

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



**Pianificazione energetica urbana a Milano:
proposta di un modello a scala comunale per la
stima dei consumi energetici degli edifici
residenziali e loro soddisfacimento mediante fonti
energetiche rinnovabili**

Relatore: Prof. Eugenio Morello

Correlatori: Prof. Andrea Fossati

Dott. Mattia Andrea Rudini

Tesi di Laurea di:

Matteo Bignardi

Matricola 783390

PREMESSA

Riassunto

Attualmente, circa l'84% delle emissioni di CO₂ è legato all'energia ed il 56% delle emissioni totali di gas ad effetto serra può essere imputato alla produzione e al consumo di energia. Per contrastare i rischi dei cambiamenti climatici, il Consiglio Europeo ha adottato l'obiettivo di ridurre entro il 2050 le emissioni di gas serra di almeno l'80% rispetto ai livelli del 1990, in modo che sia possibile contenere il riscaldamento globale entro i 2-2,4°C. In tale contesto si inserisce la pianificazione energetica a scala urbana, la quale è potenzialmente in grado di influenzare positivamente sul lungo periodo le performance energetiche delle città, che, secondo alcune previsioni, al 2030 consumeranno circa il 75% della totalità dell'energia prodotta. Obiettivo di questo lavoro di tesi è la definizione di un modello semplificato per la stima delle performance energetiche degli edifici residenziali, allo scopo di definirne i consumi attuali ed in scenari di efficientamento energetico, e valutare la quota di tale fabbisogno soddisfabile mediante la produzione di energia da FER locali. Questo strumento dovrebbe di fornire ad amministratori locali e stakeholders un quadro delle performance energetiche del parco edifici in questione e delle potenzialità di riduzione integrata della domanda, supportandoli nello sviluppo di insediamenti a ridotta intensità carbonica. Il modello è stato applicato al Comune di Milano, e si è visto come gli edifici residenziali milanesi siano molto energivori, con consumi ben oltre i limiti della classe G della classificazione energetica attualmente in vigore in Regione Lombardia; tuttavia, dagli scenari di efficientamento, si prospettano riduzioni dei consumi massime raggiungibili tra l'80 ed il 90%, mentre per quanto riguarda la quota di energia da rinnovabili si è visto che Milano dovrà necessariamente rivolgersi verso l'esterno, considerando non solo il territorio comunale ma l'area metropolitana.

Abstract

Currently, about 84% of CO₂ emissions are related to energy, and 56% of total greenhouse gas can be attributed to energy production and consumption. In order to mitigate climate change, the European Council agreed on the target to reduce by 2050 greenhouse emissions by at least 80% compared to 1990 levels, thus achieving to limit global warming within 2-2,4°C. In this context, energy planning at the urban scale plays a major role, and could potentially be able to influence in the long term the energy performance of the whole city, which, according to some estimations, will consume in 2030 about 75% of the whole energy produced in the world. The aim of this work is the definition of a simplified model for estimating the energy performance of residential buildings, in particular, to define actual consumption and the same consumption in demand reduction scenarios, and to evaluate the share of that demand which could be potentially satisfied from local renewable energy sources. The model has to be able to show to the public administration and stakeholders the profile of energy performance of the municipality under investigation and the potentialities of an integrated energy reduction, in order to support them to develop low carbon urban settlements. The model has been applied to the Municipality of Milan, and results show the high energy consumption of its residential building stock, whereby most of the buildings are estimated to belong to the worst class of the actual energy classification according to the regional standards; however, energy retrofiting scenarios point out very high percentages of maximum energy reduction potential (about 80 to 90%), while, concerning the energy potential from RES, it was noticed that Milan will necessarily have to look outward, taking into account the whole metropolitan area to satisfy a much more significant part of its energy consumption from RES.

