superiore a quella utilizzata per produrla. L'unico svantaggio riscontrabile di questo prodotto è la necessità di spessori importanti per avere prestazioni elevate a livello di trasmittanza.

Il secondo materiale proposto è la fibra di legno, un materiale ecologico ed adatto a molteplici utilizzi, viene infatti frequentemente usato nella costruzione di tramezze interne per isolamento acustico. Nel caso proposto rappresenta un'alternativa molto simile alla lana di roccia visto che entrambi sono materiali ecologici e che per raggiungere alte prestazioni termiche necessitano di spessori notevoli, ma diventa competitivo per il basso valore di costo.

Il terzo materiale è l'aerogel, un prodotto utilizzato frequentemente nelle riqualificazioni per risolvere e correggere ponti termici in punti in cui è necessario mantenere uno spessore di isolamento limitato. I pannelli in aerogel sono composti da una matrice di supporto in fibra minerale, rasabile, permeabile al vapore specifico e adatta per rivestimenti a cappotto interno ed esterno. Rappresenta un'ottima soluzione in termini di rapporto spessore/efficienza, ma data la sua prestazione, rispetto ai materiali precedenti risulta essere molto più costoso.

Il quarto materiale è il polistirene espanso sinterizzato (EPS), che rappresenta uno dei più noti e diffusi isolanti. È un materiale organico sintetico, ossia un prodotto di origine naturale che viene trattato con processi di produzione di tipo artificiale, con struttura cellulare. Presenta ottimi valori di conducibilità termica (quasi tutti inferiori allo 0.05 W/m K) ed elevata resistenza alla diffusione del vapore; L'EPS è resistente all'umidità e all'acqua: è permeabile al vapore acqueo, quindi traspirante, ma è impermeabile all'acqua. Le lastre che hanno densità fra i 30 e 50 kg/m³ presentano inoltre valori ottimali di conducibilità termica.

Strategie di intervento

Dopo aver definito i parametri limite e i materiali da utilizzare vengono definite le strategie da adottare per la riqualificazione degli edifici del quartiere.

In primo luogo bisogna soffermarsi sull'analisi di quali interventi sono attuabili nel contesto veneziano. Bisogna considerare che l'ambiente della città lagunare esige che i prospetti esterni degli edifici rimangano invariati. Quindi gli interventi devono essere applicati con cognizione delle eventuali modifiche sulle finiture esterne.

Per quanto riguarda le pareti sarebbe impensabile proporre un cappotto esterno, di fatto così facendo si andrebbe a coprire interamente l'edificio nascondendo la struttura in mattoni di interesse storico. Resta quindi la sola opzione di installare un cappotto interno a discapito di una riduzione della superficie utile interna se applicato con materiali meno performanti.

Considerando le facciate, hanno un grande impatto anche le finestre che ad oggi rispecchiano le caratteristiche tradizionali con infissi in legno e vetro singolo. La soluzione adottata sarà quindi l'installazione di infissi in legno con un triplo vetro composto da doppia camera con gas e trattamento basso-emissivo per garantire alte prestazioni mantenendo invariata l'estetica.

Molto più semplice è la soluzione da adottare per la copertura in coppi che permette di nascondere completamente l'applicazione di un cappotto esterno. In questo modo non si va ad influire in alcun caso sull'estetica dei tetti veneziani.

Infine bisogna considerare il basamento contro terra. Questo tipo di intervento di per sé molto invasivo non causa solo un'alterazione delle pavimentazioni spesso originali, ma nel contesto veneziano, dove le altezze interne sono di fatto già molto inferiori ai limiti definiti dalle normative, l'applicazione di un isolamento a pavimento andrebbe ad abbassare ulteriormente l'altezza interna. Per questo motivo nell'analisi qui condotta non verranno effettuate riqualificazioni del basamento.

In base a quanto descritto Figura 42, vengono definite le priorità di intervento sui componenti edilizi.

Il primo intervento considerato coinvolge la sostituzione dei serramenti perché risulta piuttosto economico a fronte di un indice di prestazioni termiche decisamente inferiore ai componenti opachi.

Il secondo intervento coinvolge le pareti esterne che sono caratterizzate dalla maggior superficie disperdente e quindi principali responsabili dell'efficienza energetica degli edifici.

Infine la copertura ha un'incidenza maggiore ma viene considerata anche in virtù del fatto che l'implicazione dell'impiantistica di FER coinvolge sicuramente anche una manutenzione dei tetti.

Gli altri interventi sono combinazioni dei precedenti, ovvero misure di interventi che analizzano isolamento di pareti, copertura e sostituzioni di serramenti, come meglio descritto successivamente.

Tabella 18 – Riepilogo delle misure di intervento su involucro con prestazioni del componente edilizio e costi di investimento e manutenzione in funzione del tipo di materiale isolante selezionato. Per l'intervento nell'involucro trasparente è da intendersi un'unica tipologia con telaio in legno e vetro triplo bassoemissivo. Il ciclo di vita utile (service life) è da intendersi di 30 anni. Le unità di misura di costo sono costi globali attualizzati e sono riferiti alla superficie totale di ciascun componente edilizio.

| Parametro | Unità di misura | Reference | Lana di roccia | Fibra di legno | Aerogel | EPS |
|-----------------------------|-------------------------|-----------|----------------|----------------|---------|--------|
| PARETI | | | | | | |
| Valori trasmittanza termica | W/m ² K | 1.71 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| Costi di investimento | EUR/m ² | | 66.38 | 67.02 | 344.71 | 38.93 |
| Costi di manutenzione | EUR/m ² anno | 1.27 | 1.70 | 1.71 | 3.52 | 1.52 |
| COPERTURA | | | | | | |
| Valori trasmittanza termica | W/m ² K | 2.70 | 0.20 | 0.20 | 0.2 | 0.20 |
| Costi di investimento | EUR/m ² | | 114.77 | 139.70 | 442.13 | 119.94 |
| Costi di manutenzione | EUR/m ² anno | 2.09 | 2.84 | 3.00 | 4.98 | 2.87 |
| | Unità di misura | Reference | Nuovo | | | |
| SERRAMENTI | | | | | | |
| Valori trasmittanza termica | W/m ² K | 5.80 | 1.00 | | | |
| Costi di investimento | EUR/m ² | | 333.80 | | | |
| Costi di manutenzione | EUR/m ² anno | 1.60 | 3.78 | | | |

In Tabella 18 sono riepilogati infine i parametri utili per definire gli interventi i materiali usati in relazione a costi e prestazioni termiche.

6.2.1. Definizione degli interventi impiantistici

Come già anticipato la situazione impiantistica allo stato attuale è caratterizzata da una tipologia consolidata e che risale alla costruzione del quartiere: si tratta di un sistema tradizionale con generatore a gas naturale (condominiale o per singolo appartamento), radiatori nelle zone termiche e con rendimento totale pari a 80%. Il raffrescamento è presente solo a livello di singolo appartamento e l'ACS è prodotta da boiler elettrici per ciascun appartamento.

Le misure di intervento impiantistico adottate sono focalizzate sul riscaldamento, ACS, utilizzo FER e prevedono la sostituzione del generatore, mentre la situazione attuale a livello di emissione e distribuzione rimane inalterata.

Andando in analitico si descrive l'approccio adottato nella definizione degli interventi.

La scelta di mantenere i radiatori e le relative tubazioni esistenti è motivata da una serie di ragionamenti. Innanzitutto lo schema di interventi previsto segue un approccio parametrico, ovvero le combinazioni previste sono di tipo additivo per quanto riguarda le performance energetiche, mentre in questo caso si tratterebbe di sola sostituzione dei radiatori, con alta incidenza a livello di costi. Infatti la sostituzione della tubazione avrebbe una notevole incidenza dei costi di realizzazione e di gestione in quanto comporterebbe una serie di lavorazioni di demolizioni e integrazioni sull'involucro.

Inoltre la sostituzione dei radiatori sarebbe effettuata con altro tipo di terminali più efficienti e performanti, quali sistema radiante a pavimento oppure sistema a ventilazione meccanica, i quali comporterebbero altre lavorazioni architettoniche di inserimento sulle partizioni orizzontali (pavimento e controsoffitto) con relative difficoltà di adeguamento e osservazione delle prescrizioni dei regolamenti comunali e di standard abitativi.

Queste lavorazioni inoltre avrebbero una conseguenza anche sulla gestione del cantiere in quanto non possono essere effettuate finché gli ambienti sono abitati o occupati dagli utenti e si è già rilevato in fase di analisi dei progetti europei che questo aspetto rientra nelle problematiche della riqualificazione di quartiere. Il mantenimento della situazione impiantistica attuale permette di intervenire sui generatori, mantenendo gli attuali come sistemi ausiliari di backup.

Infatti la scelta di intervenire sul solo generatore è motivata dall'analisi della curva di carico di riscaldamento del sistema attuale. Come anticipato nel caso del quartiere di Santa Marta (ma il ragionamento è estendibile ad altre situazioni simili) il picco di potenza viene richiesto un periodo ristretto, mentre per almeno la metà del periodo di esercizio invernale la potenza richiesta è metà del picco.

È possibile quindi dimensionare la centrale di riscaldamento per soddisfare picchi di media entità sufficienti a sopperire la richiesta di energia per lunghi periodi: ciò significa diminuire i consumi, dato che una centrale meno potente consuma di conseguenza meno energia, e utilizzare le caldaie domestiche già presenti solo nel momento in cui la centrale di base non riesce a soddisfare il picco di energia richiesto. In conclusione, si otterrà un impianto che svolge lavoro autonomo per una considerevole durata annuale di tempo e che solo per piccoli periodi viene affiancata dalle caldaie esistenti.

Come anticipato la selezione impiantistica è stata effettuata per valutare la convenienza tra due tipologie (centralizzata e decentralizzata) combinate con diversi vettori energetici (gas naturale, energia elettrica e biomassa), pertanto è possibile analizzare parametri come consumi di energia primaria, differenze di rendimento energetico e costi di installazione e gestione di alcuni tipi di generatori.

Per tale motivo vengono selezionati quattro tipologie di impianto principali.

La prima tipologia (I1) consiste nell'installazione di un impianto decentralizzato di teleriscaldamento con cogeneratore a gas naturale, scelta motivata dalla disponibilità della rete impiantistica di approvvigionamento che alimenta di fatto il contesto veneziano. Si tratta di una soluzione assolutamente attuabile data la presenza di un impianto analogo installato per la sede dell'università IUAV di Venezia, situato proprio nel quartier di Santa Marta.

La cogenerazione a gas metano è la produzione combinata di energia elettrica e termica a partire dallo stesso impianto alimentato a gas metano. I relativi benefit rispetto alla produzione separata consistono nella riduzione di combustibile e quindi nel risparmio economico e nella diminuzione di emissioni GHG. La cogenerazione a metano ha inoltre la particolarità di usare un combustibile pulito, che garantisce un funzionamento efficiente, minori manutenzioni e lunga durata degli impianti di cogenerazione. In Italia il metano rappresenta il combustibile maggiormente reperibile, e quindi la cogenerazione a gas naturale è la soluzione più pratica e flessibile, abbinata alla possibilità di diverse taglie e bassi costi d'installazione. Questa soluzione d'intervento si integra in contesti urbani e architettonici delicati come Venezia e a stringenti norme riguardanti lo scarico dei fumi.

Come seconda tipologia viene selezionato il sistema a una pompa di calore da fonte geotermica (13), che utilizzano il calore della terra come fonte di energia primaria, con collettori di terra o sonde di terra. Consiste nell'usare il fluido geotermico per scaldare direttamente, tramite degli scambiatori di calore, l'acqua circolante nei corpi scaldanti (radiatori, termoconvettori o pannelli radianti) dell'impianto di riscaldamento delle abitazioni, passando per sottostazioni. In questo caso sono rilevanti benefit come il risparmio di combustibile fossile e il minore inquinamento dell'aria. Tale tecnologia permette di realizzare un impianto alimentato completamente a corrente elettrica, ma si consideri che, a differenza dei cogeneratori dove avviene la coproduzione di energia termica ed elettrica, la pompa di calore diventa una strategia efficiente nel momento in cui è associata ad un impianto che produca elettricità da fonti rinnovabili (come pannelli fotovoltaici).

Il terzo impianto adottato è rappresentato da un cogeneratore alimentato a biomassa solida (15), nello specifico alimentato con cippato (scarti da lavorazioni del legno da segherie o altri processi). Questa proposta rappresenta un'ottima soluzione in quanto la biomassa è un prodotto per definizione ecosostenibile, conveniente se utilizzato in luoghi dove la produzione di scarti legnosi è modesta e la materia non debba essere trasportata per lunghe distanze. Una centrale biomassa è una centrale elettrica e/o termica che per il suo funzionamento utilizza l'energia ricavabile da materia organica senza trasformazione della stessa attraverso processi biochimici o chimici. La biomassa, ha lo svantaggio di avere un contenuto energetico basso per quantità di volume. Inoltre, è difficile fare in modo che la combustione nella biomassa sia completa, sfruttando totalmente il potenziale energetico. Questo avviene in parte perché la biomassa ha una composizione complessa, e in parte perché contiene umidità che è costosa in termini energetici da eliminare. Nel caso di Venezia questa diventa un'alternativa poco realistica per le difficoltà evidenti del trasporto del combustibile sul luogo di utilizzo e per la richiesta di volumi per lo stoccaggio.

Le tecnologie descritte vengono combinate con altri due sistemi che comportino l'utilizzo di fonti rinnovabili per ridurre i consumi di energia primaria finale, nonché diminuire ulteriormente l'impatto energetico dell'impianto stesso. Vengono abbinati quindi un impianto solare termico all'impianto con cogenerazione a gas (12) e un impianto fotovoltaico a quello con pompa di calore (14) e con cogenerazione a biomassa (16). Nel primo caso l'impianto solare termico è finalizzato alla riduzione della richiesta di ACS all'impianto principale, mentre nel secondo caso il fotovoltaico integra la fornitura di energia elettrica prodotta dal cogeneratore diminuendo quindi la richiesta alla rete elettrica. Per l'applicazione del caso studio viene considerato una particolare tecnologia che ha sviluppato un pannello fotovoltaico applicato ai coppi tradizionali. Il funzionamento dei moduli si basa sul principio della bassa densità molecolare. Ciascun modulo è formato con un composto polimerico atossico e riciclabile, che viene appositamente lavorato per incentivare l'assorbimento dei fotoni. All'interno del modulo sono incorporate delle normali celle di silicio monocristallino. La superficie, opaca alla vista e trasparente per i raggi solari, permette la captazione della radiazione solare. Questa soluzione tecnologica rende facile e rapida l'eventuale sostituzione del coppo e inoltre è integrabile in contesti tutelati.

Infine, come indicato dalla metodologia, viene analizzata un'altra soluzione impiantistica che consiste nella sostituzione dell'attuale generatore nei singoli appartamenti o condomini con un altro della medesima tipologia, ovvero l'installazione di un generatore a condensazione (17) a gas naturale che ovviamente ha rendimenti migliori dell'esistente.

Di seguito si riporta una classificazione degli impianti sopra descritti, con riferimenti alle prestazioni e costi delle macchine, e la nomenclatura delle combinazioni che verranno applicate al caso studio. Si precisa che i costi di investimento degli impianti sono stati basati sui costi parametrici indicati dal MiTE (Ministro della Transizione Ecologica) per l'attuazione della MISURA 3 - Sistemi di teleriscaldamento del PNRR. Per la partecipazione ai bandi pubblici, infatti, sono stati fissati i costi d'impianto di produzione in relazione alla tecnologia di generazione e dalla taglia. Per questo studio tali costi sono stati successivamente aggiornati e tarati con il prezzario della Regione Veneto [190].

Tabella 19 – Riepilogo delle misure di intervento su impianto con dimensionamento e costi riferiti ai fabbisogni calcolati per ogni scenario di intervento su involucro.

| Parametro | Unità | Ref | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 | Scenario 4 | Scenario 5 |
|--|------------------|--------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------|----------------|
| | | | sostituzione delle finestre | isolamento della facciata | isolamento della copertura | Scenario 1+2 | Scenario 1+2+3 |
| Sistema centralizzato cogenerazione a gas naturale | | | | | | | |
| Capacità | kWe | 2,241 | 1,810 | 1,717 | 1,797 | 1,375 | 1,012 |
| Costi di investimento | €/kW | 830 | | | | | |
| Costi di manutenzione | €/kW anno | 29 | | | | | |
| Service life | anni | 15 | | | | | |
| Sistema centralizzato pompa di calore geotermica | | | | | | | |
| Capacità | kW | 3,521 | 3,058 | 2,912 | 3,038 | 2,374 | 1,802 |
| Costi di investimento | €/kW | 1,100 | | | | | |
| Costi di manutenzione | €/kW anno | 28 | | | | | |
| Service life | anni | 20 | | | | | |
| Sistema centralizzato cogeneratore a biomassa | | | | | | | |
| Capacità | kWe | 604 | 524 | 499 | 521 | 407 | 309 |
| Costi di investimento | €/kW | 500 | | | | | |
| Costi di manutenzione | €/kW anno | 17 | | | | | |
| Service life | anni | 15 | | | | | |
| Sistema di riscaldamento decentralizzato (caldaie a gas naturale) | | | | | | | |
| Capacità | kWt | 8,350 | 7,620 | 7,325 | 7,600 | 5,730 | 4,325 |
| Costi di investimento | €/kW | 100 | | | | | |
| Costi di manutenzione | €/kW anno | 0.22 | | | | | |
| Service life | anni | 15 | | | | | |
| Sistema solare termico | | | | | | | |
| Dimensione | m ² | 2741 | | | | | |
| Costi di investimento | €/m ² | 428 | | | | | |
| Costi di manutenzione | €/anno pann | 15,657 | | | | | |
| Service life | anni | 20 | | | | | |
| Sistema fotovoltaico | | | | | | | |
| Dimensione | kWp | 1,197 | m ² | 13,717 | | | |
| Costi di investimento | €/kWp | 7,561 | €/m ² | 660 | | | |
| Costi di manutenzione | €/anno | 90,533 | €/m ² anno | 7 | | | |
| Service life | anni | 20 | | | | | |

In Tabella 19 sono riepilogati infine i parametri per riepilogare le caratteristiche degli impianti selezionati, indicandone dimensionamento e costi. Le voci in colonna sono collegate agli scenari di intervento per l'involucro e corrispondono a quanto segue: stato attuale (Reference), sostituzione delle finestre (Scenario 1), isolamento della facciata (Scenario 2), isolamento della copertura (Scenario 3), combinazione di sostituzione delle finestre e isolamento della facciata (Scenario 4), combinazione di sostituzione delle finestre e isolamento della facciata e del tetto (Scenario 5).

Le tecnologie adottate e oggetto di confronto fanno riferimento a soluzioni centralizzate di rete. Come anticipato nel capitolo introduttivo, i cambiamenti climatici hanno spinto infatti i responsabili decisionali in tutta Europa a comprendere le potenzialità della tecnologia di rete in quanto contribuisce ad aumentare l'efficienza energetica, a ridurre le emissioni di CO₂ e la dipendenza dai combustibili fossili nonché ad abbassare i costi di gestione.

I sistemi di teleriscaldamento esistenti, tuttavia, stanno invecchiando e non essendo più all'avanguardia, non sono efficienti. I sistemi di teleriscaldamento più diffusi, quelli appartenenti alla Terza Generazione (3GDH), sono caratterizzati da temperature d'esercizio nella rete tipicamente elevate di circa 80-90 °C e comportano perdite di calore significative. Studi recenti sostengono che la redditività economica delle infrastrutture DH tradizionali ad alta temperatura può essere compromessa dalla riduzione della domanda di riscaldamento dovuta al tasso di ristrutturazione del patrimonio edilizio esistente [239]. Per queste ragioni, la ricerca attuale si concentra sulle reti DHC di Quarta e Quinta Generazione, che possono raggiungere alte efficienze operando a basse temperature.

Attualmente lo stato dell'arte prevede l'uso di tecnologia di Quarta Generazione 4GDH, che si basa sul concetto di teleriscaldamento a bassa temperatura (LTDH) [240]. L'idea di base è la riduzione della temperatura di fornitura per abbattere le perdite di calore nella distribuzione e per permettere l'integrazione nella rete di fonti di calore a bassa temperatura come le energie rinnovabili e il calore residuo a bassa temperatura. L'evoluzione dei sistemi DH verso la LTDH è stata guidata dal trend di riduzione della domanda di calore che si prevede continuerà nei prossimi decenni grazie alla progressiva ristrutturazione degli edifici esistenti e all'alto rendimento energetico dei nuovi edifici [241].

Progetti dimostrativi condotti in diverse località hanno dimostrato l'efficacia e la competitività dei sistemi di teleriscaldamento a bassa temperatura sia per i nuovi edifici a basso consumo energetico [242] che per gli edifici esistenti [243]. Tuttavia, nei sistemi 4GDH, le stesse tubature non sono in grado di fornire simultaneamente servizi di riscaldamento e raffreddamento a diversi edifici.

Nell'ultimo decennio sono stati testati casi pilota e messi in funzione circa 40 sistemi di Quinta Generazione 5GDH, che operano a temperature "neutre" (ULTDH), ossia da 15 a 30 °C, portando alla riduzione di notevole di perdite di calore e consentendo anche la raccolta di calore residuo a bassa temperatura e di calore rinnovabile disponibile lungo i gasdotti [244].

L'aspetto più innovativo di queste reti è il modo in cui consentono a ciascun consumatore non solo di attingere energia dalla rete, ma anche di alimentarla dal proprio impianto di raffrescamento e refrigerazione. Per quanto riguarda la distribuzione delle reti nel sistema bidirezionale è innovativo perché permette all'utente al contempo l'estrazione e l'immissione di calore verso la rete e diventa fondamentale l'utilizzo di pompe di calore distribuite e installate nelle sottostazioni dei clienti [244].

L'utilizzo di pompe di calore reversibili per scambiare calore tra il gasdotto e il consumatore, permette di assorbire calore dalla rete quando necessario per riscaldare, e respingere il calore dall'aria condizionata alla rete, calore immesso che può quindi essere riutilizzato per il riscaldamento ambientale da altri consumatori.

Un benefit per queste soluzioni centralizzate riguarda l'installazione di accumulo di calore stagionale in aree urbane dove la disponibilità di spazio potrebbe compromettere l'installazione di scambiatori di calore a terra per pompe di calore geotermiche (GSHP) individuali. Inoltre, la combinazione e la simultaneità di diversi carichi di edifici aumenta la possibilità di riutilizzare l'energia termica in eccesso dai refrigeratori per il riscaldamento.

In casi studio nel Nord Europa il passaggio da reti LTDH a ULTDH ha dimostrato la validità in termini di efficienza energetica e attenzione per l'ambiente, portando a una riduzione dei costi globali e delle domanda di energia primaria [245,246].