Obiettivo del lavoro di tesi

Obiettivo di questo lavoro di tesi è la definizione di una metodologia per la stima delle performance energetiche degli edifici residenziali, per definirne i consumi in scenari di efficientamento energetico, e per valutare la quota di tale fabbisogno soddisfabile mediante la produzione di energia da FER locali. Si è testato il modello applicandolo al Comune di Milano, ma potrà essere replicato ad un qualsiasi caso di studio, che può essere sia alla scala comunale che ad una scala leggermente più ampia (sovracomunale). Esso, inoltre, si propone come un mezzo rivolto principalmente alla pubblica amministrazione, ma anche a progettisti e professionisti del settore, che, grazie a questo strumento, possono essere messi nelle condizioni di avere un'idea delle performance energetiche del parco edifici in questione, delle aree e dei tessuti urbani su cui è meglio intervenire e dell'energia che si sarà in grado di autoprodurre e, viceversa, quella che sarà necessario "importare" dall'esterno.

Stesura dell'elaborato di tesi

Dopo una breve sezione introduttiva, in cui viene definito il contesto energetico globale ed italiano, con particolare attenzione alla scala urbana e al settore degli edifici residenziali, si passa ad una breve review della letteratura di settore, ed in particolare a lavori che vanno a definire le cosiddette *heat maps urbane* e *FER maps* (rispettivamente mappe, derivate da stime, dei consumi energetici e del potenziale di energia da Fonti Energetiche Rinnovabili), o comunque lavori che si occupano di stimare consumi energetici alla scala urbana piuttosto che di definire il potenziale di fonti rinnovabili per un dato caso di studio.

Nel capitolo 3 si espone la parte metodologica, in cui viene presentato il modello nelle sue diverse parti, definendo in primo luogo la stima dei consumi, sia termici che elettrici, attuali, ed in seguito gli stessi in scenari di riduzione della domanda, per concludere con le procedure di calcolo per la stima del potenziale di energia da FER locali. Per i consumi di energia termica (per riscaldamento ed acqua calda sanitaria) si è dovuto passare attraverso la definizione di *cluster* di edifici, cioè raggruppamenti di edifici con le medesime classe d'età e tipologia edilizia, ipotizzando che tali consumi dipendano in primo luogo da tali fattori. Per i consumi di energia elettrica, invece, avendo ipotizzato non essere influenzati da età o forma dell'edificio, la stima si basa più semplicemente su misurazioni che fanno riferimento ad indicatori quali l'utenza, la superficie o il numero di abitanti dell'utenza stessa. I consumi degli scenari di efficientamento vengono stimati, per quanto riguarda quelli termici, ancora sulla base dei diversi cluster, mentre quelli elettrici costituiscono una percentuale di quelli attuali. Quanto alla definizione dell'energia potenzialmente ottenibile da FER, si sono considerate quelle tipologie impiantistiche maggiormente compatibili con la scala comunale o sovracomunale, e di queste si sono definite una serie di procedure di calcolo utili al fine di cui sopra.

Nel quarto capitolo viene presentata l'applicazione del modello al caso di studio scelto, il Comune di Milano. Come prima cosa, vengono presentati e quindi commentati i risultati dei consumi attuali ed in scenari di efficientamento alla scala urbana, per passare poi alla scala dei diversi tessuti urbani, con lo scopo di definire quali siano i tessuti (e quindi le rispettive zone) più o meno energivore, e più o meno bisognose di riqualificazione energetica. Dalle analisi effettuate, concentrandosi principalmente sulla domanda termica, quasi 8 volte maggiore di quella elettrica, si è visto che i consumi di energia termica medi per unità di superficie della città di Milano sono molto elevati (258 e 48 kWh/m²/anno rispettivamente per riscaldamento e per ACS), a causa principalmente dell'età del parco edifici milanese (quasi l'80% degli edifici è datato prima del 1971, mentre solamente il 4% è stato costruito dopo il 1981). Negli scenari di riduzione della domanda termica, grazie a interventi mirati all'efficientamento dell'involucro, degli impianti e alla produzione da FER, si è visto che è possibile raggiungere risparmi complessivi tra l'80% ed il 90%, mentre per la domanda elettrica il risparmio massimo è intorno al 40%. Si è passati ad una scala leggermente ridotta, seguendo un'analisi per tessuti urbani, e si è notato che quelli meno efficienti sono i tessuti meno densi (quartieri di villette a schiera e/o monofamiliari), mentre quelli meno energivori sono, viceversa, i più densi, cioè edifici a stecca e a torre. Per quanto riguarda

l'ultima parte dell'analisi, si è deciso di considerare esclusivamente tipologie di FER di tipo "elettrico", in quanto quelle di tipo "termico" sono già incluse all'interno del database utilizzato per definire i consumi in scenari di efficientamento, e, dopo una selezione delle FER possibili sul territorio comunale (riconguibili di fatto a impianti fotovoltaici ed impianti a digestione anaerobica di reflui zootecnici e colture dedicate), si è definito in una percentuale tra il 20 ed il 30% il fabbisogno di energia elettrica soddisfabile mediante impianti fotovoltaici posti sulla superficie disponibile (stimata) dei tetti degli edifici considerati, mentre l'energia elettrica dagli impianti di digestione anaerobica risulta pressoché trascurabile. Per questo si conclude che, al fine di incrementare la quota di autoproduzione di energia da FER, Milano dovrà necessariamente rivolgersi all'esterno dei propri confini comunali, vista in particolare la ridottissima superficie libera.

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	1
2	RIFERIMENTI.....	7
2.1	Introduzione alle heatmaps urbane.....	7
2.2	Introduzione alle FERmaps.....	18
3	IL MODELLO.....	27
3.1	Introduzione.....	27
3.1.1	Struttura del modello.....	27
3.1.2	Definizione degli edifici considerati.....	28
3.1.3	Definizione dei consumi considerati.....	28
3.2	Definizione del modello di stima dei consumi.....	29
3.2.1	Stima dei consumi attuali di energia termica.....	29
3.2.2	Stima dei consumi attuali di energia elettrica degli edifici.....	39
3.2.3	Stima dei consumi di energia termica in scenari di riduzione della domanda.....	41
3.2.4	Stima dei consumi elettrici degli edifici in scenari di efficientamento energetico.....	48
3.3	Definizione del modello per la stima del potenziale di energia da fonti rinnovabili.....	50
3.3.1	Produzione di energia da biomasse.....	50
3.3.2	Energia dal sole.....	58
3.3.3	Pompe di calore ed energia geotermica.....	63
3.3.4	Energia eolica.....	65
4	IL CASO DI STUDIO.....	69
4.1	Stima dei consumi per energia termica.....	69
4.1.1	Definizione dei cluster di edifici.....	69
4.1.2	Analisi dei consumi di energia termica per i diversi cluster.....	78
4.2	Stima dei consumi di energia elettrica per gli edifici.....	92
4.2.1	Stima dei consumi elettrici attuali.....	92
4.2.2	Stima dei consumi in scenari di riduzione della domanda di energia elettrica per efficientamento.....	93
4.3	Analisi dei consumi degli edifici per brani di tessuto urbano.....	95
4.3.1	Descrizione dei tessuti considerati.....	95
4.3.2	Definizione dei campioni di tessuto urbano.....	97
4.3.3	Analisi dei consumi per energia termica dei campioni di tessuto urbano.....	98
4.4	Scenari di riduzione della domanda mediante reperimento di energia da FER.....	106
4.4.1	Definizione delle fonti rinnovabili disponibili.....	106
4.4.2	Stima dell'energia elettrica prodotta da biogas da colture dedicate.....	107

4.4.3	Stima dell'energia elettrica prodotta da biogas da reflui zootecnici.....	111
4.4.4	Stima dell'energia elettrica prodotta da fotovoltaico	112
4.4.5	Analisi dei risultati della stima di energia elettrica da fotovoltaico a scala urbana	114
4.4.6	Analisi dei risultati della stima di energia elettrica da fotovoltaico per tessuti urbani.....	122
4.5	Validazione del modello	126
5	CONCLUSIONI.....	129
5.1	Questioni emerse.....	131
5.2	Possibili applicazioni.....	134
5.3	Limiti e possibili applicazioni di miglioramento.....	135
	BIBLIOGRAFIA	135
	SITOGRAFIA	137
	APPENDICE I.....	139
	APPENDICE II	149
	APPENDICE III.....	183