Un recente studio [247] dimostra il sistema ULTHD con pompe di calore booster è già competitivo rispetto alle singole caldaie a gas a condizione che una fonte di calore locale a bassa temperatura possa essere recuperata con costi marginali minori.

Sempre in contesti di DHC italiani, di recente altri studi hanno proposto strategie di controllo per la gestione ottimale dei lati della domanda e dell'offerta della rete, comprese le strategie di spostamento del carico e la programmazione dei generatori di calore basata su problemi di ottimizzazione look-ahead. A Torino [248], lo studio descrive un modello di simulazione fisica per minimizzare il consumo di energia primaria delle centrali termiche riducendo il picco termico. A Verona [241], un modello di simulazione viene testato sulla rete e consiste in una strategia di spostamento del carico offerto dalla capacità termica del volume d'acqua racchiuso nelle tubazioni della rete. La temperatura media di ritorno viene aumentata prima del verificarsi del picco di carico, regolando la portata in base alla domanda di calore prevista per le ore successive. In questo modo il carico di picco termico è sia ridotto che spostato temporalmente, riducendo il consumo di energia primaria della principale stazione di fornitura di calore, di circa il 10%, e permette una gestione migliore soprattutto durante le mezze stagioni.

Altri studi recenti di casi studio monitorati e simulati portano a prospettive interessanti in caso di ristrutturazioni e installazioni di ULTDH. In un caso studio a Parma [249], simile a quello di Venezia, per esempio, combinando scenari che implicano lo spegnimento della fornitura in caso di assenza di domanda termica e la modulazione della temperatura di fornitura, i benefici derivanti sono il conseguente minor consumo energetico (energia termica fornita dalla centrale -3.54%) a fronte di un maggiore consumo elettrico per il pompaggio (+7.76%), e una riduzione dei costi operativi (-2.40%) delle perdite di calore dalla distribuzione (-22.38%) e delle emissioni di CO₂ (-3.02%). A livello gestionale è stata studiata una strategia stagionale esemplare, che prevede uno spegnimento della rete durante il periodo estivo di basso carico, evitando perdite nella distribuzione del calore. Questo studio dimostra che il ULTDH assicura un importante miglioramento dell'efficienza della distribuzione del calore, senza mostrare svantaggi economici rispetto al LTDH.

Definizione della rete di impianto centralizzato

Nel caso di impiantistica centralizzata è opportuno considerare anche la progettazione della rete di approvvigionamento e le relative sottostazioni.

Facendo riferimento alla modellazione in CEA, vengono quindi implementate le caratteristiche degli impianti selezionati e viene calcolato un modello di rete distrettuale. Il software è dotato di un algoritmo di ottimizzazione che elabora il percorso della rete in funzione della lunghezza più breve tra gli edifici; la posizione della centrale può essere elaborata automaticamente o essere definita dall'utente.



Figura 50 – Planimetria con la rete di distribuzione per impianto centralizzato, elaborazione CEA.

Per il caso studio del quartiere di Santa Marta la rete è definita come in Figura 50 e si estende per 1,782.72 m. La centrale principale è stata posizionata a est dell'area per una serie di motivazioni logistiche e di fattibilità: si tratta infatti di una vasta area portuale in cui sono presenti ancora la rete infrastrutturale di collegamento, ovvero rete viaria, tranviaria e marina con i relativi approdi, che sono ancora in uso e agevolerebbero lo stoccaggio e il trasporto in isola di materiali come biomassa. La progettazione e costruzione della centrale sarebbe agevolata dal fatto che la zona presenta una densità costruttiva ed è tuttora in via di riqualificazione urbana.

Oltre al dimensionamento della lunghezza in base al percorso, ciascun tratto di tubazione della rete viene dimensionato in funzione del fabbisogno energetico per riscaldamento e acqua calda sanitaria di ogni edificio (meglio ogni sottostazione). I parametri di lunghezza e diametro della rete influiscono sui costi di installazione. Nel caso in esame vengono applicati costi parametrici ricavati da letteratura e forniti da professionisti in materia, come riportato in Tabella 20.

Tabella 20 – Costi di realizzazione (fornitura e posa) della tubazione di rete, parametrizzata in funzione della lunghezza e del diametro del segmento.

| <i>Diametro [mm]</i> | <i>Costo al metro [€/m]</i> |
|--------------------------|---------------------------------|
| 20 | 100 |
| 25 | 114 |
| 32 | 123 |
| 40 | 133 |
| 50 | 145 |
| 65 | 226 |
| 80 | 361 |
| 100 | 415 |
| 125 | 471 |
| 150 | 517 |
| 200 | 620 |
| 250 | 700 |
| 300 | 775 |
| 350 | 930 |
| <i>media</i> | <i>402</i> |

A livello parametrico sono adottati anche i costi di installazione della sottostazione, 30% del costo totale di installazione della tubazione, e la manutenzione, valutata come il 10% del costo totale di tubature e rete per tutto il periodo di service life.

Pertanto il costo di una rete di impianto centralizzato è in funzione del minore lunghezza e del minore diametro, ovvero è in relazione alla densità degli edifici del quartiere e del fabbisogno energetico.

.....

.....

7. RISULTATI DEL CASO STUDIO

Questo capitolo considera il caso studio del quartiere di Santa Marta e ne valuta i risultati applicando la metodologia del progetto Annex75 per individuare gli interventi più convenienti ed efficienti in termini di consumo di energia primaria e costi globali in confronto alla situazione dello stato di fatto.

Una parte di quanto esposto di seguito è in fase di revisione per atti di convegno [234].

I risultati dell'applicazione della metodologia al caso studio vengono esposti in analitico.

7.1. Prestazioni energetiche

7.1.1. Interventi architettonici

Il calcolo in regime dinamico elaborato con modello in CEA ha permesso di simulare gli scenari sull'involucro architettonico degli edifici del quartiere (codice M), per i quali si possono valutare le prestazioni in termini di fabbisogno e consumo di energia primaria.

Tabella 21 – Settaggio trasmissioni termiche e calcolo del fabbisogno per riscaldamento in relazione agli interventi architettonici selezionati. Gli spazi vuoti delle trasmissioni termiche indicano che i valori rimangono quelli dello stato di fatto (Reference).

| Intervento | Descrizione | Finestre U [W/m ² K] | Pareti U [W/m ² K] | Copertura U [W/m ² K] | Fabbisogno per riscaldamento QH,nd [MWh/a] | Fabbisogno per ACS QW,nd [MWh/a] | Fabbisogno per elettricità QE,nd [MWh/a] |
|----------------------|--|---|---------------------------------------|--|--|--|--|
| Reference, M1 | nessun intervento edilizio | | | | 8,979.28 | 1,590.21 | 1,435.37 |
| M2 | sostituzione finestre | 1.00 | | | 7,571.35 | 1,587.96 | 1,430.41 |
| M3, M7, M11, M15 | isolamento parete esterna | | 0.25 | | 7,126.44 | 1,587.28 | 1,428.79 |
| M4, M8, M12, M16 | isolamento copertura | | | 0.20 | 7,993.38 | 1,588.46 | 1,432.15 |
| M5, M9, M13, M17 | sostituzione finestre e isolamento parete esterna | 1.00 | 0.25 | | 5,453.09 | 1,583.99 | 1,423.15 |
| M6, M10, M14, M18 | sostituzione finestre e isolamento parete esterna e isolamento copertura | 1.00 | 0.25 | 0.20 | 3,670.85 | 1,580.65 | 1,416.70 |

In Tabella 21 sono riepilogati i settaggi applicati e i risultati del fabbisogno. Si precisa che le prestazioni per acqua calda sanitaria ed energia elettrica rimangono inalterate, perché di fatto rimangono tali le abitudini degli utenti e i settaggi di modello, pertanto vengono confermati i valori di QW,nd minori di 1,590 MWh/a per ACS e QE,nd minori di 1,435 MWh/a di fabbisogno elettrico.

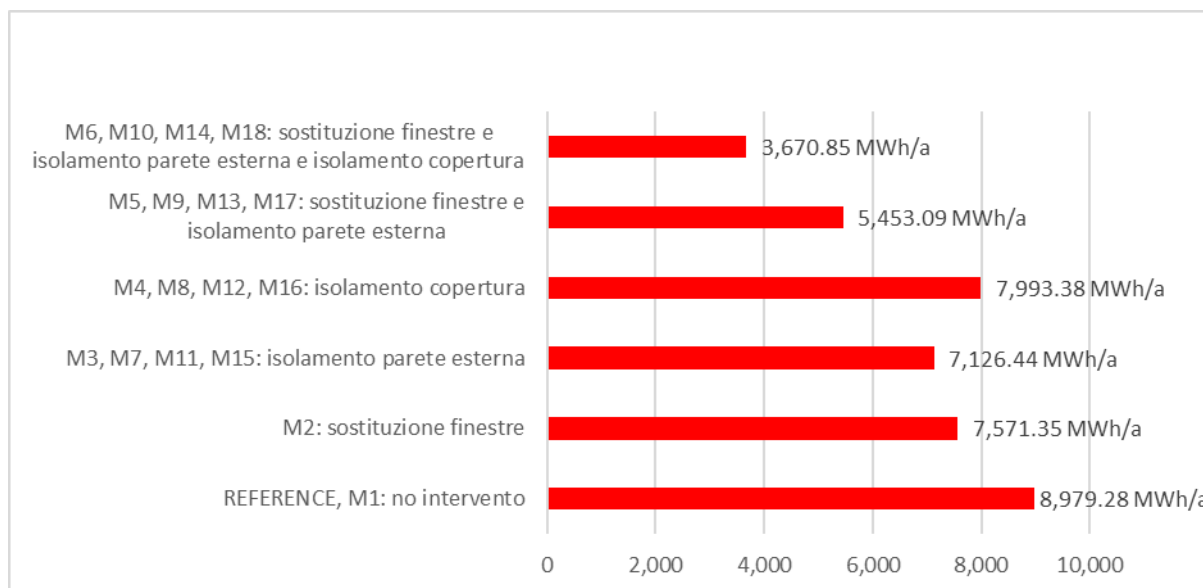


Figura 51 – Fabbisogni per riscaldamento in relazione alla tipologia di intervento sull'involucro edilizio.

L'andamento dei valori di fabbisogno per riscaldamento QH,nd, riportato in Figura 51, conferma quanto ipotizzato nella metodologia: maggiore è il numero di componenti edilizi che viene isolato termicamente, maggiore è la riduzione di fabbisogno termico. Come risultato atteso l'intervento nella parete esterna è quello più efficiente in funzione del rapporto S/V; per lo stesso motivo l'intervento in copertura non risulta influente se non abbinato completamente altre misure di intervento: infatti l'intervento di riqualificazione completa dell'involucro porta a una potenziale riduzione del fabbisogno di almeno un ordine di grandezza.

7.1.2. Interventi impiantistici e rete di impianto centralizzato

Come accennato, l'applicazione di interventi edilizi ha effetto anche sul calcolo del picco di energia (Tabella 22) e sulla determinazione della curva dei carichi e di conseguenza anche sul dimensionamento e costo di investimento degli impianti selezionati (codice I) e della rete di approvvigionamento in caso di nuovo impianto centralizzato di quartiere.

Tabella 22 – Risultati di simulazione del fabbisogno per riscaldamento e ACS con indicazione dell'energia di picco richiesta dal quartiere in relazione agli interventi architettonici selezionati.

| Intervento | Descrizione | Energia di Picco per Riscaldamento [kW] | Energia di Picco per ACS [kW] | Energia di Picco Totale [kW] |
|-------------------|--|---|-------------------------------|------------------------------|
| Reference, M1 | nessun intervento edilizio | 6,612.41 | 429.35 | 7,041.76 |
| M2 | sostituzione finestre | 5,688.86 | 428.06 | 6,116.92 |
| M3, M7, M11, M15 | isolamento parete esterna | 5,396.39 | 427.67 | 5,824.06 |
| M4, M8, M12, M16 | isolamento copertura | 5,649.28 | 427.56 | 6,076.83 |
| M5, M9, M13, M17 | sostituzione finestre e isolamento parete esterna | 4,322.64 | 425.45 | 4,748.09 |
| M6, M10, M14, M18 | sostituzione finestre e isolamento parete esterna e isolamento copertura | 3,181.94 | 422.40 | 3,604.35 |

Anche nel caso del picco di energia valgono le stesse considerazioni elaborate in seguito all'intervento sull'involucro. In analitico si può analizzare la curva dei carichi per ciascuna tipologia di intervento nell'involucro (Figura 52).

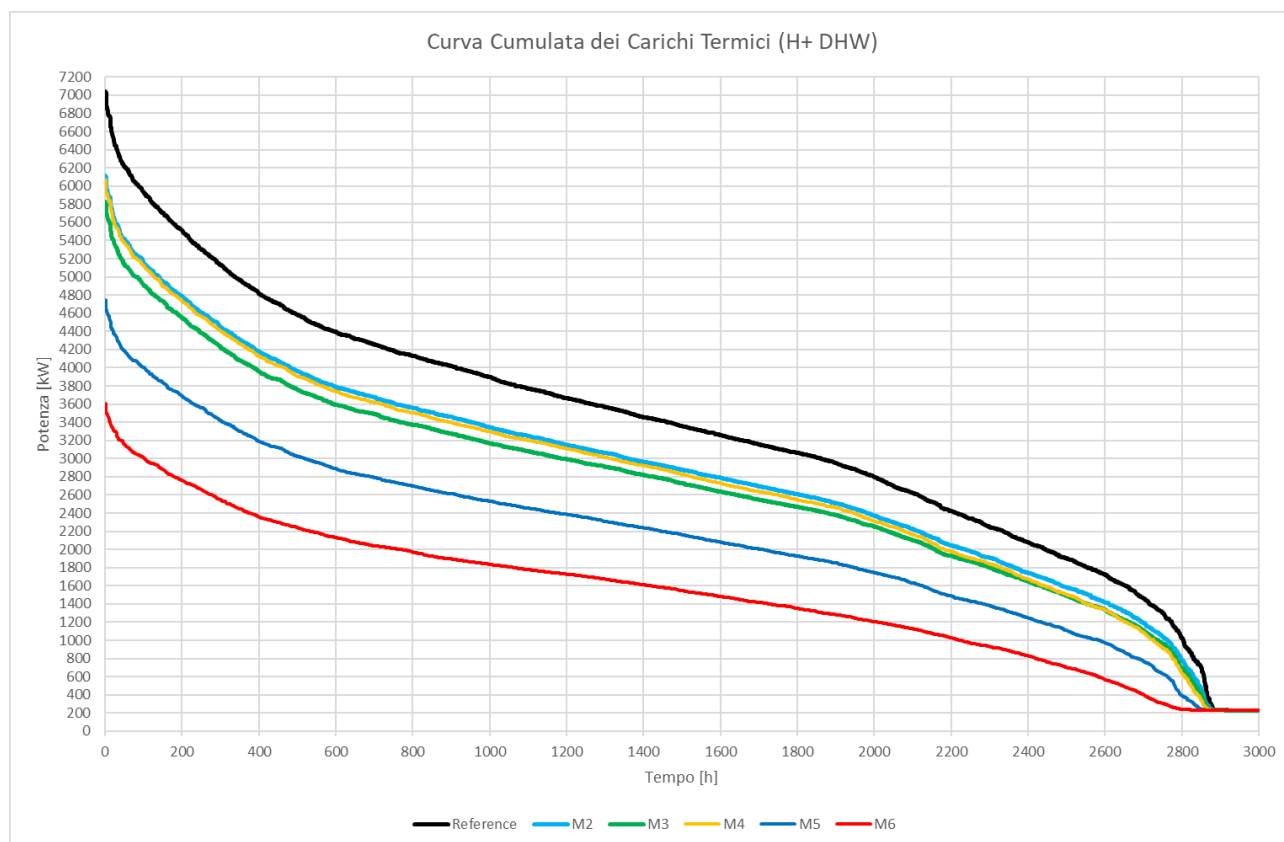


Figura 52 – Rappresentazione della curva dei carichi di potenza (cumulativa per riscaldamento e ACS) durante il periodo di riscaldamento per ciascuna tipologia di intervento sull'involucro edilizio del distretto.

Il grafico in Figura 52 mostra come la potenza massima richiesta diminuisca ovviamente in correlazione al fabbisogno energetico. Questo trend è confermato anche dalla pendenza della curva; infatti nel caso di involucro più efficiente (M6) la curva è tendenzialmente lineare data la migliore qualità termica e inerziale dell'insieme dei componenti edilizi rispetto al Reference. La distribuzione dei valori cumulativi fornisce delle indicazioni progettuali nel caso di nuovo sistema impiantistico. Per esempio, si considerino le curve di due scenari quali Reference e M6. Nel secondo si può notare che la potenza massima corrisponde a circa 36 MW, ma sarebbe sufficiente dimensionare un generatore di circa 12 MW di potenza per coprire l'80% delle ore di funzionamento dell'impianto (circa 2000 ore). Invece nel caso attuale Reference la richiesta in termini di potenza massima è duplicata rispetto a M6 e per coprire lo stesso tempo di 2000 ore è necessario un impianto di potenza doppia, ovvero 24 MW. Quindi uno scenario come M6 comporta costi minori di investimento data la taglia dell'impianto nuovo, l'impiego di generatori di backup solo nei casi eccezionali di alta richiesta.

Con riferimento ai capitoli precedenti, settando il modello con le caratteristiche dei sistemi impiantistici selezionati, è possibile determinare la quantità di energia utile consumata e si può determinare anche il totale di energia primaria per ogni scenario, applicando i relativi fattori di conversione per ogni vettore energetico individuato.

Di seguito la Tabella 23 riporta quindi i risultati totali a bilancio annuale dei valori di energia primaria consumata dal quartiere. I valori sono espressi in kWh/m² a, ovvero per unità di superficie utile climatizzata totale. Gli scenari vedono l'applicazione delle sette tipologie di impianto, comprese quelle con fonti da energia rinnovabile.

Tabella 23 – Calcolo del consumo di energia primaria simulato per ciascun intervento

| | ENERGIA TERMICA | | ENERGIA ELETTRICA | | TOTALE |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Riscaldamento e ACS | Riscaldamento AUX | Energia da Impianto | Energia da Rete | Energia a Rete |
| | [kWh/m ² a] | [kWh/m ² a] | [kWh/m ² a] | [kWh/m ² a] | [kWh/m ² a] |
| REFERENCE | 22,648.92 | | | 3,473.60 | 26,122.52 |
| SISTEMA CENTRALIZZATO COGENERAZIONE A GAS NATURALE | | | | | |
| I1_M1 | 4,158.47 | 9,699.57 | 2,239.18 | | 16,097.22 |
| I1_M2 | 4,144.11 | 8,063.45 | 2,231.44 | | 14,438.99 |
| I1_M3 | 4,139.41 | 7,546.56 | 2,228.91 | | 13,914.88 |
| I1_M4 | 4,149.15 | 8,553.21 | 2,234.16 | | 14,936.51 |
| I1_M5 | 4,123.07 | 5,600.81 | 2,220.11 | | 11,943.99 |
| I1_M6 | 4,104.39 | 3,529.46 | 2,210.05 | | 9,843.90 |
| I1_M7 | 4,139.41 | 7,546.56 | 2,228.91 | | 13,914.88 |
| I1_M8 | 4,149.15 | 8,553.21 | 2,234.16 | | 14,936.51 |
| I1_M9 | 4,123.07 | 5,600.81 | 2,220.11 | | 11,943.99 |
| I1_M10 | 4,104.39 | 3,529.46 | 2,210.05 | | 9,843.90 |
| I1_M11 | 4,139.41 | 7,546.56 | 2,228.91 | | 13,914.88 |
| I1_M12 | 4,149.15 | 8,553.21 | 2,234.16 | | 14,936.51 |
| I1_M13 | 4,123.07 | 5,600.81 | 2,220.11 | | 11,943.99 |
| I1_M14 | 4,104.39 | 3,529.46 | 2,210.05 | | 9,843.90 |
| I1_M15 | 4,139.41 | 7,546.56 | 2,228.91 | | 13,914.88 |
| I1_M16 | 4,149.15 | 8,553.21 | 2,234.16 | | 14,936.51 |
| I1_M17 | 4,123.07 | 5,600.81 | 2,220.11 | | 11,943.99 |
| I1_M18 | 4,104.39 | 3,529.46 | 2,210.05 | | 9,843.90 |
| SISTEMA CENTRALIZZATO COGENERAZIONE A GAS NATURALE CON SOLARE TERMICO | | | | | |
| I2_M1 | 1,830.97 | 9,699.57 | 2,239.18 | | 13,769.71 |
| I2_M2 | 1,816.60 | 8,063.45 | 2,231.44 | | 12,111.49 |
| I2_M3 | 1,811.91 | 7,546.56 | 2,228.91 | | 11,587.38 |
| I2_M4 | 1,821.64 | 8,553.21 | 2,234.16 | | 12,609.00 |
| I2_M5 | 1,795.56 | 5,600.81 | 2,220.11 | | 9,616.48 |
| I2_M6 | 1,776.88 | 3,529.46 | 2,210.05 | | 7,516.40 |
| I2_M7 | 1,811.91 | 7,546.56 | 2,228.91 | | 11,587.38 |
| I2_M8 | 1,821.64 | 8,553.21 | 2,234.16 | | 12,609.00 |
| I2_M9 | 1,795.56 | 5,600.81 | 2,220.11 | | 9,616.48 |
| I2_M10 | 1,776.88 | 3,529.46 | 2,210.05 | | 7,516.40 |
| I2_M11 | 1,811.91 | 7,546.56 | 2,228.91 | | 11,587.38 |
| I2_M12 | 1,821.64 | 8,553.21 | 2,234.16 | | 12,609.00 |
| I2_M13 | 1,795.56 | 5,600.81 | 2,220.11 | | 9,616.48 |
| I2_M14 | 1,776.88 | 3,529.46 | 2,210.05 | | 7,516.40 |
| I2_M15 | 1,811.91 | 7,546.56 | 2,228.91 | | 11,587.38 |
| I2_M16 | 1,821.64 | 8,553.21 | 2,234.16 | | 12,609.00 |
| I2_M17 | 1,795.56 | 5,600.81 | 2,220.11 | | 9,616.48 |
| I2_M18 | 1,776.88 | 3,529.46 | 2,210.05 | | 7,516.40 |