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 Incremento dei consumi di energia primaria per paese e combustibile (2000- 2009) (Mtep) (ENEA, 2012)	2
Figura 1.2 Principali tecnologie per la riduzione delle emissioni di CO ₂ a scala globale, rispetto allo scenario attuale, per l'obiettivo -50% al 2050 (IEA, 2012).....	3
Figura 1.3 Impieghi finali di energia per settore dal 2000 al 2011 (RAEE 2011, ENEA, 2012).....	4
Figura 1.4 Confronto tra i consumi per uso nel settore residenziale nel periodo 1990-2010 (ENEA, 2012).....	4
Figura 1.5 Variazioni del consumo totale, elettrico e per riscaldamento per abitazione tra 2000 e 2010 (ENEA, 2012)	4
Figura 1.6 Risparmi di energia necessari per lo scenario BLUE Map per i settori servizi e residenziale per usi finali.....	5
Figura 1.7 Contributo alla riduzione di CO ₂ del settore residenziale per le diverse opzioni nello scenario BLUE Map.....	5
Figura 2.1 Schematizzazione degli approcci top-down e bottom-up (Swan e Ugursal, 2009).....	8
Figura 2.2 Suddivisione delle tecniche di modellazione dei consumi energetici degli edifici (Swan e Ugursal, 2009).....	9
Figura 2.3 Mappa dei consumi annuali di energia per unità di superficie stimati da Modi et al. per la città di New York.....	11
Figura 2.4 Mappa dei consumi energetici annui stimati dal modello di Jones et al., 2001	12
Figura 2.5 Schermata in sw GIS degli edifici del comune di Carugate colorati a seconda della classe energetica stimata.....	13
Figura 2.6 Dettaglio della mappa del fabbisogno di calore per riscaldamento degli edifici del comune di Gorgonzola.....	13
Figura 2.7 Andamento del consumo medio di energia per riscaldamento per ogni età e tipologia edilizia.....	14
Figura 2.8 Grafico risultante dal primo scenario del modello di Doni e Keim, 2011.....	15
Figura 2.9 Grafico risultante dal secondo scenario del modello di Doni e Keim, 2011	15
Figura 2.10 Proiezione delle classi energetiche per il centro storico della città di Ferrara (Fabbri, 2012)	16
Figura 2.11 Tipologie degli archetipi e loro suddivisione in base al rapporto S/V da Caputo et al., 2013.....	17
Figura 2.12 Mappe della stima dei consumi energetici per riscaldamento (a), elettricità (b), ACS (c) e cooking (d) per il comune di Milano (Caputo et al., 2013).....	18
Figura 2.13 Classificazione del potenziale di energia da biomassa (a sinistra) e da energia solare (a destra).....	19
Figura 2.14 Classificazione del potenziale di energia solare secondo l'approccio top-down (Biberacher et al, 2009)	20
Figura 2.15 Mappa di confronto tra supply da FER e domanda di energia (Vettorato et al, 2011)	21
Figura 2.16 Risultato del modello per l'isola di Thassos nel caso di alternative singole (in alto) o nel caso di un mix tra più alternative (in basso) (Mourmouris e Potolias, 2013).....	22
Figura 2.17 Steps della metodologia proposta con i relativi databases necessari (Fiorese e Guariso, 2010)	23
Figura 2.18 Risultato dell'applicazione del modello di Fiorese et al. (2008) alla provincia di Cremona	23
Figura 3.1 Schema concettuale della struttura del modello	28
Figura 3.2 Schermata da sw GIS dei layer di edifici (dal DBT) e delle sezioni censuarie (da ISTAT) con le principali informazioni utilizzate.....	29
Figura 3.3 "Matrice della tipologia edilizia" con l'illustrazione degli edifici tipo (TABULA, 2011).....	30
Figura 3.4 Elementi costitutivi di un DBT: punti, linee e poligoni.....	30
Figura 3.5 Schema concettuale della classificazione degli edifici nelle rispettive tipologie edilizie in base a numero di piani e rapporto S/V.....	33
Figura 3.6 Classificazione delle tipologie edilizie in base al rapporto di forma S/V, indipendentemente dal numero di piani...33	
Figura 3.7 Confronto tra il fattore di forma di un cubo isolato (casa singola) e di uno inglobato in una struttura più grande (appartamento in blocco di appartamenti)	34
Figura 3.8 Schematizzazione di un edificio con l'intera superficie laterale disperdente (a sinistra), e di uno confinante con un seconda edificio (a destra).....	34