| | <i>ENERGIA TERMICA</i> | | <i>ENERGIA ELETTRICA</i> | | <i>TOTALE</i> | |
|--|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------|
| | <i>Riscaldamento e ACS</i> | <i>Riscaldamento AUX</i> | <i>Energia da Impianto</i> | <i>Energia da Rete</i> | <i>Energia a Rete</i> | |
| | <i>[kWh/m² a]</i> | <i>[kWh/m² a]</i> | <i>[kWh/m² a]</i> | <i>[kWh/m² a]</i> | <i>[kWh/m² a]</i> | |
| SISTEMA CENTRALIZZATO POMPA DI CALORE GEOTERMICA | | | | | | |
| I3_M1 | 3,973.50 | | | 3,473.60 | 7,447.09 | |
| I3_M2 | 3,443.35 | | | 3,461.59 | 6,904.95 | |
| I3_M3 | 3,275.83 | | | 3,457.67 | 6,733.51 | |
| I3_M4 | 3,602.20 | | | 3,465.81 | 7,068.00 | |
| I3_M5 | 2,645.52 | | | 3,444.02 | 6,089.54 | |
| I3_M6 | 1,974.25 | | | 3,428.42 | 5,402.66 | |
| I3_M7 | 3,275.83 | | | 3,457.67 | 6,733.51 | |
| I3_M8 | 3,602.20 | | | 3,465.81 | 7,068.00 | |
| I3_M9 | 2,645.52 | | | 3,444.02 | 6,089.54 | |
| I3_M10 | 1,974.25 | | | 3,428.42 | 5,402.66 | |
| I3_M11 | 3,275.83 | | | 3,457.67 | 6,733.51 | |
| I3_M12 | 3,602.20 | | | 3,465.81 | 7,068.00 | |
| I3_M13 | 2,645.52 | | | 3,444.02 | 6,089.54 | |
| I3_M14 | 1,974.25 | | | 3,428.42 | 5,402.66 | |
| I3_M15 | 3,275.83 | | | 3,457.67 | 6,733.51 | |
| I3_M16 | 3,602.20 | | | 3,465.81 | 7,068.00 | |
| I3_M17 | 2,645.52 | | | 3,444.02 | 6,089.54 | |
| I3_M18 | 1,974.25 | | | 3,428.42 | 5,402.66 | |
| SISTEMA CENTRALIZZATO POMPA DI CALORE GEOTERMICA CON FOTOVOLTAICO | | | | | | |
| I4_M1 | 3,973.50 | | | | 29.42 | 3,944.08 |
| I4_M2 | 3,443.35 | | | | 34.37 | 3,408.98 |
| I4_M3 | 3,275.83 | | | | 35.99 | 3,239.84 |
| I4_M4 | 3,602.20 | | | | 32.63 | 3,569.56 |
| I4_M5 | 2,645.52 | | | | 41.64 | 2,603.88 |
| I4_M6 | 1,974.25 | | | | 48.08 | 1,926.16 |
| I4_M7 | 3,275.83 | | | | 35.99 | 3,239.84 |
| I4_M8 | 3,602.20 | | | | 32.63 | 3,569.56 |
| I4_M9 | 2,645.52 | | | | 41.64 | 2,603.88 |
| I4_M10 | 1,974.25 | | | | 48.08 | 1,926.16 |
| I4_M11 | 3,275.83 | | | | 35.99 | 3,239.84 |
| I4_M12 | 3,602.20 | | | | 32.63 | 3,569.56 |
| I4_M13 | 2,645.52 | | | | 41.64 | 2,603.88 |
| I4_M14 | 1,974.25 | | | | 48.08 | 1,926.16 |
| I4_M15 | 3,275.83 | | | | 35.99 | 3,239.84 |
| I4_M16 | 3,602.20 | | | | 32.63 | 3,569.56 |
| I4_M17 | 2,645.52 | | | | 41.64 | 2,603.88 |
| I4_M18 | 1,974.25 | | | | 48.08 | 1,926.16 |
| SISTEMA CENTRALIZZATO COGENERATORE A BIOMASSA | | | | | | |
| I5_M1 | 15,789.07 | 2,562.59 | 2,153.06 | | | 20,504.71 |
| I5_M2 | 15,734.52 | 951.12 | 2,145.62 | | | 18,831.26 |
| I5_M3 | 15,716.70 | 442.29 | 2,143.19 | | | 18,302.18 |
| I5_M4 | 15,753.66 | 1,432.23 | 2,148.23 | | | 19,334.12 |
| I5_M5 | 13,269.91 | 0.00 | 2,134.72 | | | 15,404.63 |
| I5_M6 | 9,902.83 | 0.00 | 2,125.05 | | | 12,027.88 |
| I5_M7 | 15,716.70 | 442.29 | 2,143.19 | | | 18,302.18 |
| I5_M8 | 15,753.66 | 1,432.23 | 2,148.23 | | | 19,334.12 |
| I5_M9 | 13,269.91 | 0.00 | 2,134.72 | | | 15,404.63 |
| I5_M10 | 9,902.83 | 0.00 | 2,125.05 | | | 12,027.88 |
| I5_M11 | 15,716.70 | 442.29 | 2,143.19 | | | 18,302.18 |
| I5_M12 | 15,753.66 | 1,432.23 | 2,148.23 | | | 19,334.12 |
| I5_M13 | 13,269.91 | 0.00 | 2,134.72 | | | 15,404.63 |
| I5_M14 | 9,902.83 | 0.00 | 2,125.05 | | | 12,027.88 |
| I5_M15 | 15,716.70 | 442.29 | 2,143.19 | | | 18,302.18 |
| I5_M16 | 15,753.66 | 1,432.23 | 2,148.23 | | | 19,334.12 |
| I5_M17 | 13,269.91 | 0.00 | 2,134.72 | | | 15,404.63 |
| I5_M18 | 9,902.83 | 0.00 | 2,125.05 | | | 12,027.88 |

| | ENERGIA TERMICA | | ENERGIA ELETTRICA | | TOTALE | |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------|
| | Riscaldamento e ACS | Riscaldamento AUX | Energia da Impianto | Energia da Rete | Energia a Rete | |
| | [kWh/m ² a] | [kWh/m ² a] | [kWh/m ² a] | [kWh/m ² a] | [kWh/m ² a] | |
| SISTEMA CENTRALIZZATO COGENERATORE A BIOMASSA CON FOTOVOLTAICO | | | | | | |
| I6_M1 | 9,473.44 | 6,469.99 | 1,291.83 | | 890.64 | 16,344.62 |
| I6_M2 | 9,440.71 | 4,845.02 | 1,287.37 | | 892.62 | 14,680.48 |
| I6_M3 | 9,430.02 | 4,331.78 | 1,285.91 | | 893.27 | 14,154.44 |
| I6_M4 | 9,452.20 | 5,330.87 | 1,288.94 | | 891.92 | 15,180.07 |
| I6_M5 | 9,392.78 | 2,398.73 | 1,280.83 | | 895.53 | 12,176.82 |
| I6_M6 | 9,350.23 | 341.89 | 1,275.03 | | 898.10 | 10,069.04 |
| I6_M7 | 9,430.02 | 4,331.78 | 1,285.91 | | 893.27 | 14,154.44 |
| I6_M8 | 9,452.20 | 5,330.87 | 1,288.94 | | 891.92 | 15,180.07 |
| I6_M9 | 9,392.78 | 2,398.73 | 1,280.83 | | 895.53 | 12,176.82 |
| I6_M10 | 9,350.23 | 341.89 | 1,275.03 | | 898.10 | 10,069.04 |
| I6_M11 | 9,430.02 | 4,331.78 | 1,285.91 | | 893.27 | 14,154.44 |
| I6_M12 | 9,452.20 | 5,330.87 | 1,288.94 | | 891.92 | 15,180.07 |
| I6_M13 | 9,392.78 | 2,398.73 | 1,280.83 | | 895.53 | 12,176.82 |
| I6_M14 | 9,350.23 | 341.89 | 1,275.03 | | 898.10 | 10,069.04 |
| I6_M15 | 9,430.02 | 4,331.78 | 1,285.91 | | 893.27 | 14,154.44 |
| I6_M16 | 9,452.20 | 5,330.87 | 1,288.94 | | 891.92 | 15,180.07 |
| I6_M17 | 9,392.78 | 2,398.73 | 1,280.83 | | 895.53 | 12,176.82 |
| I6_M18 | 9,350.23 | 341.89 | 1,275.03 | 0.00 | 898.10 | 10,069.04 |
| SISTEMA DI RISCALDAMENTO DECENTRALIZZATO (CALDAIE A GAS NATURALE) | | | | | | |
| I7_M1 | 12,331.08 | | | 3,473.60 | | 15,804.68 |
| I7_M2 | 10,685.87 | | | 3,461.59 | | 14,147.46 |
| I7_M3 | 10,166.01 | | | 3,457.67 | | 13,623.68 |
| I7_M4 | 11,178.82 | | | 3,465.81 | | 14,644.62 |
| I7_M5 | 8,209.92 | | | 3,444.02 | | 11,653.94 |
| I7_M6 | 6,126.75 | | | 3,428.42 | | 9,555.17 |
| I7_M7 | 10,166.01 | | | 3,457.67 | | 13,623.68 |
| I7_M8 | 11,178.82 | | | 3,465.81 | | 14,644.62 |
| I7_M9 | 8,209.92 | | | 3,444.02 | | 11,653.94 |
| I7_M10 | 6,126.75 | | | 3,428.42 | | 9,555.17 |
| I7_M11 | 10,166.01 | | | 3,457.67 | | 13,623.68 |
| I7_M12 | 11,178.82 | | | 3,465.81 | | 14,644.62 |
| I7_M13 | 8,209.92 | | | 3,444.02 | | 11,653.94 |
| I7_M14 | 6,126.75 | | | 3,428.42 | | 9,555.17 |
| I7_M15 | 10,166.01 | | | 3,457.67 | | 13,623.68 |
| I7_M16 | 11,178.82 | | | 3,465.81 | | 14,644.62 |
| I7_M17 | 8,209.92 | | | 3,444.02 | | 11,653.94 |
| I7_M18 | 6,126.75 | | | 3,428.42 | | 9,555.17 |

Alcune osservazioni che si rilevano dai risultati esposti in tabella.

Le attuali caldaie entrano in funzione come sistemi ausiliari (AUX) a coprire con le potenze necessarie le richieste energetiche del quartiere. I sistemi a cogenerazione sono dimensionati sulla domanda elettrica del quartiere e il contributo del sistema fotovoltaico riduce la domanda al massimo a circa 1.5 MWh/m² a senza cessione di energia alla rete (I4) o annulla la domanda e cede solo una parte (I6). Il sistema di solare termico è predisposto per coprire tutta la domanda di ACS durante le ore del giorno e nel calcolo sono compresi i sistemi di accumulo.

La sola sostituzione delle attuali caldaie con una della stessa tipologia, ma più efficiente, ovvero intervento I7_M1 comporta una riduzione di circa 10 MWh/m² a; di conseguenza anche gli altri impianti selezionati risultano più efficienti avendo sistemi centralizzati con caratteristiche più performanti e migliori rendimenti.

Dalla Figura 53 si evince che la tipologia di interventi più efficienti è quella in cui installato un sistema centralizzato di quartiere e che il generatore è una pompa di calore geotermica (I4 e I5).

Prestazioni comparabili per efficienza sono raggiunte anche con l'installazione degli altri impianti considerati, ma in questo caso è necessario che venga accoppiato a un intervento di riqualificazione sull'intero involucro edilizio (ovvero M18).

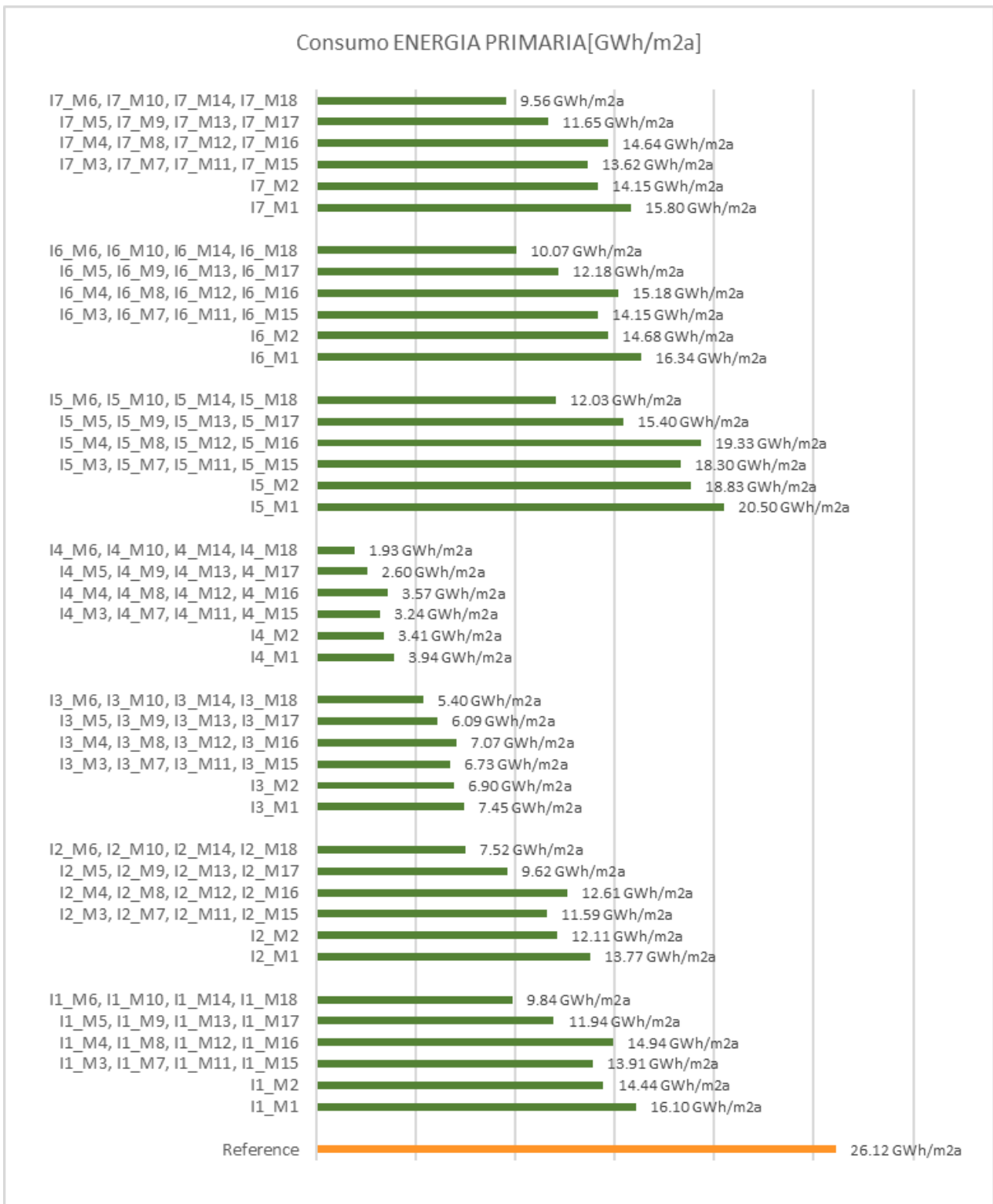


Figura 53 – Calcolo del consumo di energia primaria simulato per ciascun intervento, suddiviso per impianto e per categoria di intervento sull'involucro.

7.2. Costi Globali

Come anticipato la convenienza degli interventi viene valutata attraverso il metodo del Global Cost: sono considerati quindi tutti gli costi di investimento, di manutenzione (ordinaria e straordinaria) e di gestione valutati per gli interventi selezionati e confrontati con quelli del Reference.

7.2.1. Interventi architettonici

Prendendo in esame i soli interventi architettonici si possono analizzare i risultati elaborati in Figura 54, precisando che si tratta di costi annuali attualizzati e riferiti alla superficie utile climatizzata totale.

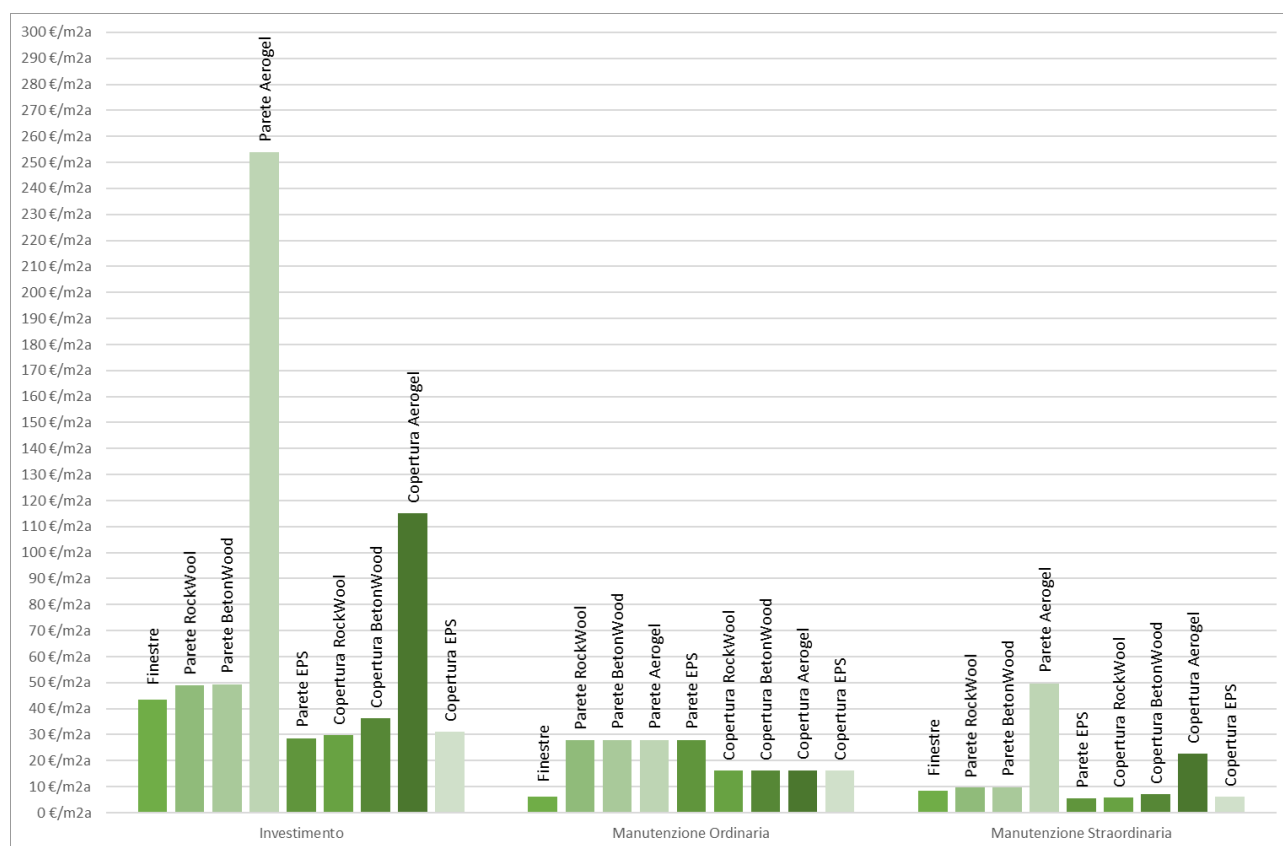


Figura 54 – Costi Globali attualizzati (€/m² a) degli interventi architettonici applicati al quartiere di Santa Marta.

Come atteso già in fase di computo, i risultati dimostrano una sostanziale omogeneità nell'applicazione dei materiali, ad eccezione dell'aerogel: attualmente il materiale infatti ha costi di fornitura triplicati rispetto agli altri, a fronte di un ridotto spessore dei pannelli. I risultati confermano quanto già noto per esperienza e pratica edilizia, ovvero che i costi di investimento rappresentano la voce di costo più rilevante nel caso di intervento edilizio. La manutenzione ordinaria ha poca rilevanza anche per il fatto che è stata ipotizzata come intervento da effettuarsi ogni cinque anni.

In termini di incidenza dei costi va comunque ribadito che nel computo non sono stati conteggiati i costi dei ponteggi esterni in quanto si è ipotizzato che l'intervento di isolamento delle pareti venga effettuato all'intradosso in conformità con le prescrizioni di tutela regolato dalle normative vigenti per il caso veneziano.

7.2.2. Interventi impiantistici e rete di impianto centralizzato

Anche per la parte impiantistica ci sono alcune osservazioni sui risultati.

I costi di investimento della rete di approvvigionamento, comprensivi di installazione della sottostazione, sono riportati in Figura 55.

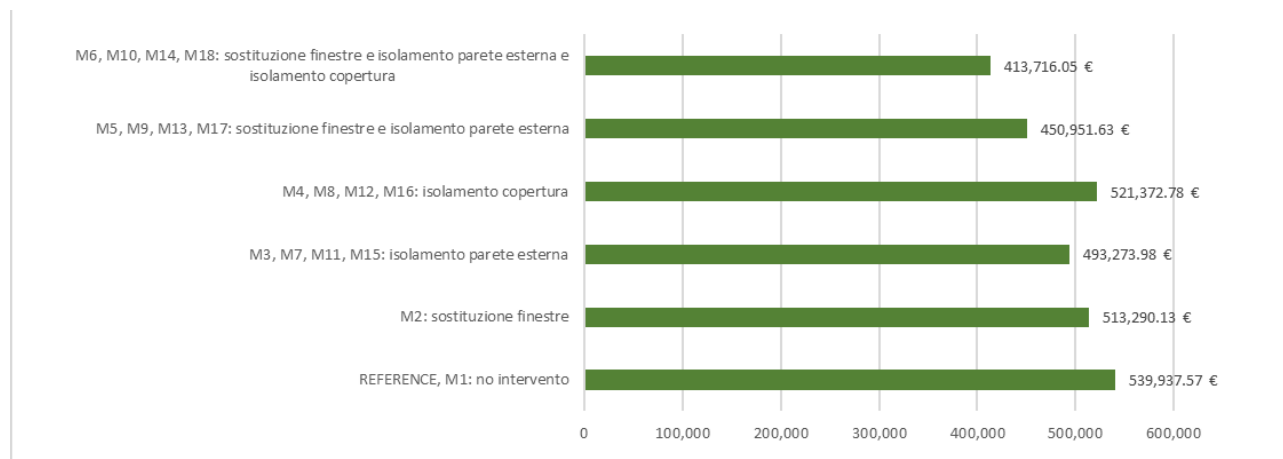


Figura 55 – Costi di investimento per la realizzazione della rete di distribuzione e delle sottostazioni.

La lunghezza della rete rimane quella definita nel caso Reference, ovvero circa 2 km di percorso, cambia il dimensionamento in funzione del fabbisogno termico del quartiere. Come ipotizzato, il trend dei costi è in stretta relazione con quello dei fabbisogni.

I costi di investimento per gli impianti invece hanno valori diversi perché dipendono dalla taglia dell'impianto e di conseguenza dal dimensionamento, dai picchi e dai costi parametrici della tipologia adottata.

In Figura 56 sono riportati i costi in relazione alla tipologia degli interventi architettonici correlati. La figura mostra come l'implementazione tecnologica e l'abbinamento con le rinnovabili RES abbia costi decisamente importanti solo a livello di investimento.

La sostituzione delle attuali caldaie (I7) risulta sicuramente l'intervento più conveniente e il costo è sostenibile dall'utente, sia in caso di impianto per singola unità immobiliare che a livello condominiale; inoltre si tratta di una casistica ampiamente incentivata e oggetto di detrazione fiscale secondo le attuali disposizioni governative che sono in vigore e che sono rinnovate da almeno una decina di anni in Italia.

Gli impianti centralizzati analizzati risultano più conveniente nel caso di vettori energetici a biomassa, mentre le pompe di calore hanno il costo più alto attualmente sul mercato.

Il costo che incide di più è l'inserimento di sistemi impiantistici come il fotovoltaico (I4 e I6): il sistema adottato è presente nei listini con valore pari a circa 600 €/m², ovvero almeno cento volte di più di un pannello standard policristallino.

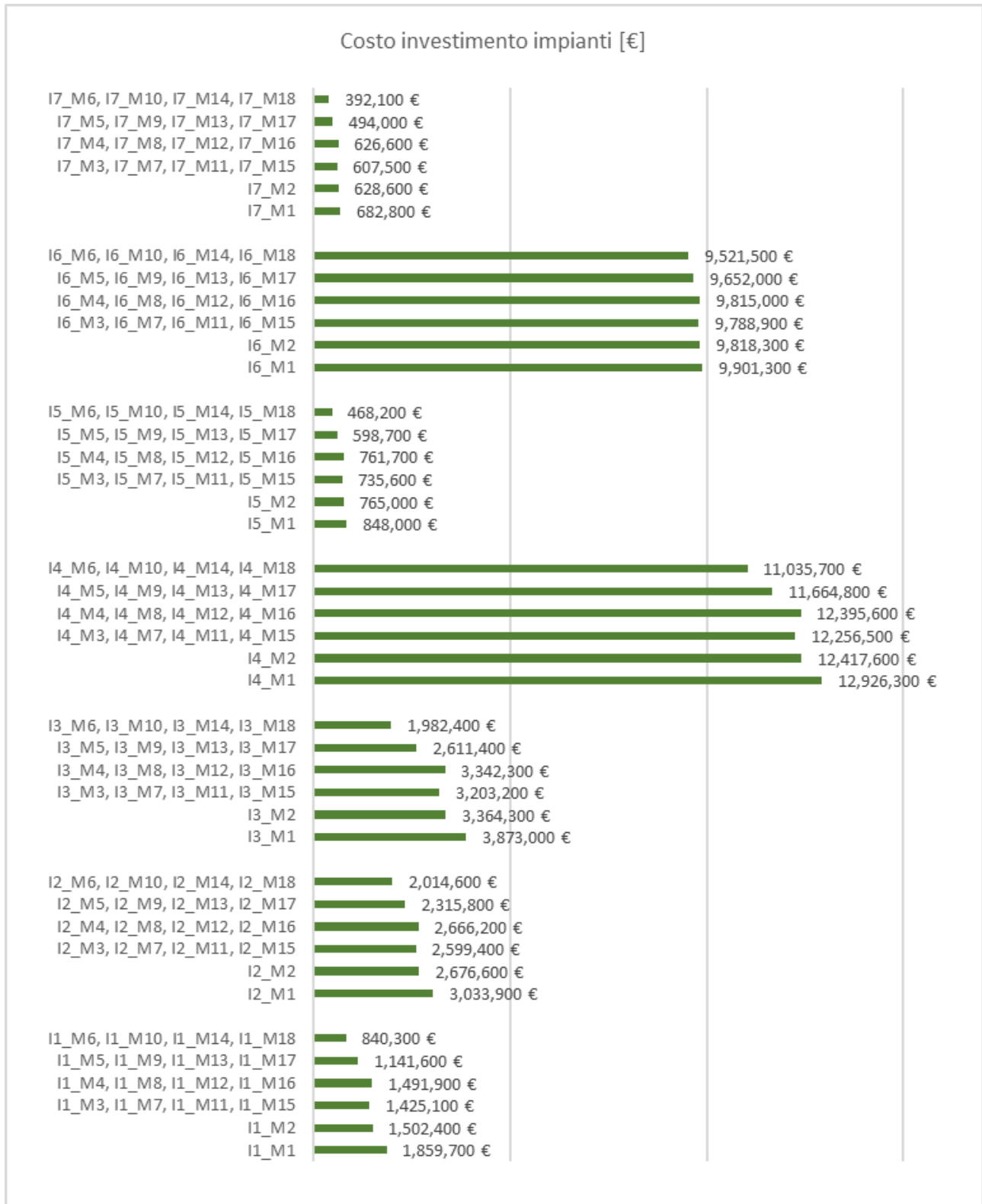


Figura 56 – Costi di investimento per gli impianti selezionati in relazione alla tipologia di intervento.

7.2.3. Costo globale attualizzato

Infine si valuta il costo globale attualizzato sommando i costi per ogni scenario simulato.

Nella Figura 57 vengo riportati graficamente i costi globali suddivisi per investimento, manutenzione ed esercizio.

Anche se i valori sono arrotondati all'unità e sono attualizzati, risulta evidente che la spesa più consistente è quella relativa al costo dell'energia. Come anticipato il prezzo dell'energia unitario è basato su dati reali, ovvero sulla media mensile dei tariffari nell'anno 2020 per l'Italia. Va considerato che si tratta di una superficie climatizzata di edifici che corrisponde a circa 51,393 m², appunto a un quartiere e di conseguenza anche i consumi simulati sono relazionati alla dimensione degli edifici.

Tuttavia se viene cambiato l'andamento dei prezzi dell'energia, si tratta comunque di uno scenario ipotetico che ha come il punto di base il fatto che nell'attuale economia la domanda di energia aumenterà e quindi anche i risultati si modificheranno in modo sensibile.

La questione fondamentale è individuare quelle misure di intervento che permettano di invertire la situazione attuale e di diminuire i consumi energetici in modo da diminuire i costi energetici e promuovere l'autoconsumo, o meglio la produzione in loco da fonti rinnovabili.

Dai risultati emerge ancora che la convenienza nei costi è data da scenari in cui la combinazione data da interventi di riqualificazione sull'intero involucro con nuova impiantistica centralizzata, meglio se non su vettori fossili, vedi appunto gli scenari I1_M18, I3_M15, I3_M17, I3_M18, I5_M18. L'apporto delle RES è sicuramente pesato dal costo dell'impiantistica per il caso veneziano e quindi incide in modo determinante sui costi.

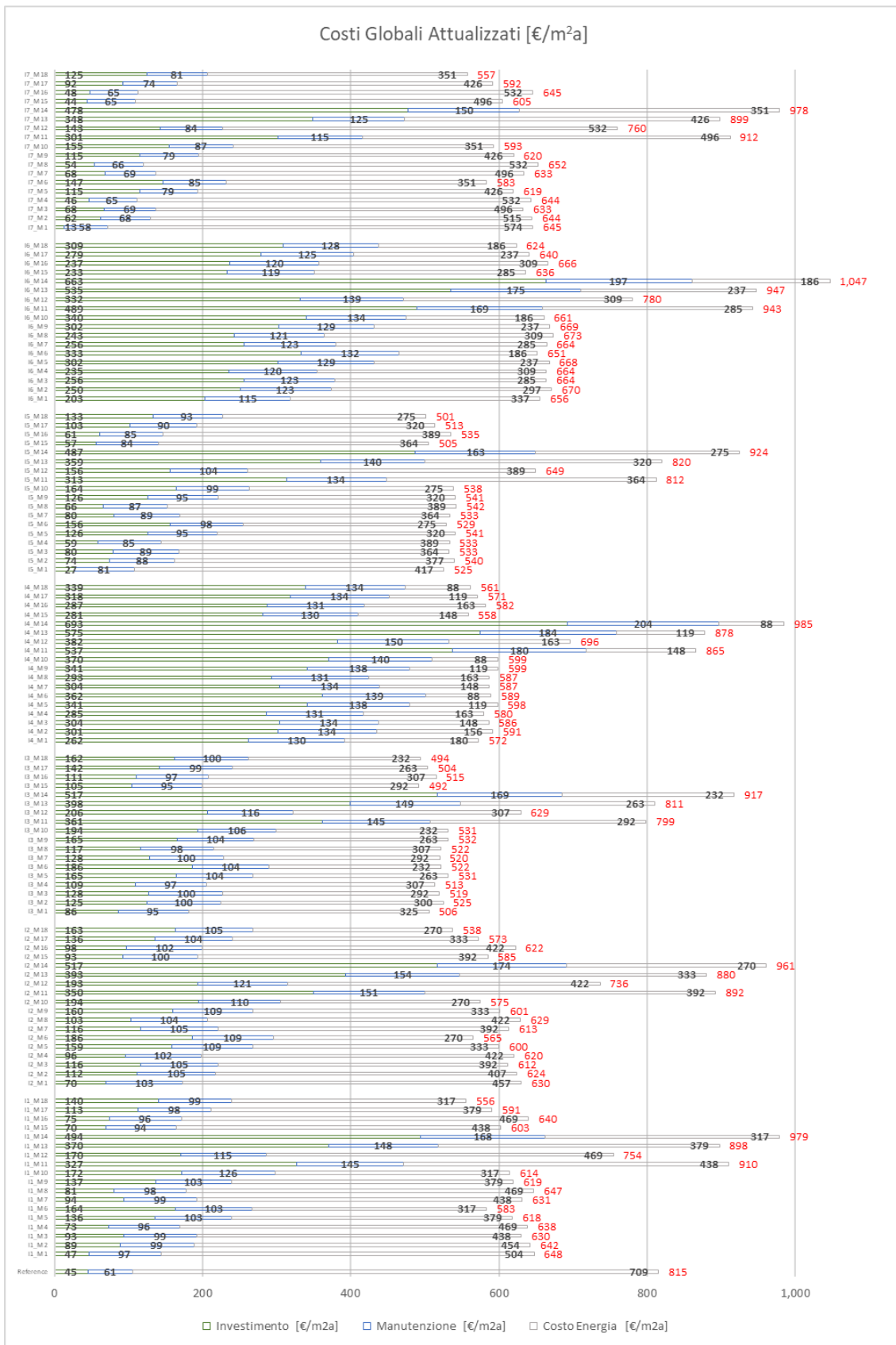


Figura 57 – Costi globali attualizzati espressi in €/m² a di superficie climatizzata; i valori suddivisi per categoria di costo sono in colore nero, i valori globali sono riportati in rosso.

7.3. Individuazione risultati ottimali (Cost Optimal solutions)

La soluzione ottimale di intervento nel quartiere di Santa Marta è individuata considerando i risultati ottenuti per gli scenari simulati e riportando in grafico i valori dei parametri di Energia Primaria e Costi Globali (Figura 58).

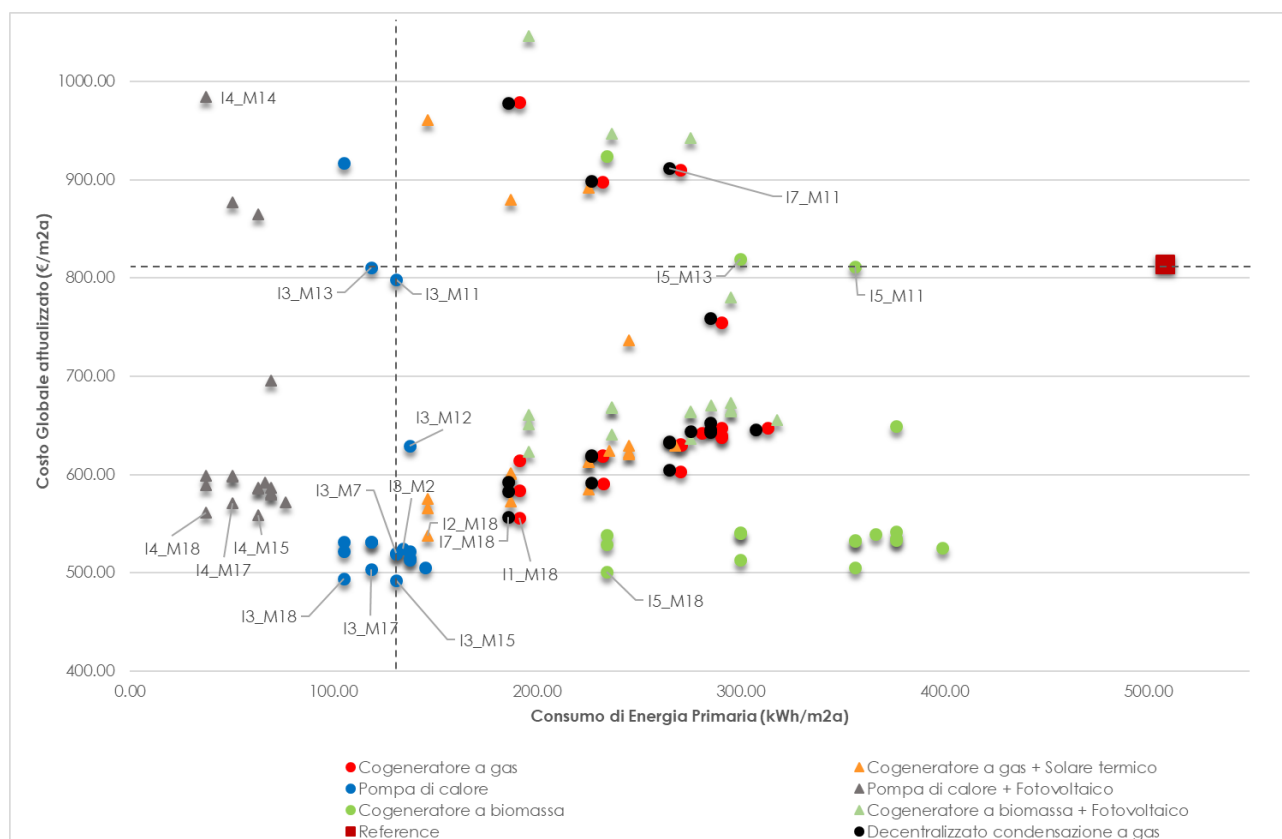


Figura 58 – Grafico di individuazione della soluzione ottimale di intervento: le linee tratteggiate in orizzontale e in verticale indicano rispettivamente il margine verso il basso delle soluzioni convenienti rispetto al Reference e il margine delle soluzioni più efficienti verso sinistra rispetto alla soluzione ottimale.

Il grafico in Figura 58 individua quindi l'intervento più conveniente tra quelli più efficienti; per questo caso studio la soluzione ottimale è quella con codice I3_M15: comprende l'intervento di isolamento termico a cappotto con EPS per l'involucro edilizio e la realizzazione di un impianto centralizzato di rete con generatore a pompa di calore geotermica.

In estrema sintesi i risultati dimostrano come l'installazione di pompa di calore porti a soluzioni ottimali e che l'incidenza della scelta di un intervento architettonico incide per una decina di euro per unità di superficie climatizzata. A tal proposito si precisa che la rappresentazione grafica tradisce l'ordine di grandezza perché ogni €/m² corrisponde a circa 50,000 € di costi.

È conveniente, e più efficiente, scegliere un intervento di ristrutturazione dell'intero involucro. Infatti l'intervento complessivo M18 con impiego di EPS è quasi sempre il più conveniente indipendentemente dall'impianto.

Tuttavia l'intervento M15, che consiste nell'isolamento con EPS sulle pareti, risulta ottimale in funzione dell'impianto con pompa di calore geotermica sia per motivi di costo sia di rapporto di forma geometrica. Infatti gli interventi sull'involucro considerano l'applicazione di materiale isolante sul lato interno delle pareti esterne a causa delle restrizioni del patrimonio per Venezia, quindi questo intervento applica costi di investimento minori per i ponteggi esterni rispetto all'isolamento esterno standard. Inoltre, l'impatto dell'isolamento esterno mostra un impatto di peso tra le misure proposte a causa del fattore geometria e forma dell'edificio distrettuale: in questo caso la tipologia edilizia è caratterizzata da un edificio alto, quindi da una superficie delle pareti superiore anche alla somma della superficie di tetto e finestre. In questo senso anche l'impatto delle dispersioni termiche è ridotto dall'intervento sulle pareti esterne più di altre misure.

L'intervento di isolamento della copertura non è rilevante per questo caso studio, ma in generale rappresenta un'opportunità in caso di installazione di sistemi PV per ottimizzare tempi e risorse di cantiere.

Analizzando il grafico è possibile formulare alcune osservazioni più dettagliate, soprattutto considerando le misure di intervento posizionate all'interno delle linee tratteggiate.

In generale tutti gli scenari rappresentano performance energetiche più performanti rispetto allo stato iniziale, ma non tutte sono convenienti: la linea orizzontale in corrispondenza del Reference individua il margine di costo oltre il quale gli scenari individuati non sono assolutamente praticabili perché nel periodo di service life porteranno a costi globali maggiori. Si tratta di una decina di casi, tra i quali si evidenziano quelli che implicano l'abbinamento con impianti RES, come ad esempio quello con codice I4_M14: rappresenta la soluzione più efficiente in assoluto con intervento sull'intero involucro e installazione di pompa di calore, ma ha costi globali più elevati a causa dei costi del PV e dell'aerogel.

Nello stesso gruppo di soluzioni si nota anche quello con codice I7_M11 a dimostrazione del fatto che, effettuare l'isolamento del componente edilizio più rilevante (la parete esterna) con un materiale poco impattante come l'aerogel e sostituire il generatore attuale con una medesima tipologia, risulta sicuramente una soluzione efficiente per dimezzare i consumi energetici ma non economicamente rilevante in quanto alla fine del service life saranno sostenuti costi globali simili allo stato attuale. Il medesimo concetto vale ancor meglio per il caso con codice I5_M13, che comprende l'installazione di una pompa di calore abbinata ad interventi di sostituzione finestre e isolamento della parete esterna: i consumi sono dimezzati rispetto al Reference, ma i costi globali sono gli stessi.

La linea verticale individua invece il margine a sinistra del quale sono posizionate quelle misure di intervento che risultano più efficienti rispetto alla soluzione ottimale. Anche in questo caso si tratta di interventi che vedono l'applicazione di sistemi RES abbinati alla pompa di calore, ma non risultano ancora vantaggiose a causa dei costi di installazione per rinnovabili a Venezia.

Inoltre è interessante commentare la collocazione di soluzioni a ridosso della linea verticale. Si tratta di interventi che portano praticamente alle medesime performance di consumo di energia primaria della soluzione ottimale, ma con costi più alti. Gli scenari non differiscono per impiantistica in quanto sono tutti dotati di pompa di calore (cursore blu), ma gli interventi si diversificano per tipologia e materiale con i relativi costi: isolamento sulle pareti esterne in EPS (M15) o legno-cemento (M7) o aerogel (M11) oppure isolamento in copertura in aerogel (M12) o sostituzione delle finestre (M2). Anche in termini di efficienza è interessante comparare la soluzione ottimale con un intervento che contempla la sostituzione del generatore attuale: lo scenario I7_M18 comprende la riqualificazione dell'intero involucro e comporta un costo globale attualizzato maggiore di circa 63 €/m² a rispetto allo scenario I3_M15 e I3_M18 che prevedono lo stesso intervento architettonico.

Per quanto riguarda i vettori energetici e le soluzioni impiantistiche si possono osservare i seguenti grafici, in cui a titolo puramente esplicativo sono rappresentati i valori di simulazione relativi all'applicazione dell'EPS.

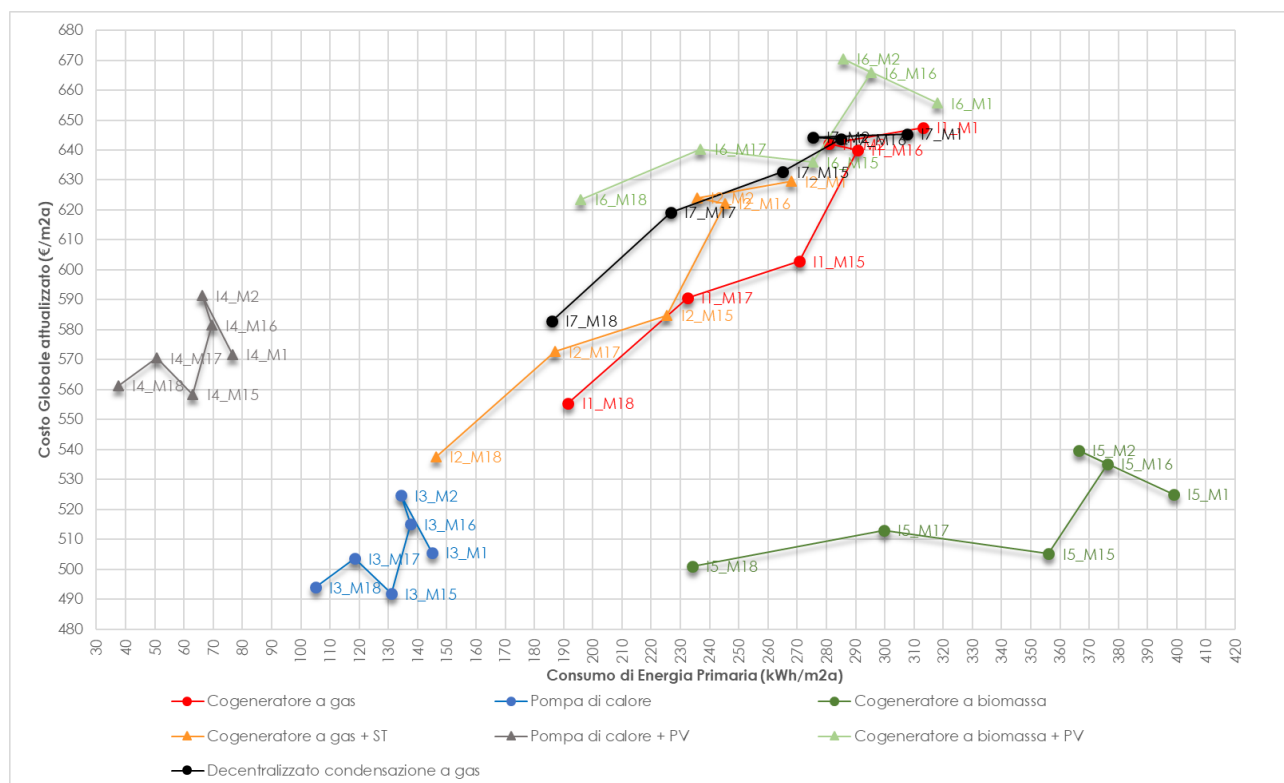


Figura 59 – Grafico con rappresentazione costi globali e consumi di energia primaria selezionati solo con l'applicazione dell'EPS come materiale isolante.

Dal grafico in Figura 59 si deduce infatti che, per quanto riguarda l'uso dell'energia primaria, le misure di risparmio energetico maggiori riguardano l'installazione di FER, in particolare l'impianto fotovoltaico, anche se la tecnologia scelta (tegola fotovoltaica) non è abbastanza economica. L'applicazione dell'impianto solare termico è utile solo in caso di riduzione dell'acqua calda sanitaria, ma richiede un'installazione complessa (per esempio la rete di distribuzione) e una valutazione burocratica a Venezia (per il posizionamento in copertura), quindi non è considerata una misura fattibile, conveniente e appropriata da adottare in casi simili.

In termini di costi globali, considerando l'intera vita utile, lo studio rivela come nella maggior parte delle misure i costi energetici rappresentino l'impatto maggiore a causa di due fattori: l'aumento del costo dell'energia previsto per i prossimi anni (anche a seguito della crisi COVID-19), il gap storico dell'Italia nell'approvvigionamento di fonti energetiche dipendenti dalla fornitura all'estero e il conseguente prezzo di elettricità e gas naturale per l'utente finale.

Il grafico in Figura 60 invece considera il risparmio economico che comporta l'installazione di ciascuna tipologia di impianto, ovvero riassume il risparmio di costo relativo allo scenario di ristrutturazione più conveniente sugli involucri degli edifici in confronto allo scenario in cui viene sostituito solo il sistema impiantistico.

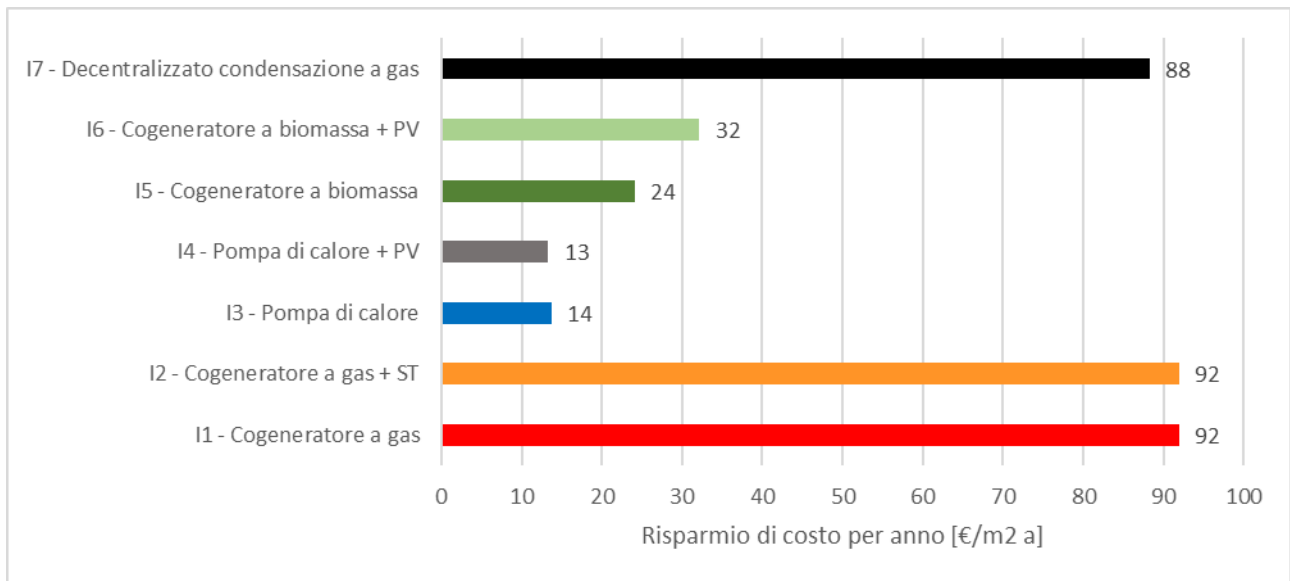


Figura 60 – Confronto del rapporto costo-efficacia del pacchetto di ristrutturazione più efficace sugli involucri degli edifici studiati per vari tipi di sistemi di riscaldamento considerati, in confronto con uno scenario in cui viene sostituito solo il sistema di riscaldamento.

Infatti, analizzando gli interventi suddivisi per categoria impiantistica (codice I), si può valutare la differenza di costo globale (€/m² a) tra il caso di sostituzione del solo generatore (ovvero ciascun caso M1) e il costo globale della soluzione ottimale relativa a ciascun scenario impiantistico. In sintesi: un maggior risparmio (valore più alto) significa una maggiore rilevanza dell'intervento architettonico sull'involucro, mentre a un minor risparmio (valore più basso) corrisponde una maggiore rilevanza del sistema impiantistico.

Nel caso studio quindi il passaggio a impianti a energia elettrica rappresenta un'operazione conveniente e fondamentale, mentre l'installazione di impiantistica a gas trova la convenienza solo se abbinata anche agli interventi edilizi di riqualificazione dell'involucro.

8. DISCUSSIONE

Vengono discusse le valutazioni di efficacia e convenienza che individuano l'intervento ottimale su cui converge la metodologia esposta.

I risultati del **caso studio** permettono di dedurre una serie di osservazioni fondamentali, in primo luogo per quanto riguarda gli obiettivi di efficienza energetica. In caso di ristrutturazione edilizia il passaggio da un impianto tradizionale decentralizzato a uno innovativo centralizzato è sicuramente un intervento trainante per il risparmio energetico. Il passaggio a misure di energia rinnovabile è sicuramente efficiente dal punto di vista energetico ma non economicamente conveniente. L'isolamento termico della facciata esterna è conveniente ed efficiente dal punto di vista energetico ed è fondamentalmente giustificato dal fattore di forma S/V degli edifici del distretto, la cui tipologia edilizia è quella riconducibile prevalentemente all'edificio multipiano.

La soluzione più conveniente considera un isolamento delle pareti esterne combinato con il passaggio a un sistema centralizzato a pompa di calore. Lo stesso sistema combinato con interventi sull'intero involucro (che coinvolgono sostituzione dei finestre, isolamento delle pareti e del tetto) è leggermente meno conveniente. Le stesse misure combinate con l'impianto fotovoltaico sono meno convenienti pur portando a un maggiore risparmio energetico. La causa di questa incompatibilità è dovuta essenzialmente al costo dell'impiantistica solare nel contesto veneziano (che comporta anche un iter amministrativo complesso) e dalla resa delle batterie di accumulo.

Per il caso studio analizzato, il livello di incertezza delle ipotesi e l'affidabilità dei risultati riscontrate nella ricerca possono essere motivate dal fatto che i sistemi impiantistici centralizzati non sono presenti nei listini comuni o nazionali, come invece per i prezzi riportati per il caso studio, ma sono costi derivanti da stime specifiche della componentistica, studi di fattibilità o bandi di gara per appalti pubblici (come la base d'asta del PNRR adottata in questo caso).

Pertanto i risultati ottenuti presentano valori affidabili sia nelle simulazioni energetiche effettuate a seguito della taratura dei settaggi e degli strumenti utilizzati, sia nelle valutazioni delle voci di costo. Tuttavia è importante sottolineare la specificità del caso di Venezia, ovvero:

- l'involucro esterno degli edifici è vincolato e solo il lato interno può essere isolato;
- anche il PV è limitato ad alcuni usi e il coppo con celle PV è accettato a discapito della minor convenienza e minor resa rispetto al pannello policristallino standard;
- il generatore centralizzato con vettore a biomassa non è una soluzione tecnologica applicabile al caso veneziano per la difficoltà di spazi di installazione e per i costi di manutenzione e trasporto.

In base ai risultati possono essere commentate alcune ipotesi formulate nella **metodologia**.

- *"Il livello ottimale in termini di costi delle misure di efficienza energetica sugli involucri degli edifici non differisce significativamente quando si confronta, da un lato, una combinazione di tali misure con un sistema di teleriscaldamento basato su energie rinnovabili e, dall'altro, una combinazione di tali misure con sistemi di riscaldamento individuale decentralizzato basato su energie rinnovabili".*

L'ipotesi è verificata, anche se non è stato definito il range di tolleranza e di accettabilità. Sicuramente il fotovoltaico è un'opzione valida in quanto, a fronte di un sovraccosto di circa 67 €/m² di costo globale attualizzato, i consumi di energia primaria sono più che dimezzati. La stessa considerazione non vale per il solare termico, il costo globale aumenta di circa 10 €/m² attualizzato e comporta un risparmio energetico del 15%.

- *"Nel caso in cui la situazione di partenza sia un quartiere con sistemi di riscaldamento decentralizzato a combustibili fossili, il passaggio a un sistema di teleriscaldamento centralizzato basato su energie rinnovabili non porta a un cambiamento significativo nel livello ottimale dei costi delle misure di efficienza energetica sugli involucri dei relativi edifici rispetto al caso di riferimento basato sulla situazione di partenza".*

L'ipotesi è verificata soprattutto nel caso in cui il teleriscaldamento utilizzi una tipologia di distribuzione all'interno degli edifici. Nello specifico l'utilizzo di sistemi di distribuzione ad alta temperatura (gas naturale e biomassa) non implica la sostituzione dei terminali; inoltre i costi del teleriscaldamento non implicano grandi interventi edilizi negli edifici, o meglio riguardano l'installazione della sottostazione di impianto ma non coinvolgono la parte di involucro edilizio.

- *"Nel caso in cui la situazione di partenza sia un quartiere con sistemi di riscaldamento decentralizzati a combustibili fossili, il passaggio a un sistema di teleriscaldamento a bassa temperatura basato su energie rinnovabili e collegato a pompe di calore decentralizzate non porta a un cambiamento significativo nel livello ottimale dei costi delle misure di efficienza energetica sugli involucri dei relativi edifici rispetto al caso di riferimento basato sulla situazione di partenza".*

Ipotesi non verificata per quanto espresso precedentemente. Il passaggio a sistemi a bassa temperatura implica anche un intervento alla tubazione esistente negli edifici ma implica soprattutto una verifica e riqualificazione dei sistemi di emissione in quanto la maggior parte degli alloggi simili a quelli del caso studio i terminali sono costituiti da radiatori ad alta temperatura.

- *"Nel caso in cui la situazione di partenza sia un quartiere con un basso livello di isolamento termico degli involucri degli edifici, ogni soluzione ottimale include, in una certa misura, l'attuazione di misure di efficienza energetica sugli involucri degli edifici".*

Ipotesi verificata perché si è riscontrato che l'intervento nell'involucro comporta una minore dispersione termica, quindi un minore fabbisogno con implicazioni nella progettazione, nella scelta, nel dimensionamento e nella gestione dell'impianto di riscaldamento. Al contempo le misure di efficienza energetica sull'involucro influiscono anche sulla diminuzione delle emissioni GHG.

Inoltre, la metodologia è basata sulla valutazione dei costi globali che sono dipendenti non solo dai costi unitari di investimento e manutenzione, ma anche dai costi dell'energia. Se per le prime due voci il prezzo di base è determinato dal prezzario o dal prezzo di mercato sostenuto nell'anno di intervento, per il costo dell'energia il periodo di service life implica l'adozione di uno scenario di costi futuri. Questo rappresenta un elemento di forte criticità del sistema di valutazione per questo tipo di studio e per tutte quelle discipline che adottano scenari di previsione.

Nella situazione storica attuale che ha conosciuto la pandemia e il Covid-19, gli schemi di previsione e di programmazione finora adottati sono stati disattesi perché i prezzi dell'energia sono stati calmierati dai governi nazionali che hanno sospeso gli adeguamenti previsti, come d'esempio per l'Italia all'intervento governativo nel settembre 2021 [236].

Tuttavia si è notato come la dinamica dei prezzi di gas e PUN sia fortemente allineata. A luglio 2021 il prezzo del gas ha registrato dei livelli oltre 5 volte superiori a quelli registrati nello stesso mese del 2020 sia sul mercato italiano che sul mercato europeo.

Dopo il crollo dei consumi, avvenuto nella prima parte del 2020 a causa della chiusura delle attività produttive durante la prima fase della crisi sanitaria, nell'agosto 2020 il prezzo del gas ha invertito la rotta. La ripresa della domanda, un inverno con temperature più basse rispetto alla media stagionale e un'offerta ridotta dal blocco degli impianti nei mesi precedenti hanno indotto il prezzo a salire vertiginosamente fino ad arrivare agli attuali livelli.

Ciò ha provocato dei forti aumenti anche del prezzo dell'energia elettrica sul mercato italiano: il benchmark europeo del gas, infatti, tende ad influenzare il corrispondente prezzo sul mercato italiano e quest'ultimo, a sua volta, caratterizza il prezzo dell'energia elettrica.

Pertanto il monitoraggio dell'evoluzione delle componenti di costo sarà dunque fondamentale per capire se nei prossimi mesi si registrerà un riequilibrio del prezzo dell'energia elettrica su livelli più in linea con i prezzi medi dell'ultimo decennio. Di conseguenza anche gli scenari dei prezzi adottati in questo studio possono essere suscettibili di modifiche e la valutazione della convenienza economica sarà oggetto di approfondimenti futuri della ricerca.

Seppur descritta nella metodologia elaborata per il progetto Annex 75, l'analisi delle emissioni ambientali esula dagli obiettivi e dal target di questo studio. Un primo possibile tema di approfondimento della ricerca riguarda quindi la valutazione dell'impatto ambientale degli scenari di intervento. È possibile infatti elaborare le emissioni di gas serra relative alle fonti energetiche utilizzate e quindi al consumo di energia primaria (espresso in kgCO₂eq/kWh) e all'impiego di prodotti edilizi e di componenti tecnologici attraverso uno studio LCA (Life Cycle Assessment) che analizza gli impatti ambientali dichiarati nelle certificazioni EPD (Environmental Product Declaration, ovvero Dichiarazione Ambientale di Prodotto) e calcolati sul Ciclo di Vita.

Un secondo tema riguarda invece l'impatto ambientale sulla qualità dell'aria. Nella parte introduttiva è stata analizzata e supportata da riferimenti bibliografici l'importanza della qualità dell'aria a livello urbano in relazione ai consumi per riscaldamento e raffrescamento. Anche questa analisi è meritevole di ulteriori approfondimenti, soprattutto nella valutazione di particolato e sostanze volatili dovute al consumo di biomassa rispetto a fonti combustibili fossili. In tal senso è auspicabile uno studio di riqualificazione energetica di quartiere su un caso reale ed esistente di sistema BDPH nel quale monitorare e valutare gli impatti ambientali risultanti, in particolare i livelli di PM₁₀, PM_{2.5} e CO₂ equivalente.

Con riferimento alla **strategia** applicata al caso studio può essere effettuata una valutazione più qualitativa dei risultati al fine di ricavare linee guida replicabili e raccomandate dai risultati del calcolo.

Innanzitutto un primo aspetto da valutare riguarda quali siano le combinazioni efficaci dal punto di vista dei costi tra le misure di energia rinnovabile e quelle di efficienza energetica per ottenere riduzioni di vasta portata delle emissioni di gas serra e del consumo di energia primaria nei distretti urbani.

Nell'analisi degli scenari di ristrutturazione, emerge che il contributo delle fonti rinnovabili è più importante per gli interventi che riguardano l'efficienza energetica dell'intero involucro edilizio. Questo risultato è possibile grazie al contributo che le fonti rinnovabili e gli interventi sull'involucro edilizio apportano alla domanda di energia. Come già riportato, gli interventi che comprendono pompa di calore e fotovoltaico sono quelli con una minore domanda di energia primaria anche se con un costo superiore rispetto alla soluzione ottimale in termini di costi.

Inoltre, le strategie che effettuano un passaggio dei vettori energetici dal sistema decentralizzato alle energie rinnovabili combinato con misure di efficienza energetica sull'involucro degli edifici possono essere confrontate in termini di convenienza e di impatto ambientale. La strategia della decentralizzazione analizzata (codice I7) nello studio mostra risultati interessanti: senza contare gli interventi sull'involucro, si ottiene un risparmio di circa un terzo dell'energia primaria e una riduzione dei costi di circa 200 €/m² (escludendo i casi con applicazione di aerogel). Se si considerano gli interventi sull'involucro il risultato migliora drasticamente portando a un risparmio di energia primaria pari a circa 300 kWh/m² all'anno, unito a un risparmio dei costi di almeno 350 €/m². Tuttavia, questi risultati non sono comparabili di quelli ottenuti cambiando la distribuzione dell'energia da sistemi decentralizzati a centralizzati, non solo per una questione di convenienza ma soprattutto per l'alto consumo di energia primaria non rinnovabile e il conseguente impatto ambientale.

Focalizzando l'attenzione sulle energie rinnovabili si può valutare in quali circostanze abbia senso utilizzare i potenziali di energia rinnovabile disponibili nelle città a livello di distretto, e in quali circostanze siano più vantaggiose le soluzioni di energia rinnovabile decentralizzate, in combinazione con misure di efficienza energetica sugli involucri degli edifici. In generale, a livello nazionale la facilità di accesso alle fonti rinnovabili è un fattore fondamentale nella pianificazione di strategie di rinnovamento a livello urbano che considerano l'uso di fonti energetiche più verdi. L'Italia è tra i paesi con la più bassa intensità di energia e ha superato gli obiettivi della quota FER in anticipo, raggiungendo nel 2014 la quota del 17% su consumi lordi finali. Tuttavia l'Italia non è tra i Paesi Membri dell'UE in termini di FER, anzi la Strategia Energetica Nazionale (SEN) prevede l'aumento di quota da FER al 28% e la riduzione di consumo di energia di 10 Mtep all'anno: si tratta di obiettivi impegnativi, pur considerando il potenziale dovuto alle disponibilità di risorse rinnovabili nel territorio, che tuttavia sono stati incanalati in misure di intervento proprio nel settore edile.

Infine si può osservare che il rapporto costo-efficacia delle misure di ristrutturazione degli involucri degli edifici nel caso di un sistema locale di teleriscaldamento basato sulle energie rinnovabili differisca dal rapporto costo-efficacia di tali misure nel caso di un uso decentralizzato di fonti di energia rinnovabile per il riscaldamento in ogni singolo edificio. Infatti nel caso studio non sono presenti scenari in cui sia proposto un sistema decentralizzato basato o integrato con le rinnovabili, anche se questo aspetto sta diventando un intervento trainante nell'attività edilizia attuale con l'applicazione dei requisiti del Bonus 110. Sicuramente resta un aspetto ancora da analizzare e verrà convogliato come futuro scenario di questa ricerca.

In relazione alla scelta tra soluzione centralizzata o decentralizzata ci sono importanti fattori emersi dal caso studio che hanno influenzato il rapporto costo-efficacia tra i due approcci:

- Fonti di energia rinnovabile disponibili: il facile accesso alle rinnovabili in loco è una condizione che può rendere più o meno efficace l'intervento di efficientamento. In luoghi dove le rinnovabili sono difficili da sfruttare, l'uso di fonti tradizionali rende l'intero processo di ristrutturazione meno allettante ed efficiente.
- Fabbisogno energetico degli edifici per il riscaldamento prima della ristrutturazione: la presenza di alti fabbisogni energetici nei quartieri può giustificare l'installazione di un sistema di teleriscaldamento.
- Sinergie con le misure sull'involucro dell'edificio: per ottenere risultati ottimali e comfort post ristrutturazione le misure sui sistemi di riscaldamento devono essere accoppiate con interventi sull'involucro edilizio.
- Prezzi dell'energia: il prezzo dell'energia ha una grande influenza nella decisione della soluzione energetica ottimale, specialmente in Italia dove il prezzo dell'elettricità è abbastanza alto rendendo l'uso della soluzione di riscaldamento basata sull'elettricità non sempre conveniente.

Ci sono anche altri fattori non inclusi nella metodologia di calcolo e nei risultati che sono importanti nella scelta tra soluzioni centrali o decentralizzate sia a livello pratico che sociale. Infatti due aspetti principali devono essere considerati quando si pianifica la ristrutturazione a livello di distretto. Il primo riguarda la presenza di un sistema di teleriscaldamento già in funzione. In questo caso i lavori di ristrutturazione degli impianti tecnologici sono meno invasivi e richiedono meno tempo. Se invece l'attuale soluzione di riscaldamento è incentrata su impianti decentralizzati, bisogna prevedere e considerare alcune criticità. Per esempio l'installazione delle tubazioni dalla fonte di calore agli edifici può diventare un fattore importante nella valutazione economica, inoltre le tubazioni già esistenti all'interno degli edifici devono essere completamente sostituite. Il secondo aspetto è più sociale. In alcuni casi, gli inquilini si oppongono al cambiamento dalla soluzione decentralizzata a quella centralizzata, sostenendo un peggioramento del loro comfort o un aumento delle bollette per l'energia, ma soprattutto la fase di cantiere porta a scompensi sociali dovuti al cambiamento della routine e al possibile temporaneo non utilizzo degli alloggi.

In relazione alla convenienza il livello più conveniente delle misure di efficienza energetica sugli involucri degli edifici è influenzato da fattori maggiormente rilevanti quali soprattutto il costo di ristrutturazione che è solitamente più elevato nel caso veneziano a causa della posizione e conformazione geografica di isola, della specificità del patrimonio e dello stock edilizio, e dalla difficoltà gestionale di intervenire nell'intero edificio a livello condominiale.

In generale si ritiene che la soluzione più efficace in termini di costi sia la migliore soluzione complessiva per il distretto del caso studio perché rappresenta un intervento esemplare per il tipo di edificio tipico del periodo costruttivo e sicuramente replicabile nel territorio nazionale o almeno nelle aree appartenenti alla zona climatica E. Tuttavia, va notato che il quartiere è tuttora abitato da famiglie e principalmente da persone anziane che rimangono in casa per la maggior parte del tempo, quindi è difficile effettuare interventi architettonici, soprattutto per quanto riguarda gli interventi di isolamento dall'interno.

In termini di soluzioni ottenute è interessante notare la differenza di risultati tra interventi con impianto tradizionale decentralizzato e impianto centralizzato a biomassa: la riduzione di energia primaria e di emissioni è a favore del sistema tradizionale, ma l'andamento del costo globale è decisamente e a favore della seconda ipotesi. Tuttavia ci sono implicazioni/limitazioni pratiche non incluse nell'analisi che potrebbero ridimensionare l'applicabilità di alcune soluzioni proprio come quella dell'impiego della biomassa: la peculiarità del caso di Venezia ne sminuisce i risultati perché, come già specificato, l'uso di tale vettore energetico presenta dei costi elevati di stoccaggio e trasporto ed è soggetto a valutazione da parte della Soprintendenza.

L'applicazione della metodologia al caso studio conferma la validità di un sistema impiantistico centralizzato e la tecnologia delle reti di teleriscaldamento e raffreddamento (DHC), riconosciuta a livello comunitario come una soluzione promettente per la riduzione dei consumi di energia primaria e delle emissioni locali per coprire la domanda di riscaldamento e raffreddamento degli edifici [237,238].

Le soluzioni proposte possono essere oggetto di approfondimento, in particolare nella valutazione di reti di Quinta Generazione ULTDH, pur con alcuni accorgimenti. Come già descritto nei capitoli precedenti, questi sistemi sono performanti se relazionati a un ridotto fabbisogno energetico degli edifici. Quindi, facendo riferimento ai risultati ottenuti in questo studio, gli scenari da valutare sono quelli in cui la riduzione del fabbisogno termico rispetto al caso Reference avviene solo con uno scenario di intervento architettonico significativo: o scenario M6 con la riqualificazione completa dell'involucro, o scenario M3, con la coibentazione a cappotto.

Pertanto questi scenari (codice M3 ed M6) sono da ritenersi validi per una valutazione con reti più innovative che permettono una riduzione dei consumi di energia primaria e una migliore gestione impiantistica. Sicuramente andranno testate soluzioni con distribuzione delle reti in un sistema bidirezionale e diventa fondamentale l'utilizzo di pompe di calore distribuite e installate nelle sottostazioni dei clienti [244]. Inoltre il caso studio si presterebbe come caso pilota per una rete innovativa di nuova installazione in cui valutare le particolarità dovute al contesto veneziano, dove i margini e le possibilità di costruzione sono limitati, e al contempo testare il modello di business.

Infatti il 5GDHC è ancora un campo recente e inesplorato e il know-how su questa tecnologia è nelle mani di poche aziende. Lo sfruttamento delle fonti locali di energia termica e l'adozione di sottostazioni "attive" decentralizzate potrebbero essere il campo di prova per la rottura del concetto monopolistico di sistema DHC sia allo sviluppo di nuovi modelli di business per le aziende multiutility. Non sono infatti ancora disponibili standard tecnici o linee guida per i progettisti e c'è una mancanza di conoscenza per l'ottimizzazione e il controllo operativo delle 5GDHC [250] e in tal senso la ricerca accademica e la collaborazione con partner industriali potrebbero dare un contributo.

Un incentivo a promuovere la diffusione della tecnologia DHC è evidente nella programmazione politica energetica anche in Italia. A livello nazionale il PNRR ha stanziato circa 200 milioni di € per lo sviluppo di sistemi teleriscaldamento o teleraffrescamento efficienti, sia nuova costruzione che efficientamento di reti esistenti. Come anticipato in precedenza nei bandi sono stati stabiliti dei costi parametrici delle soluzioni tecnologiche e i criteri di selezione dei progetti premiano soluzioni basate sulla distribuzione di calore generato da fonti rinnovabili, da calore di scarto o cogenerato in impianti ad alto rendimento.

In tal senso anche le analisi proposte in questa tesi dimostrano la validità dell'apporto delle rinnovabili a livello di distretto e offrono un contributo sulla valutazione della convenienza economica tra i sistemi tecnologici centralizzati proposti poiché i prezzi adottati sono in linea con la base d'asta e saranno poi definiti e meglio dettagliati in relazione al progetto e al caso individuato. Si precisa infatti che a tal proposito pure i prezzi adottati per il caso di Venezia sono stati leggermente modificati con i prezzi regionali rispetto a quanto definito a livello nazionale e possono essere oggetto di aggiornamento in relazione alla tecnologia o alla sperimentazione di nuove combinazioni tecnologiche.

Inoltre è opportuno un'altra riflessione sugli scenari proposti e sulle tecnologie. Lo studio di questa tesi propone scenari di confronto che permettano una valutazione generale della metodologia Annex 75 e un confronto con gli altri partecipanti del programma Annex 75, ma si può approfondire il programma a livello nazionale. Il MiTE infatti ipotizza uno scenario di partecipazione e sviluppo della MISURA 3, Sistemi di teleriscaldamento [M2C3M3] con progetti TLR maggiormente orientati più su reti esistenti che su nuove e più sull'ammodernamento delle centrali che sulla costruzione di reti di collegamento.

9. CONCLUSIONI

I cambiamenti climatici sono la più grande sfida dei tempi odierni e dagli anni Novanta l'Unione Europea gioca un ruolo di primo piano a livello internazionale, adottando politiche ad hoc e fissando obiettivi ambiziosi per ridurre i gas serra, incrementare la quota di energia da fonti rinnovabili nei consumi finali e migliorare l'efficienza energetica. Nel 2021 la Commissione Europea ha portato l'obiettivo di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra al 55% entro il 2030.

In questo contesto la Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica incentiva la riqualificazione del patrimonio edilizio attraverso un approccio su scala distrettuale, in quanto potenzialmente più efficaci per accelerare il processo di riduzione delle emissioni di gas serra nel settore edilizio e adatto per ottimizzare l'implementazione e l'integrazione delle fonti di energia rinnovabile.

In questo contesto si sono finanziati progetti dall'EU per la riqualificazione di edifici a livello urbano e sono stati sviluppati strumenti di supporto.

La panoramica esposta dimostra come il tema della rete energetica sia oggetto di numerosi progetti, seppur con varie declinazioni e livelli di approfondimento: dimensionamento, quantificazione dei fabbisogni, combinazione di tipologie e implementazione con le FER, gestione in remoto. Ampio spazio è dato alla diffusione del riscaldamento e il raffreddamento a basse emissioni di carbonio.

La pianificazione energetica a scala urbana rappresenta un ruolo essenziale come guida verso un futuro sostenibile per gli insediamenti umani, sia a scala di quartiere che di megalopoli. L'integrazione della pianificazione energetica risulta tuttavia impegnativa da inserire nel processo di pianificazione urbana considerando la complessità del sistema urbano, il processo decisionale multi-obiettivo e il coinvolgimento di più parti interessate. In questo contesto è sorta la necessità di introdurre e sviluppare adeguati strumenti di modellazione e simulazione energetica urbana (Urban Building Energy Model, UBEM) nelle varie fasi di pianificazione.

Negli ultimi anni c'è stato un forte sviluppo di metodologie UBEM e di conseguenza di software valutazione. Gli strumenti UBEM basati sulla fisica Bottom-Up si occupano della rappresentazione numerica delle interconnessioni tra gli edifici e l'ambiente circostante e possono valutare la domanda energetica degli edifici con un'alta risoluzione spazio-temporale. La tendenza della ricerca è quella di implementare questi strumenti, con approccio di modellazione physics based.

Il limite evidenziato per questi tool è in realtà un limite conosciuto nella programmazione hardware: non esiste un software perfetto e olisticamente interoperabile; tuttavia, il sistema di input e di gestione dei database rappresentano un punto di sviluppo futuro assolutamente imprescindibile. I database di dati territoriali per formati GIS o CityGML sono in fase di implementazione e non sempre accessibili dai tool di calcolo energetico, ma soprattutto è evidente nei database la mancanza di informazioni di prestazione energetica degli edifici o di caratterizzazione termica e impiantistica e inoltre manca un collegamento con i dati catastali. Infatti la modellazione per questa ricerca effettuata utilizzando dati di rilievo sul campo e soprattutto dati da standard normativi, e pertanto sono state inserite indicazioni non strettamente connesse alla reale costruzione degli edifici, né al consumo reale delle abitazioni, né alle reali abitudini degli utenti. Un possibile sviluppo futuro della ricerca riguarda quindi l'implementazione agevole di dati tra database e che permetta la lettura di formati diversi e di parametri di archiviazione.

L'Italia presenta uno stock edilizio che in termini di vetustà e prestazione energetica risulta in maggioranza inadatto al raggiungimento degli obiettivi europei di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni. Pertanto, oltre a un programma di sovvenzioni fiscali per la ristrutturazione edilizia, l'Italia ha fissato la riqualificazione energetica degli edifici di edilizia popolare pubblica come una delle azioni principali per la strategia del PNIEC in attuazione del "European Green Deal".

In tale contesto questa ricerca ha individuato il Quartiere di Santa Marta di Venezia come caso studio rappresentativo della tipologia di edilizia residenziale pubblica molto diffusa nel territorio nazionale e che permetterebbe una gestione coordinata di intervento a livello statale.

Sulla base di tutti queste considerazioni, questo studio ha aderito al progetto IEA Annex 75 "Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables", partecipando allo sviluppo della metodologia e all'applicazione dei casi studio.

La metodologia di calcolo, basata sul metodo cost optimality, mira a studiare le strategie più economicamente convenienti per ridurre le emissioni di carbonio e il consumo di energia negli edifici su scala urbana combinando le misure di efficienza energetica con quelle per l'uso di energia rinnovabile.

Il caso studio è stato analizzato per due tipi di applicazione: nella prima viene confrontato i metodi di calcolo semi-stazionario e dinamico, nella seconda viene testata la metodologia proposta dal progetto Annex 75.

Nel primo test i risultati evidenziano la potenziale applicazione del metodo semi-stazionario, ma dimostrano i limiti del calcolo semplificato nella determinazione del fabbisogno energetico degli edifici; il valore è sottostimato (-19%) nel momento in cui si valutano e l'apporto dei carichi interni e guadagni termici solari. Gli strumenti dinamici sono più affidabili, ma molto più complessi, e necessitano di conoscenze specifiche e finalizzate a una progettazione avanzata, mentre un tool semplificato può essere adottato anche da utenti non professionali coinvolti nel processo di pianificazione urbana (soprattutto policy makers, tecnici urbanistici e amministrazioni pubbliche), che hanno la necessità analizzare e valutare le prestazioni energetiche di distretti urbani.

Questa ricerca ha sviluppato un tool di calcolo in regime semi-stazionario in formato di foglio elettronico finalizzato al supporto dell'utenza generica e applicazione della metodologia del progetto Annex 75. Oltre alle potenzialità e alle criticità appena evidenziate, si evidenzia il possibile sviluppo futuro di implementazione del calcolo del raffrescamento e di un maggior dettaglio nella definizione impiantistica degli edifici. Infatti un limite riscontrato in questa ricerca che sarà approfondito come sviluppo futuro riguarda la traduzione nel sistema e nel tool di calcolo del fattore di contemporaneità dei consumi energetici nel caso di quartieri e di molteplici profili di utenza.

Nel secondo test è stata studiata una strategia di intervento sul quartiere che comprende scenari di intervento negli edifici con misure di intervento sull'involucro architettonico e sulla parte impiantistica. Sono stati selezionati quattro tipologie di materiale isolante e sono state definite misure di intervento che riguardano i componenti edilizi in combinazioni parametriche finalizzate ad aumentare progressivamente le prestazioni dell'involucro opaco. Per la parte impiantistica sono state valutate strategie di installazione rete centralizzate e decentralizzate di riscaldamento con cogeneratori a gas naturale e biomassa e pompe di calore abbinata a sistemi RES (fotovoltaico e solare termico).

Tra le (127) combinazioni analizzate sono stati valutati i valori di consumo di energia e di costo globale in modo da individuare la soluzione ottimale, ovvero la soluzione più conveniente tra quelle energeticamente efficaci.

La lezione appresa dai risultati può essere riassunta in alcuni punti.

In caso di ristrutturazione edilizia il passaggio da un impianto tradizionale decentralizzato a uno innovativo centralizzato è sicuramente un intervento trainante per il risparmio energetico.

Il passaggio a misure di energia rinnovabile è sicuramente efficiente dal punto di vista energetico ma non economicamente conveniente. Il contributo delle fonti rinnovabili è più importante per gli interventi che riguardano l'efficienza energetica dell'intero involucro edilizio, in quanto è minore la domanda energetica ed è più agevole l'obiettivo di nZEB.

L'isolamento termico della facciata esterna è conveniente ed efficiente dal punto di vista energetico ed è fondamentalmente giustificato dal fattore di forma S/V degli edifici del distretto, la cui tipologia edilizia è quella riconducibile prevalentemente all'edificio multipiano.

Pertanto la strategia di intervento su quartieri simili al caso studio può essere replicata, pur tenendo in considerazione due aspetti: la proposta delle misure di intervento e delle combinazioni è conseguente all'analisi e alla diagnosi degli edifici e pertanto vanno studiate la forma geometrica dell'edificio e la tipologia di destinazione d'uso, ovvero i parametri discriminanti sono i rapporti di forma S/V e i profili di utilizzo degli utenti.

Focalizzandosi ancora sul tema della replicabilità, la soluzione impiantistica deve essere commisurata con i regolamenti edilizi (e relativa burocrazia) e con la disponibilità dei vettori energetici. Il caso studio nel contesto veneziano ha rilevato l'importanza del contributo da soluzioni RES nella riduzione dei consumi di energia primaria; tuttavia questo scenario non risulta efficace per la resa e la dimensione del singolo dispositivo, né conveniente, né economicamente sostenibile per il costo di fornitura, oltre alla difficoltà realizzativa in contesto storico e tutelato. Anche la soluzione che prevede l'utilizzo di biomassa prevede l'installazione di sistemi di gestione e stoccaggio della materia prima e inoltre implica un sovraccosto di trasporto.

In generale, la metodologia è validata e le ipotesi di studio sono in maggioranza verificate; è validata nel principio fondamentale per il quale il costo globale permette valutazione obiettiva sul lungo termine, anche se è stato evidenziato come l'andamento dei prezzi e soprattutto i trend di previsione dei prezzi dell'energia possano influenzare le valutazioni.

Lo studio mostra l'importanza dell'uso di database aggiornati e la replicabilità della strategia e degli scenari proposti a scala di quartiere affinché siano di supporto ai decisori e pianificatori nella valutazione di soluzioni idonee per la riqualificazione urbana soprattutto in caso di contesti edilizi tutelati.

.....

.....

PUBBLICAZIONI

Vengono di seguito presentati sotto forma di intestazione e abstract gli articoli pubblicati per la diffusione di questa ricerca di dottorato.

1.

T. Dalla Mora, F. Zagarella, T. Blázquez, L. Teso, S. Ferrari, P. Romagnoni, **Energy-environmental and cost-effective assessment of a set of strategies for building renovation at district level in Southern Europe**, on review, Special Issue: Building Renovation – Towards a Decarbonized Building Stock 2050, Sustainability 13 (2021), (ISSN 2071-1050).

Due to its large responsibility in energy consumptions and related greenhouse gas emissions, the energy renovation of the existing building stock is considered prominent to achieve relevant results to contrast the climate change effects. The implementation of energy efficiency measures on large scale can be accelerated by boosting interventions at district level taking advantages from the economies of scale. Consistently, the ongoing Annex 75 of the International Energy Agency has the aim to investigate cost-effective strategies for achieving far-reaching reductions of green-house gas emissions and energy use in buildings in cities at district level, combining both energy efficiency measures and renewable energy measures.

In the framework of related activities, cost-effective strategies are investigated and compared for mainly residential urban districts, named “generic districts”, representative of each member Country built environment. Regarding the Italian context, a set of hypothetical districts, made of building blocks representative of the Sixties-Eighties period social housing districts, was analysed with reference to three different cities in order to consider the local wide climatic variability. For each district, a Reference case and a set of envelope measures were defined and then, dynamic building energy simulations were performed in order to obtain the related thermal energy needs hourly profiles. Then, a set of feasible energy supply improved scenarios, including either centralized and decentralized solutions and the integration of unpredictable renewable energy source-based technologies with storages, were analysed from the perspective of energy consumptions, CO₂ emissions and global costs.

Therefore, this study could provide guidance to policy makers, companies working in the field of the energy transition, as well as building owners for upgrading in a cost-effective way the Italian existing building stock towards low emission and low energy solutions. Moreover, due to the considered particular context, it can provide insights on energy use in those European Countries which are interested by a relevant space cooling energy demand and large availability of solar energy resources.

2.

L. Teso, T. Dalla Mora, P. Romagnoni, **Biomass in District Energy Systems: Overview and Perspectives for an Italian Case-Study**, on review for CLIMA 2022, the 14th HVAC World Congress, Rotterdam, (2022).

Buildings are one of the major users of energy in the European Union, accounting for almost half of the total consumption. In this scenario, renewable energy sources play a fundamental role in the transition towards a low-carbon society, and promoting their use is vital for the future of Europe. This work focuses on the use of district heating networks supplied with energy from biomass as a form of sustainable development for cities and communities, with attention to the Italian situation. After a first introductory part dealing with the European context of district energy networks, the focus shifts to Italy. It is introduced the diffusion on the national territory of district systems with a description of the most used energy sources that power these systems. To demonstrate how the use of biomasses in district energy networks represents a valid alternative to fossil fuels an analysis of the utilization of forests for wood harvesting in the Italian energy sector is carried out, showing how greenwoods and forests can withstand even greater exploitation for the collection of wood material for energy production. In order to prove the feasibility of the switch, a case study district, representative of the Italian residential building stock, is analysed. The district is firstly studied to evaluate the energy demand for space heating, and subsequently investigated by comparing different strategies for its energy efficiency improvement, all dealing with materials coming from wood processing, and switching from a decentralized energy system based on fossil fuels to a centralized network supplied by biomass. The results of the analysis show interesting results in primary energy consumption savings, ranging from 20% to 32%, and the reduction in greenhouse gas emission spanning from 13% to 68%, highlighting the potential of the demonstrated approach. Final remarks explain that, with the correct support of policies and awareness on the status of national forestry ecosystems, benefits are achievable through more intensive use of forests, leading to a higher share of natural feedstock in materials for the energy enhancement and energy production, that will help in reaching European sustainability goals.

3.

T. Dalla Mora, L. Teso, L. Carnieletto, A. Zarrella, P. Romagnoni, **Comparative analysis between dynamic and quasi-steady-state methods at an urban scale on a social-housing district in venice**, Energies. 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14165164>.

The residential building stock represents one of the major players in energy use and greenhouse gas emissions; thus, it is fundamental to reduce the energy used. Simulation tools are becoming more and more accurate in compliance with the new requirements both at the singlebuilding and at the district scale, although they are not affordable by non-specialist users such as policymakers. The research concerns the evaluation of the energy demand for space heating for a historical district that is representative of the Italian building stock. The work compares dynamic and specialist-oriented urban scale tools such as Energy Urban Resistance Capacitance Approach (EURECA) and City Energy Analyst (CEA) as well as a quasi-steady-state calculation method (Excel spreadsheet), which is more affordable for non-specialist users. The work was carried out to assess the possible deviation of the results between the dynamic and quasi-steady-state calculation methods, as well as to identify any limits and opportunities in the application of the latter procedure, which is currently the official national calculation tool for the implementation of Directive 2010/31/EU. The study shows how the quasi-steady-state method predicts a reliable building energy demand, in line with the results obtained by the two dynamic tools, when considering only geometry and infiltrations as input. However, the limits of the quasi-steady-state method emerge when introducing internal loads, significantly underestimating the energy demand compared to CEA and EURECA simulations. The results underline the potential application of the quasi-steady-state method to predict energy demand, although dynamics tools are more reliable but far more complex. Major findings through two methods concern the impact of solar heat gains on the overall heating demand at both the single building and the district scale. The different results between the tools provided evidence of a gap in the use of the simplest tool and demonstrated the accuracy and reliability of the proposed approach with a lower computational effort.

4.

J. Rose, K.E. Thomsen, S. Domingo-Irigoyen, R. Bolliger, D. Venus, T. Konstantinou, E. Mlecnik, M. Almeida, R. Barbosa, J. Terés-Zubiaga, E. Johansson, H. Davidsson, M. Conci, T. Dalla Mora, S. Ferrari, F. Zagarella, A. Sanchez Ostiz, J. San Miguel-Bellod, A. Monge-Barrio, J.M. Hidalgo-Betanzos, **Building renovation at district level – Lessons learned from international case studies**, Sustain. Cities Soc. 72 (2021) 103037. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103037>.

Renovation at district scale is a key strategy to reduce CO₂ emissions by optimising the implementation of renewable energy sources and taking advantage of economy of scale. This paper focuses on analysing good practice examples on energy renovations at district scale. The paper adapts a qualitative research methodology in four phases, including the multi-perspective analysis of nine exemplary renovation projects in six European countries, including identification of drivers and barriers of different stakeholders. It is found that the drivers for a district renovation are not restricted to energy savings, but typically also include improving the overall quality of life as well as the image and economic value of a district. Moreover, the need for financial models that can alleviate split-incentive problems between investors and resident organizations is identified. Barriers for carrying out a district renovation include that there is a need to comply with energy standards, that the renovation scope had to be limited to avoid a noticeable rent increase and that resettling of tenants during the renovation is often not possible. Lessons learned include that good communication amongst the different stakeholders, especially with residents, plays a key role for the success of the project. Furthermore, a strong leadership is needed to coordinate activities due to the great number of stakeholders.

5.

M. Condotta, T. Dalla Mora, G. Borga, F. Peron, **Buildings' Performance Simulations For Urban Scale Energy Demand Modelling In The Interreg Projects Idee And Ueb**, in: Build. Simul. Conf. Proc., 2019: pp. 3296–3302. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210418>.

The paper describes methods and results of a procedure for estimating the energy demand of urban areas by calculating energy performance of each individual buildings using a bottom-up approach. The procedure was developed in the framework of the European transnational project IDEE funded by the Interreg IV Italy-Austria programme. The devised methodology uses GIS procedure to analyze the characteristics of the building stock and a series of parametric dynamic energy simulations to calculate the energy demand of individual buildings. Results are compared with the outcomes of a previous research project that used the same city as case study.

6.

L. Teso, T. Dalla Mora, P. Romagnoni, F. Peron, [European projects on district energy-renovations and Italian best practices](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911103004), E3S Web Conf. 111 (2019) 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911103004>.

Buildings are the major source of greenhouse gas releases: lowering their energy consumption and emissions is particularly challenging for the existing building stock. This topic was examined at an individual building level in the International Energy Agency's EBC Annex 56. However, the increasing request of nearly zero energy buildings highlight another important topic: the need of an increase in energy production for satisfying the required amount of renewable energy sources. This task could be solved at the district level for the existing buildings, even if it is a complex issue. This work presents a general introduction on the topic of Urban and Regional Integrated Energy Planning, with a focus on the regional and supraregional process to create and manage energy plans. After the first introductory part, the method is explained through a description of its main phases and the tools used. The subsequent section presents a general overview on the European projects that deal with the problem of district regeneration; the ones that are more related to the topic of this work are considered in a deeper way through tangible applications in Italian cities. The study of already done examples will help in the definition of benefits and drawbacks, with the aim to defining newer and better energy planning procedures.

.....

.....

BIBLIOGRAFIA

- [1] Eurostat, Energy, transport and environment indicators. 2018 edition, 2018. <https://doi.org/10.2785/94549>.
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs Population Division, World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, (ST/ESA/SER.A/366), (2015) 517.
- [3] R.K. Pachauri, M.R. Allen, V.R. Barros, J. Broome, W. Cramer, R. Christ, J.A. Church, L. Clarke, Q. Dahe, P. Dasgupta, Others, The Core Writing Team, R.K. Pachauri, L. Meyer, M.R. Allen, V.R. Barros, J. Broome, W. Cramer, R. Christ, J.A. Church, L. Clarke, Q. Dahe, P. Dasgupta, Others, Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ipcc, 2014. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf (accessed September 10, 2021).
- [4] European Commission, 2020 climate & energy package, (n.d.). https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en.
- [5] European Commission, 2030 climate & energy framework, (n.d.).
- [6] European Commission, The European Green Deal (COM(2019) 640 final), Publications Office of the European Union, 2019. https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication_en.pdf.
- [7] European Commission, Directive 2012/27/EU on energy efficiency, (2012).
- [8] European Commission, The European Parliament and the Council of the European Union, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Official journal of the European Union L315/1, Brussels, Belgium, 2010.
- [9] O. Mørck, M. Almeida, M. Ferreira, N. Brito, K.E. Thomsen, I. Østergaard, Shining examples analysed within the EBC Annex 56 project, Energy Build. 127 (2016) 991–998. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.091>.
- [10] European Commission, EU Building Stock Observatory, (2016). https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/eu-bso_it.
- [11] A. Arcipowska, O. Rapf, M. Faber, M. Fabbri, C. Tigchelaar, T. Boermans, N. Surmeli-Anac, K. Pollier, F. Dal, C. Sebi, J. Karásek, Support for setting up an observatory of the building stock and related policies, in: 2016.
- [12] ISTAT, Dati Censimento della Popolazione, 2014. (2018). <http://dati-censimentopopolazione.istat.it> (accessed May 5, 2021).
- [13] Parlamento Italiano, Decreto Legislativo (D.Lgs.) 19 agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia., Roma, 2005.
- [14] S. Paiho, J. Ketomäki, L. Kannari, T. Häkkinen, J. Shemeikka, A new procedure for assessing the energy-efficient refurbishment of buildings on district scale, Sustain. Cities Soc. 46 (2019) 101454. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101454>.
- [15] S. Domingo-Irigoyen, A. Sánchez-Ostiz, J.S. Miguel-Bellod, Cost-effective Renovation of a Multi-residential Building in Spain through the Application of the IEA Annex 56 Methodology, Energy Procedia. 78 (2015) 2385–2390. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.194>.
- [16] F. Cappelletti, T.D. Mora, F. Peron, P. Romagnoni, P. Ruggeri, T. Dalla Mora, F. Peron, P. Romagnoni, P. Ruggeri, Building Renovation: Which Kind of Guidelines could be Proposed for Policy Makers and Professional Owners?, Energy Procedia. 78 (2015) 2366–2371. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.189>.
- [17] M. Almeida, M. Ferreira, Cost effective energy and carbon emissions optimization in building renovation (Annex 56), Energy Build. 152 (2017) 718–738. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.050>.
- [18] K.E. Thomsen, J. Rose, O. Mørck, S.Ø. Jensen, I. Østergaard, Energy Consumption in an Old Residential Building Before and After Deep Energy Renovation, Energy Procedia. 78 (2015) 2358–2365. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.398>.
- [19] IEA EBC, IEA-EBC Annex 56, Cost Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation, (2018). <http://www.iea-annex56.org/index.aspx>.
- [20] M. Conci, J. Schneider, A District Approach to Building Renovation for the Integral Energy Redevelopment of Existing Residential Areas, Sustain. 2017, Vol. 9, Page 747. 9 (2017) 747. <https://doi.org/10.3390/SU9050747>.
- [21] European Commission, Commission recommendation (EU) 2019/786 of 8 May 2019 on building renovation, Off. J. Eur. Union. (2019) 34–79.
- [22] European Commission, Directive (EU) 2018/844 of 30 May 2018, (2018) 17.
- [23] S.S. Castro, M.J. Suárez López, D.G. Menéndez, E.B. Marigorta, Decision matrix methodology for retrofitting techniques of existing buildings, J. Clean. Prod. 240 (2019).
- [24] V. D'Alonzo, A. Novelli, R. Vaccaro, D. Vettorato, R. Albatici, C. Diamantini, P. Zambelli, A bottom-up spatially explicit methodology to estimate the space heating demand of the building stock at regional scale, Energy Build. 206 (2020) 109581. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109581>.
- [25] S. Ferrari, F. Zagarella, P. Caputo, A. D'Amico, Results of a literature review on methods for estimating buildings energy demand at district level, Energy. 175 (2019) 1130–1137. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.172>.
- [26] S. Ferrari, F. Zagarella, P. Caputo, M. Bonomolo, Assessment of tools for urban energy planning, Energy. 176 (2019) 544–551. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.054>.

- [27] J. Terés-Zubiaga, M.G. Almeida, O. Mørck, R. Bolliger, D. Venus, Potential of building renovation at district level for reducing CO2 emissions and fostering urban regeneration. IEA-EBC Annex 75, in: Proc. 10th Eur. Conf. Energy Effic. Sustain. Archit. Plan., 2019.
- [28] IEA EBC, IEA EBC Annex 75 - Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables, (2017).
- [29] Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima PNIEC, (2019).
- [30] Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, Decreto Ministeriale 07/10/2021 n. 383. Assegnazione di 2,8 miliardi di euro per il programma PinQua sulla qualità dell'abitare, (2021).
- [31] J.-C. Piris, Il trattato di Lisbona, Giuffrè editore, 2013.
- [32] Parlamento Italiano, Legge 30 marzo 1976, n. 373. Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici, Roma, 1976.
- [33] F. Petri, La crisi energetica del 1973. Le multinazionali del petrolio e la fine dell'età dell'oro (nero), Contemporanea. 15 (2012) 445–473.
- [34] Consiglio dei Ministri, Decreto Ministeriale (D.M.) n. 36 del 10 marzo 1977, (1977).
- [35] Parlamento Italiano, Legge n. 308 del 29 maggio 1982, Roma, 1982.
- [36] Parlamento Italiano, Legge n. 10 del 9 gennaio 1991. 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., Roma, 1991.
- [37] Parlamento Italiano, Decreto del Presidente della Repubblica, Decreto del Presidente della Repubblica (D.P.R.) n. 412 del 26 agosto 1993. 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, G. U., Roma, 1993. <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1993/10/14/093G0451/sg>.
- [38] Italian Organisation for Standardisation (UNI), UNI 10349-1:2016, Heating and cooling of buildings - Climatic data - Part 1: Monthly means for evaluation of energy need for space heating and cooling and methods for splitting global solar irradiance into the direct and diffuse parts and for calculate th, 2016.
- [39] S. Nespor, La lunga marcia per un accordo globale sul clima: dal Protocollo di Kyoto all'Accordo di Parigi, Riv. Trimest. Di Dirit. Pubblico. 1 (2016) 81–121.
- [40] European Parliament, Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings., Brussels, 2002.
- [41] Parlamento Italiano, Decreto Legislativo (D.Lgs.) 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, Roma, 2006.
- [42] Parlamento Italiano, Decreto del Presidente della Repubblica (D.P.R.) 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 ene, Roma, 2009.
- [43] UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI/TS 11300:2008, (2008).
- [44] European Commission, The European Parliament and the Council of the European Union, Directive 2006/32/EC of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on energy end-use efficiency and energy services and repealing Council Directive 93/76/EC, Brussels, 2006.
- [45] Parlamento Italiano, Decreto Legislativo (D.Lgs.) 30 maggio 2008, n. 115. Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della Direttiva 93/76/CEE, Roma, 2008.
- [46] Parlamento Italiano, Decreto Legislativo (D.Lgs.) 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, Roma, 2011.
- [47] European Commission, The European Parliament and the Council of the European Union, Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC., Brussels, 2009.
- [48] European Commission, The European Parliament and the Council of the European Union, Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC., Brussels, 2012.
- [49] Parlamento Italiano, Decreto Legge (D.L.) 4 giugno 2013, n. 63. 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., Roma, 2013.
- [50] Parlamento Italiano, Decreto del Presidente della Repubblica (D.P.R.) 16 aprile 2013, n. 74. Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale e, Roma, 2013.

- [51] Ministero dello Sviluppo Economico, M. delle I. Ministro della Salute, Ministro dell'Ambiente, Decreto 26 giugno 2015. Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici., Roma, 2015. <https://www.mise.gov.it/index.php/it/normativa/decreti-interministeriali/2032966-decreto-interministeriale-26-giugno-2015-applicazione-delle-metodologie-di-calcolo-delle-prestazioni-energetiche-e-definizione-delle-prescrizioni-e-dei-requisiti-minimi-degli> (accessed September 10, 2021).
- [52] Parlamento Italiano, Decreto Legislativo (D.Lgs.) 10 giugno 2020, n. 48. Attuazione della direttiva 2018/844/CE del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27 sull'efficienza energetica., Roma, 2020.
- [53] European Commission, Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law'), (2021).
- [54] Governo Italiano, Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), (2021).
- [55] J. Rose, K.E. Thomsen, S. Domingo-Irigoyen, R. Bolliger, D. Venus, T. Konstantinou, E. Mlecnik, M. Almeida, R. Barbosa, J. Terés-Zubiaga, E. Johansson, H. Davidsson, M. Conci, T.D. Mora, S. Ferrari, F. Zagarella, A. Sanchez Ostiz, J. San Miguel-Bellod, A. Monge-Barrio, J.M. Hidalgo-Betanzos, Building renovation at district level – Lessons learned from international case studies, *Sustain. Cities Soc.* 72 (2021) 103037. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103037>.
- [56] L. Teso, T.D. Mora, P. Romagnoni, F. Peron, European projects on district energy-renovations and Italian best practices, in: S.. Tanabe, H. Zhang, J. Kurnitski, M.C. Gameiro da Silva, I. Nastase, P. Wargocki, G. Cao, L. Mazzarella, C. Inard (Eds.), *E3S Web Conf.*, 2019: p. 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911103004>.
- [57] K. Riley, EEI's new board chairman cites smart-city opportunities as convention gets under way, *Dly. Energy Insid.* (2017).
- [58] O. Lindholm, H. ur Rehman, F. Reda, Positioning Positive Energy Districts in European Cities, *Buildings*. 11 (2021) 19. <https://doi.org/10.3390/buildings11010019>.
- [59] European Commission, 7th Research Framework Programme, (n.d.). https://ec.europa.eu/defence-industry-space/eu-space-policy/space-research-and-innovation/seventh-framework-programme-fp7_it.
- [60] Transform, (n.d.). urbantransform.eu.
- [61] READY - Resource Efficient Cities Implementing Advanced Smart City Solutions, (n.d.). <http://www.smartcity-ready.eu/>.
- [62] Triangulum - The Three Point Project / Demonstrate Disseminate Replicate, (n.d.). <https://triangulum-project.eu/>.
- [63] REPLICATE - Renaissance of Places with Innovative Citizenship and Technology, (n.d.). <https://replicate-project.eu/>.
- [64] SmartReFlex, (n.d.). <http://www.smartreflex.eu/>.
- [65] A. Goldthau, Rethinking the governance of energy infrastructure: Scale, decentralization and polycentrism, *Energy Res. Soc. Sci.* 1 (2014) 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.02.009>.
- [66] Home page - FP7 - Research - Europa, (n.d.).
- [67] S. Pezzutto, F. Mosannenzadeh, G. Grilli, W. Sparber, European Union research and development funding on smart cities and their importance on climate and energy goals, *Smart Sustain. Plan. Cities Reg.* 2030 (2017) 421–435. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44899-2_24.
- [68] What is FP7? - FP7 in Brief - Research - EUROPA, (n.d.).
- [69] N. Morishita, M. Heidenreich, R. Hemmers, M. Vankann, T. Sahakari, T. Vainio, L. Pagliano, M. Treberspurg, D. Österreicher, EU-GUGLE: A Sustainable Renovation for Smarter Cities from a Pilot Project, in: *Smart Sustain. Plan. Cities Reg. SSPCR 2015*, 2017: pp. 353–382. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44899-2_21.
- [70] Project - EU-GUGLE, (n.d.). <http://eu-gugle.eu>.
- [71] R2CITIES - Residential Renovation towards nearly zero energy CITIES, (n.d.). <http://r2cities.eu/>.
- [72] M.A. Garcia-Fuentes, C. Pujols, R. Garcia-Pajares, Residential areas retrofitting towards nearly Zero Energy Districts (nZED). A case study: Valladolid-Cuatro de Marzo, in: *Proc. World Sustain. Build. 2014 Conf. Barcelona, Spain*, 2014: pp. 28–30.
- [73] Sinfonia Smartcities - Project, (n.d.). <http://www.sinfonia-smartcities.eu/it/>.
- [74] T.W. Ag, L. Rochelle, Consorzio SINFONIA . Città che consumano meno e vivono meglio Innsbruck, (n.d.) 11–12.
- [75] Y. Nzengue, A. Du Boishamon, K. Laffont-Eloire, V. Partenay, Y. Abdelouadoud, P. Zambelli, V. D'Alonzo, R. Vaccaro, Planning city refurbishment: An exploratory study at district scale how to move towards positive energy districts - Approach of the SINFONIA project, 2017 *Int. Conf. Eng. Technol. Innov. Eng. Technol. Innov. Manag. Beyond 2020 New Challenges, New Approaches, ICE/ITMC 2017 - Proc. 2018-Janua (2018)* 1394–1400. <https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8280045>.
- [76] F. Mosannenzadeh, A. Bisello, C. Diamantini, G. Stellin, D. Vettorato, A case-based learning methodology to predict barriers to implementation of smart and sustainable urban energy projects, *Cities*. 60 (2017) 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.07.007>.
- [77] S. Pezzutto, R. Fazeli, M. De Felice, Smart City Projects Implementation in Europe: Assessment of Barriers and Drivers, *Int. J. Contemp. ENERGY*. 2 (2016) 46–55. <https://doi.org/10.14621/ce.20160207>.

- [78] T. Dalla Mora, M. Pinamonti, L. Teso, G. Boscato, F. Peron, P. Romagnoni, Renovation of a school building: Energy retrofit and seismic upgrade in a school building in Motta Di Livenza, *Sustain.* 10 (2018). <https://doi.org/10.3390/su10040969>.
- [79] R. Neri, L.A. Pezzetti, Slow Mobility, Greenways, and Landscape Regeneration. Reusing Milan's Parco Sud Decommissioned Rail Line as a Landscape Cycle Path, 2019, in: *Regen. Built Environ. from a Circ. Econ. Perspect.*, Springer, Cham, 2020: pp. 149–158.
- [80] L. Pagliano, S. Carlucci, F. Causone, A. Moazami, G. Cattarin, Energy retrofit for a climate resilient child care centre, *Energy Build.* 127 (2016) 1117–1132. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.092>.
- [81] Milano - EU-GUGLE, (n.d.).
- [82] R2cities project, The Lavatrici District, Genoa, (2014). http://r2cities.eu/demos/genoa/case_study_in_short.kl.
- [83] 2CITIES Project, Deliverable D4.7 M&V Plan for Genoa demo site, 2014. https://smart-cities-marketplace.ec.europa.eu/sites/default/files/r2cities_m_and_v_plan_for_genoa_demo.pdf.
- [84] Sinfonia Smartcities - Bolzano, (n.d.). <http://www.sinfonia-smartcities.eu/it/citta-pilota-dettaglio/bolzano/demonstration-buildings>.
- [85] SINFONIA Factsheet, Demonstration Building, Housing Complex - Via Palermo, (2017).
- [86] SINFONIA Factsheet, Demonstration Building, Housing Complex - Via Similaun, (2017).
- [87] SINFONIA Factsheet, Demonstration Building, Housing Complex - Via Passeggiata dei Castani, (2017).
- [88] SINFONIA Factsheet, Demonstration Building, Housing Complex - Via Brescia, (2017).
- [89] T. Dalla Mora, L. Teso, L. Carnieletto, A. Zarrella, P. Romagnoni, Comparative Analysis between Dynamic and Quasi-Steady-State Methods at an Urban Scale on a Social-Housing District in Venice, (2021). <https://doi.org/10.3390/en14165164>.
- [90] B. Rismanchi, District energy network (DEN), current global status and future development, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 75 (2017) 571–579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.025>.
- [91] G. Schweiger, R. Heimrath, B. Falay, K. O'Donovan, P. Nageler, R. Pertschy, G. Engel, W. Streicher, I. Leusbrock, District energy systems: Modelling paradigms and general-purpose tools, *Energy.* 164 (2018) 1326–1340. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.193>.
- [92] I. van Beuzekom, M. Gibescu, J.G. Slootweg, A review of multi-energy system planning and optimization tools for sustainable urban development, in: 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, IEEE, 2015: pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/PTC.2015.7232360>.
- [93] T. Hong, Y. Chen, X. Luo, N.N. Luo, S.H.S.H.S.H. Lee, Ten questions on urban building energy modeling, *Build. Environ.* 168 (2020) 106508. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106508>.
- [94] C.F. Reinhart, C. Cerezo Davila, Urban building energy modeling - A review of a nascent field, *Build. Environ.* 97 (2016) 196–202.
- [95] P. Lombardi, F. Abastante, J. Toniolo, Multicriteria Spatial Decision Support Systems for Future Urban Energy Retrofitting Scenarios, *Sustainability.* 9 (2017) 1252. <https://doi.org/10.3390/su9071252>.
- [96] B. Zanon, S. Verones, Climate change, urban energy and planning practices: Italian experiences of innovation in land management tools, *Land Use Policy.* 32 (2013) 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.11.009>.
- [97] L.G.L.G.L.G. Swan, V.I.I. Ugursal, Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 (2009) 1819–1835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>.
- [98] M. Kavgic, A. Mavrogianni, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanovic, M. Djurovic-Petrovic, A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector, *Build. Environ.* 45 (2010) 1683–1697. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.021>.
- [99] T. Hong, X. Luo, Modeling building energy performance in urban context, in: IBPSA (Ed.), *Build. Perform. Anal. Conf. SimBuild Co-Organized by ASHRAE IBPSA-USA*, Chicago, 2018.
- [100] S. Torabi Moghadam, C. Delmastro, S.P. Corgnati, P. Lombardi, Urban energy planning procedure for sustainable development in the built environment: A review of available spatial approaches, *J. Clean. Prod.* 165 (2017) 811–827. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.142>.
- [101] M. Aydinalp-Koksal, V.I. Ugursal, Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector, *Appl. Energy.* 85 (2008) 271–296. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.09.012>.
- [102] M. Ferrando, F. Causone, T. Hong, Y. Chen, Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches, *Sustain. Cities Soc.* 62 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102408>.
- [103] G. Mendes, C. Ioakimidis, P. Ferrão, On the planning and analysis of Integrated Community Energy Systems: A review and survey of available tools, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 4836–4854. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.067>.
- [104] S. Savić, A. Selakov, D. Milošević, Cold and warm air temperature spells during the winter and summer seasons and their impact on energy consumption in urban areas, *Nat. Hazards.* 73 (2014) 373–387. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1074-y>.
- [105] M.D. Doyle, Investigation of dynamic and steady state calculation methodologies for determination of building energy performance in the context of the EPBD, *Engineering.* (2008). <https://doi.org/10.21427/D7GG71>.

- [106] S.H. Kim, Selection of Energy Conservation Measures for Building Energy Retrofit: a Comparison between Quasi-steady State and Dynamic Simulations in the Hands of Users, *KIEAE J.* 16 (2016) 5–12. <https://doi.org/10.12813/kieae.2016.16.6.005>.
- [107] V. Corrado, E. Fabrizio, Steady-State and Dynamic Codes, Critical Review, Advantages and Disadvantages, Accuracy, and Reliability, in: *Handb. Energy Effic. Build.*, Elsevier, 2019: pp. 263–294. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812817-6.00011-5>.
- [108] V.L. Castaldo, A.L. Pisello, Uses of dynamic simulation to predict thermal-energy performance of buildings and districts: a review, *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.* 7 (2018) e269. <https://doi.org/10.1002/wene.269>.
- [109] T. Zakula, M. Bagaric, N. Ferdelji, B. Milovanovic, S. Mudrinic, K. Ritosa, Comparison of dynamic simulations and the ISO 52016 standard for the assessment of building energy performance, *Appl. Energy.* 254 (2019) 113553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113553>.
- [110] D. Connolly, H. Lund, B.V. V. Mathiesen, M. Leahy, A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems, *Appl. Energy.* 87 (2010) 1059–1082. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.026>.
- [111] D.B. Crawley, C.O. Pedersen, R.J. Liesen, D.E. Fisher, R.K. Strand, R.D. Taylor, L.K. Lawrie, U.S.A.C. Engineering, F.C. Winkelmann, W.F. Buhl, A.E. Erdem, Y.J. Huang, New-Generation Building Energy Simulation Program, *Proc. Build. Simul.* 1999. 1 (n.d.) 81–88.
- [112] L.D. Ratnasari, S.T.M.T. Senot Sangadji, S.T.M.T. Endah Safitri, Evaluation of energy consumption with EnergyPlus simulation in of fice existing buildings, *AIP Conf. Proc.* 2296 (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0031273>.
- [113] S.W. Lee, X. Qian, S. Garcia, An analysis of integrated ventilation systems with desiccant wheels for energy conservation and IAQ improvement in commercial buildings, *J. Biourbanism.* 3 (2014) 1–2. <https://www.researchgate.net/publication/287208611> (accessed September 10, 2021).
- [114] J.D. Rhodes, W.H. Gorman, C.R. Upshaw, M.E. Webber, Using BEopt (EnergyPlus) with energy audits and surveys to predict actual residential energy usage, *Energy Build.* 86 (2015) 808–816. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.076>.
- [115] J. Ligade, D. Sebastian, A. Razban, Challenges of creating a verifiable building energy model, *ASHRAE Trans.* 125 (2019) 20–28.
- [116] S.W. Qian, Xuejun and Lee, The Design and Analysis of Energy Efficient Building Envelopes for the Commercial Buildings by Mixed-level Factorial Design and Statistical Methods, *Proc. ASEE Middle Atl. Am. Soc. Eng. Educ. Swart. PA, USA.* (2014) 14--15.
- [117] K. Sartor, S. Quoilin, P. Dewallef, Simulation and optimization of a CHP biomass plant and district heating network, *Appl. Energy.* 130 (2014) 474–483. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.097>.
- [118] L. Fraysinet, L. Merlier, F. Kuznik, J.L.J.-L. Hubert, M. Milliez, J.-J.J.J.-J. Roux, Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81 (2018) 2318–2327. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.040>.
- [119] G. Happle, J.A.J.A. Fonseca, A. Schlueter, A review on occupant behavior in urban building energy models, *Energy Build.* 174 (2018) 276–292. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.06.030>.
- [120] M. Mosteiro-Romero, I. Hischer, J.A. Fonseca, A. Schlueter, A novel population-based occupancy modeling approach for district-scale simulations compared to standard-based methods, *Build. Environ.* 181 (2020) 107084. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.107084>.
- [121] L.A. Bollinger, R. Evins, HUES: A holistic urban energy simulation platform for effective model integration, *Proc. Int. Conf. CISBAT 2015 Futur. Build. Dist. Sustain. from Nano to Urban Scale.* (2015) 841–846. <https://doi.org/10.5075/EPFL-CISBAT2015-841-846>.
- [122] J. Allegrini, K. Orehounig, G. Mavromatidis, F. Ruesch, V. Dorer, R. Evins, A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52 (2015) 1391–1404. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.07.123>.
- [123] J. Keirstead, M. Jennings, A. Sivakumar, A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 3847–3866. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.02.047>.
- [124] L. Bourdic, S. Salat, Building energy models and assessment systems at the district and city scales: a review, *Build. Res. Inf.* 40 (2012) 518–526. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.690951>.
- [125] Plan4DE, (n.d.). <http://plan4de.ssg.coop>.
- [126] EXCEED, (n.d.). <https://dashboard.exceedproject.eu/>.
- [127] Hotmaps project, (n.d.). <https://www.hotmaps.eu/map>.
- [128] X. Zhang, G. Strbac, N. Shah, F. Teng, D. Pudjianto, Whole-System Assessment of the Benefits of Integrated Electricity and Heat System, *IEEE Trans. Smart Grid.* 10 (2019) 1132–1145. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2871559>.
- [129] THERMOS, (n.d.). <https://www.thermos-project.eu/home/>.
- [130] CitySim, (n.d.). <https://www.epfl.ch/labs/leso/transfer/software/citysim/>.
- [131] UMI Urban Modeling Interface, (n.d.). <http://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html>.
- [132] SimStadt, (n.d.). <https://simstadt.hft-stuttgart.de/de/index.jsp>.
- [133] CityBES, (n.d.). <https://citybes.lbl.gov/>.
- [134] OpenIDEAS, (n.d.). <https://github.com/open-ideas>.
- [135] City Energy Analyst, (n.d.). <https://cityenergyanalyst.com/>.

- [136] URBANopt, (n.d.). <https://www.nrel.gov/buildings/urbanopt.html>.
- [137] TEASER, (n.d.). <https://github.com/RWTH-EBC/TEASER>.
- [138] D. Robinson, F. Haldi, P. Leroux, D. Perez, A. Rasheed, U. Wilke, CITYSIM: Comprehensive Micro-Simulation of Resource Flows for Sustainable Urban Planning, in: Proc. Elev. Int. IBPSA Conf., Glasgow, 2009: pp. 1083–1090. <http://infoscience.epfl.ch/record/148717>.
- [139] Open Geospatial Consortium, CityGML, (2018).
- [140] G. Agugiaro, J. Benner, P. Cipriano, R. Nouvel, The Energy Application Domain Extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulations, Open Geospatial Data, Softw. Stand. 3 (2018) 2. <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0042-y>.
- [141] C. Reinhart, T. Dogan, J.A. Jakubiec, T. Rakha, A. Sang, Umi-an urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability, in: Building Simulation (Ed.), 13th Conf. Int. Build. Perform. Simul. Assoc., Chambery, 2013: pp. 476–483.
- [142] T. Hong, Y. Chen, S.H. Lee, M. Piette, CityBES: A Web-based Platform to Support City-Scale Building Energy Efficiency, 2016.
- [143] R. Baetens, R. De Coninck, F. Jorissen, D. Picard, L. Helsen, D. Saelens, Openideas - An open framework for integrated district energy simulations, in: 14th Int. Conf. IBPSA - Build. Simul. 2015, BS 2015, Conf. Proc., 2015: pp. 347–354.
- [144] Python Software Foundation, Welcome to python.org, (2019). <https://www.python.org>.
- [145] J.A.J.A. Fonseca, T.-A.T.A. Nguyen, A. Schlueter, F. Marechal, City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts, Energy Build. 113 (2016) 202–226. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.11.055>.
- [146] B. Polly, C. Kutscher, D. Macumber, M. Schott, S. Pless, B. Livingood, O. Geet, From Zero Energy Buildings to Zero Energy Districts, 2016.
- [147] P. Remmen, M. Lauster, M. Mans, M. Fuchs, T. Osterhage, D. Müller, TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks, J. Build. Perform. Simul. 11 (2018) 84–98. <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1283539>.
- [148] European Commission, Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012, supplementing Directive 2010/31EU on the energy performance of buildings, establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performan, (2012).
- [149] CEN (European Committee for Standardization), UNE EN 15459-1:2018 Energy performance of buildings - Economic evaluation procedure for energy systems in buildings - Part 1: Calculation procedures, Brussels, 2018.
- [150] M. Condotta, T. Dalla Mora, G. Borga, F. Peron, Buildings' Performance Simulations For Urban Scale Energy Demand Modelling In The Interreg Projects Idee And Ueb, in: Build. Simul. Conf. Proc., 2019: pp. 3296–3302. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210418>.
- [151] M. Almeida, M. Ferreira, IEA EBC Annex56 Vision for Cost Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation, Energy Procedia. 78 (2015) 2409–2414. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.206>.
- [152] Ministero dello Sviluppo Economico, Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica (Direttiva 2010/31/UE Art.5), (2013).
- [153] A. Kyllili, P.A. Fokaides, P.A. Lopez Jimenez, Key Performance Indicators (KPIs) approach in buildings renovation for the sustainability of the built environment: A review, Renew. Sustain. Energy Rev. 56 (2016) 906–915.
- [154] CEN (European Committee for Standardization), ISO 52016-1:2017, Energy performance of buildings - Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads - Part 1: Calculation procedures, (2017).
- [155] CEN (European Committee for Standardization), ISO 52017-1:2017, Energy performance of buildings — Sensible and latent heat loads and internal temperatures — Part 1: Generic calculation procedures, (2017).
- [156] CEN (European Committee for Standardization), ISO 18523-1:2016, Energy performance of buildings — Schedule and condition of building, zone and space usage for energy calculation — Part 1: Non-residential buildings, (2016).
- [157] CEN (European Committee for Standardization), ISO 52000-1:2017, Energy performance of buildings — Overarching EPB assessment — Part 1: General framework and procedures, (2017).
- [158] UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN 15316-4-5:2018 Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo delle richieste di energia e delle efficienze del sistema - Parte 4-5: Teleriscaldamento e teleraffrescamento, Moduli M3-8-5, M4-8-5, M8-8-5, M11-8-5, (2018).
- [159] E. Cuerda, O. Guerra-Santin, J.J. Sendra, F.J. Neila, Understanding the performance gap in energy retrofiting: Measured input data for adjusting building simulation models, Energy Build. 209 (2020).
- [160] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI/TS 11300:2014 - Part 1: Evaluation of energy need for space heating and cooling, Milan, Italy, 2014.
- [161] Eurostat Energy Database, Report and Database of statistics on electricity and natural gas prices, (2018). <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/methodology/prices>.
- [162] Aiel - Associazione Italiana Energie Agroforestali, AIEL, Mercati & prezzi, Vol. 12, n.1. (2018). https://www.aielenergia.it/public/pubblicazioni/162_M_P_1-2020.pdf.
- [163] H. Chesbrough, To recover faster from Covid-19, open up: Managerial implications from an open innovation perspective, Ind. Mark. Manag. 88 (2020) 410–413. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2020.04.010>.

- [164] ARERA, Relazione Annuale, (2020). https://www.arera.it/it/relaz_ann/20/20.htm.
- [165] IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2020, Abu Dhabi, 2021. <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>.
- [166] Centro Studi Confindustria, I rincari delle commodity, in particolare del gas e dell'energia elettrica, rischiano di bloccare le imprese, Milano, n.d.
- [167] PricePedia, PricePedia - Servizi informativi, (2021). <http://pricepedia.it>.
- [168] Trading Economics, Trading Economics, Servizi e Consulenza, (2021). <https://tradingeconomics.com>.
- [169] S. Fuzzi, U. Baltensperger, K. Carslaw, S. Decesari, H. Denier van der Gon, M.C. Facchini, D. Fowler, I. Koren, B. Langford, U. Lohmann, E. Nemitz, S. Pandis, I. Riipinen, Y. Rudich, M. Schaap, J.G. Slowik, D. V. Spracklen, E. Vignati, M. Wild, M. Williams, S. Gilardoni, Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs, *Atmos. Chem. Phys.* 15 (2015) 8217–8299. <https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>.
- [170] EEA European Environment Agency, Air quality in Europe — 2020 report, Luxembourg, 2020. <https://doi.org/10.2800/786656>.
- [171] EEA European Environment Agency, Air quality in Europe — 2021 report, Luxembourg, 2021. <https://doi.org/10.2800/549289>.
- [172] World Health Organization, WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, World Health Organization, 2021. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
- [173] WHO World Health Organization, Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, (2006) 484. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107823>.
- [174] ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Italian Emission Inventory 1990-2018 - Informative Inventory Report 2020, 2020.
- [175] Aiel - Associazione Italiana Energie Agroforestali, Libro bianco sul futuro del riscaldamento a legna e pellet, Padova, 2021. https://aielenergia.it/public/LibroBianco_ia.pdf.
- [176] INEMAR (INventario EMissioni ARia), database INEMAR, (2020). <https://www.inemar.eu/xwiki/bin/view/Inemar/WebHome>.
- [177] S. Patti, S. Pillon, B. Intini, L. Susanetti, Report sull'indagine per stimare i consumi di biomasse legnose nel residenziale, in: ARPA Veneto (Ed.), Action D3. Consum. Resid. Di Biomasse Legnose Nel Bacino Padano, progetto PREPAIR (LIFE 15 IPE IT 013), 2019: p. 38.
- [178] G. Ferla, P. Caputo, Biomass district heating system in Italy: A comprehensive model-based method for the assessment of energy, economic and environmental performance, *Energy*. 244 (2022) 123105. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123105>.
- [179] P. Caputo, G. Ferla, S. Ferrari, Evaluation of environmental and energy effects of biomass district heating by a wide survey based on operational conditions in Italy, *Energy*. 174 (2019) 1210–1218. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.073>.
- [180] J.A.J.A. Fonseca, A. Schlueter, Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts, *Appl. Energy*. 142 (2015) 247–265. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.068>.
- [181] CEN (European Committee for Standardization), ISO 13790:2008 Energy Performance of Buildings: Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling, Brussels, Belgium, 2008.
- [182] E. Prativiera, P. Romano, L. Carnieletto, F. Pirotti, J. Vivian, A. Zarrella, EUReCA: An open-source urban building energy modelling tool for the efficient evaluation of cities energy demand, *Renew. Energy*. 173 (2021) 544–560. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.144>.
- [183] CEN (European Committee for Standardization), UNI EN ISO 13786: 2007, Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods, Brussels, 2007.
- [184] A. Zarrella, E. Prativiera, P. Romano, L. Carnieletto, J. Vivian, Analysis and application of a lumped-capacitance model for urban building energy modelling, *Sustain. Cities Soc.* 63 (2020) 102450. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102450>.
- [185] US Department of Energy, Weather Data | EnergyPlus, (n.d.).
- [186] T. Dalla Mora, F. Peron, P. Romagnoni, M. Almeida, M. Ferreira, Tools and procedures to support decision making for cost-effective energy and carbon emissions optimization in building renovation, *Energy Build.* 167 (2018) 200–215. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.030>.
- [187] K.E. Thomsen, J. Rose, O. Mørck, S.Ø. Jensen, I. Østergaard, H.N. Knudsen, N.C. Bergsøe, Energy consumption and indoor climate in a residential building before and after comprehensive energy retrofitting, *Energy Build.* 123 (2016) 8–16.
- [188] Comitato Termotecnico Italiano CTI, Archivi Anni Tipo Climatici, (2015).
- [189] CEN (European Committee for Standardization), ISO 15927-4: 2005--Hygrothermal Performance of Buildings--Calculation and Presentation of Climatic Data--Part 4: Hourly Data for Assessing the Annual Energy Use for Heating and Cooling, Brussels, Belgium, 2005.
- [190] Regione Veneto, Prezzario regionale dei lavori pubblici, (2014). <https://www.regione.veneto.it/article-detail?articleGroupId=10777&articleId=2559505>.
- [191] Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto—ARPAV, Bollettino meteo, (n.d.).
- [192] Presidente della Repubblica, Italian law n.74/ 2013, Gazz. Ufficiale 27 Giugno 2013, n. 149., (2013) 1–11. http://www.edizionieuropee.it/LAW/HTML/200/zn40_04_019.html.

- [193] E. Barbiani, *Edilizia popolare a Venezia: storia, politiche, realizzazioni dell'Istituto autonomo per le case popolari della provincia di Venezia*, Electa, Electa, Milano, 1983.
- [194] M.T. Segà, N.M. Filippini, *Manifattura Tabacchi - Cotonificio Veneziano*, Venezia, 2008.
- [195] *Conoscere Venezia*, Case dello IACP a Santa Marte, già Quartieri "Benito Mussolini" e "SADE," (n.d.). <https://www.conoscerevenezia.it/?p=43647>.
- [196] AA.VV., *Rivista le Tre Venezie*, N. 9. (1931).
- [197] A. Divari, *De social housing#an italian brief history*, *Nomos - Le Attual. Nel Dirit.* 1 (2019) 36. <http://www.nomos-leattualitaneldiritto.it/wp-content/uploads/2020/06/ANNUALE-NOMOS-2019.pdf>.
- [198] Parlamento Italiano, Legge 31 maggio 1903, n. 254, "Sulle case popolari," *Gazz. Uff.* (1903). https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=1903-07-08&atto.codiceRedazionale=003U0254.
- [199] ATER Venezia, I.A.C.P. – A.T.E.R. Venezia Housing 1990/2000, Venezia, 2004.
- [200] AA.VV., *Costruire a Venezia. Trent'anni di edilizia residenziale pubblica.*, a cura di T. Campostrini, Venezia, 1993.
- [201] ATER Azienda Territoriale per l'Edilizia Residenziale, *L'ATER di Venezia e la sua storia*, (n.d.). <https://www.atervenezia.it/ente/later-di-veneziasua-storia/>.
- [202] *marzianaveneziasua-storia*, A-MAP, (2013). <https://marzianaveneziasua-storia.wordpress.com/2013/03/07/a-map/>.
- [203] UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI/TR 11552:2014 Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici - Parametri termofisici, (2014).
- [204] Città di Venezia, *Osservatorio Casa* (2012). XIV Rapporto annuale, Venezia, 2012.
- [205] ISTAT, *Stato di occupazione degli alloggi nel Comune di Venezia*, 2017.
- [206] F. Fava, L. Fregolent, *Report dal fronte casa. Storie, quantità e prospettive della residenza pubblica a Venezia*, *Arch. Di Stud. Urbani e Reg.* (2019) 94–119. <https://doi.org/10.3280/ASUR2019-125005>.
- [207] ATER Venezia, *Riqualificazione del patrimonio ERP e non ERP*, 2018.
- [208] ATER Venezia, *Report 2018*, 2018.
- [209] J.A. Fonseca, *Energy efficiency strategies in urban communities Modeling, analysis and assessment*, ETH Zürich, Zürich, 2016. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010639933>.
- [210] J.A. Fonseca, D. Thomas, A. Willmann, A. Elesawy, A. Schlueter, *The City Energy Analyst Toolbox V0.1*, in: *Expand. Boundaries Syst. Think. Built Environ.*, ETH-Zürich, 2016. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-010690828>.
- [211] P. Romano, E. Prataviera, L. Carnieletto, J. Vivian, M. Zinzi, A. Zarrella, *Assessment of the Urban Heat Island Impact on Building Energy Performance at District Level with the EURECA Platform*, *Climate.* 9 (2021) 48. <https://doi.org/10.3390/cli9030048>.
- [212] J. Vivian, A. Zarrella, G. Emmi, M. De Carli, *An evaluation of the suitability of lumped-capacitance models in calculating energy needs and thermal behaviour of buildings*, *Energy Build.* 150 (2017) 447–465. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.021>.
- [213] W. Köppen, *Das geographische system der klimata*, *Handb. Der Klimatologie.* (1936) 46.
- [214] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel, *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated*, *Meteorol. Zeitschrift.* 15 (2006) 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
- [215] US Department of Energy, *Venice EPW weather data |EnergyPlus*, (n.d.). https://energyplus-weather.s3.amazonaws.com/europe_wmo_region_6/ITA/ITA_Venezia-Tessera.161050_IGDG/ITA_Venezia-Tessera.161050_IGDG.epw.
- [216] G. Murano, V. Corrado, D. Dirutigliano, *The new Italian Climatic Data and their Effect in the Calculation of the Energy Performance of Buildings*, *Energy Procedia.* 101 (2016) 153–160.
- [217] CEN (European Committee for Standardization), *ISO 15927-6:2007 Hygrothermal performance of buildings — Calculation and presentation of climatic data — Part 6: Accumulated temperature differences (degree-days)*, Brussels, Belgium, 2007.
- [218] QGIS - A Free and Open Source Geographic Information System, (n.d.).
- [219] OpenStreetMap, (n.d.).
- [220] G. Mutani, G. Vicentini, *Analisi del fabbisogno di energia termica degli edifici con software geografico libero. Il caso studio di Torino.*, *La Termotec.* 6 (2013) 63–67.
- [221] G. Agugiaro, *Energy planning tools and CityGML-based 3D virtual city models: experiences from Trento (Italy)*, *Appl. Geomatics.* 8 (2016) 41–56. <https://doi.org/10.1007/s12518-015-0163-2>.
- [222] Google, *Google Maps*, (n.d.). <https://www.google.com/maps/@45.4387765,12.3380271,13.26z?hl=en-GB&authuser=0>.
- [223] *Bing Maps - Directions, trip planning, traffic cameras & more*, (n.d.).
- [224] CEN (European Committee for Standardization), *BS EN 16798:2019 - Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and ac*, (2019).
- [225] International Organization for Standardization (ISO), *ISO/TR 17772-2:2018. Energy Performance of Buildings—Overall Energy Performance Assessment Procedures—Part 2: Guideline for Using Indoor Environmental Input Parameters for the Design and Assessment of Energy Performance of Buildings*, (2018).
- [226] P. Fu, P.M. Rich, *A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry*, *Comput. Electron. Agric.* 37 (2002) 25–35.

- [227] Esri, Esri Support ArcMap 10.2 (10.2.1, 10.2, (n.d.). <https://support.esri.com/en/products/desktop/arcgis-desktop/arcmap/10-2-2> (accessed May 5, 2021).
- [228] C.F. Reinhart, DAYSIM advanced daylight simulation software., (2021). <https://daysim.ning.com/>. (accessed May 5, 2021).
- [229] D. Arasteh, C. Kohler, B. Griffith, Modeling windows in energy plus with simple performance indices, Berkeley, CA (United States), 2009. <https://doi.org/10.2172/975375>.
- [230] L. Cecchinato, P. Romagnoni, L. Schibuola, Building heating requirement calculation: a critical analysis of the new European standards, *Int. J. Ambient Energy*. 21 (2000) 21–30. <https://doi.org/10.1080/01430750.2000.9675350>.
- [231] A. Magrini, L. Magnani, R. Perneti, The effort to bring existing buildings towards the A class: A discussion on the application of calculation methodologies, *Appl. Energy*. 97 (2012) 438–450. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.012>.
- [232] V. Corrado, E. Fabrizio, Il significato del fattore di utilizzazione nel calcolo semplificato del fabbisogno termico degli edifici: aspetti teorici e applicativi, Milano, 2008.
- [233] T. Dalla Mora, F. Zagarella, T. Blázquez, S. Ferrari, P. Romagnoni, Energy-environmental and cost-effective assessment of a set of strategies for building renovation at district level in Southern Europe (under development), *Sustainability*. 13 (2021).
- [234] L. Teso, T. Dalla Mora, P. Romagnoni, Biomass in District Energy Systems: Overview and Perspectives for an Italian Case-Study (on review), in: CLIMA 2022, 2022.
- [235] Parlamento Italiano, Decreto Legge (D.L.) 19 maggio 2020, n. 34. Misure urgenti in materia di salute, sostegno al lavoro e all'economia, nonché di politiche sociali connesse all'emergenza epidemiologica da COVID-19. Decreto "Rilancio", (2020).
- [236] Parlamento Italiano, Decreto Legge (D.L.) 27 settembre 2021, n. 130. Misure urgenti per il contenimento degli effetti degli aumenti dei prezzi nel settore elettrico e del gas naturale., (2021).
- [237] B. Rezaie, M.A. Rosen, District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements, *Appl. Energy*. 93 (2012) 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.020>.
- [238] IEA International Energy Agency, Electricity Systems - Co-generation and District Heating and Cooling Solutions for a Clean Energy Future, 2014.
- [239] D. Prando, A. Prada, F. Ochs, A. Gasparella, M. Baratieri, Analysis of the energy and economic impact of cost-optimal buildings refurbishment on district heating systems, *Sci. Technol. Built Environ*. 21 (2015) 876–891. <https://doi.org/10.1080/23744731.2015.1040343>.
- [240] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J.E. Thorsen, F. Hvelplund, B.V. Mathiesen, 4th Generation District Heating (4GDH), *Energy*. 68 (2014) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>.
- [241] J. Vivian, D. Quaggiotto, E. Ploner, F. D'isepe, A. Zarrella, Load-shifting strategies in district heating networks with constant supply temperature: the case study of Verona, *J. Phys. Conf. Ser.* 1599 (2020) 012038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1599/1/012038>.
- [242] A. Dalla Rosa, J.E. Christensen, Low-energy district heating in energy-efficient building areas, *Energy*. 36 (2011) 6890–6899. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.10.001>.
- [243] M. Brand, S. Svendsen, Renewable-based low-temperature district heating for existing buildings in various stages of refurbishment, *Energy*. 62 (2013) 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.027>.
- [244] S. Buffa, M. Cozzini, M. D'Antoni, M. Baratieri, R. Fedrizzi, 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 104 (2019) 504–522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059>.
- [245] P.A. Østergaard, A.N. Andersen, Booster heat pumps and central heat pumps in district heating, *Appl. Energy*. 184 (2016) 1374–1388. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.144>.
- [246] T. Ommen, J.E. Thorsen, W.B. Markussen, B. Elmegaard, Performance of ultra low temperature district heating systems with utility plant and booster heat pumps, *Energy*. 137 (2017) 544–555. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.165>.
- [247] J. Vivian, G. Emmi, A. Zarrella, X. Jobard, D. Pietruschka, M. De Carli, Evaluating the cost of heat for end users in ultra low temperature district heating networks with booster heat pumps, *Energy*. 153 (2018) 788–800. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.081>.
- [248] E. Guelpa, G. Barbero, A. Sciacovelli, V. Verda, Peak-shaving in district heating systems through optimal management of the thermal request of buildings, *Energy*. 137 (2017) 706–714. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.107>.
- [249] M. Ricci, P. Sdringola, S. Tamburrino, G. Puglisi, E. Di Donato, M.A. Ancona, F. Melino, Efficient District Heating in a Decarbonisation Perspective: A Case Study in Italy, *Energies*. 15 (2022) 948. <https://doi.org/10.3390/en15030948>.
- [250] F. Bünning, M. Wetter, M. Fuchs, D. Müller, Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization, *Appl. Energy*. 209 (2018) 502–515. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.072>.