Figura 3.9 Schematizzazione dell'attribuzione delle classi d'età degli edifici da TABULA ad ISTAT	35
Figura 3.10 Consumi elettrici medi annuali per le utenze (kWh/anno/utenza) monitorate per il progetto MICENE	41
Figura 3.11 Consumi elettrici medi annuali per le utenze (kWh/anno/utenza) monitorate per il progetto EURECO	41
Figura 3.12 Suddivisione % delle principali fonti di risparmio di energia elettrica per le utenze italiane monitorate.....	49
Figura 3.13 Confronto pre/post risparmio dei consumi delle abitazioni monitorate nel progetto EURECO, 2000	49
Figura 3.14 Schema concettuale seguito per il calcolo dell'energia prodotta da impianti di combustione a biomassa	52
Figura 3.15 Schema riassuntivo del calcolo di energia termica e fabbisogno di biomassa per un impianto di potenza data.....	53
Figura 3.16 Schema riassuntivo del calcolo della biomassa necessaria a soddisfare un dato fabbisogno di energia.....	53
Figura 3.17 Schema riassuntivo del calcolo di energia prodotta e del fabbisogno di biomassa per un dato impianto a cogenerazione.....	54
Figura 3.18 Schema concettuale seguito per il calcolo del biogas prodotto data una certa quantità di biomassa in ingresso	56
Figura 3.19 Schema riassuntivo per il calcolo della produzione di biogas, valido per le due procedure di calcolo precedenti ..	57
Figura 3.20 Schema riassuntivo per il calcolo della produzione di energia da biogas	58
Figura 3.21 Schema per il calcolo della superficie di un impianto fotovoltaico per un dato fabbisogno di energia elettrica.....	59
Figura 3.22 Schema per il calcolo della produzione di energia elettrica da un dato impianto fotovoltaico	59
Figura 3.23 Mappa dell'energia elettrica generata per kWp di un impianto fotovoltaico con inclinazione ottima (30°).....	60
Figura 3.24 Schema riassuntivo per il calcolo della superficie di collettori solari necessaria per un dato fabbisogno di ACS	61
Figura 3.25 Schema riassuntivo per il calcolo della superficie di collettori solari necessaria per soddisfare una quota di un dato fabbisogno di energia termica per riscaldamento ambienti.....	62
Figura 3.26 Spaccato di un impianto a sonda geotermica e tabella dei valori con le rese delle principali tipologie di sottosuolo per sonde geotermiche verticali (fonte: Caleffi, Idraulica)	63
Figura 3.27 Rendimenti per unità di superficie o di lunghezza dei principali scambiatori a bassa profondità.....	63
Figura 3.28 Schema riassuntivo per il calcolo della produzione di energia termica da un impianto a pompa di calore	64
Figura 3.29 Schema concettuale per il calcolo della lunghezza/ampiezza di sonde geotermiche per un impianto a pompa di calore in grado di soddisfare un dato fabbisogno di energia termica.....	65
Figura 3.30 Schema riassuntivo del calcolo di energia elettrica prodotta da un dato impianto mini-eolico a circa 25 m dal terreno.....	67
Figura 3.31 Schema riassuntivo del calcolo di energia prodotta da un impianto micro-eolico ad asse verticale secondo il modello di calcolo semplificato della ROPATEC.....	67
Figura 3.32 Mappa della producibilità eolica a 25 dal suolo (Atlante Eolico Interattivo, RSE).....	68
Figura 4.1 Classificazione degli edifici per tipologia edilizia secondo il database topografico della Lombardia	70
Figura 4.2 Mappa degli edifici residenziali di Milano, classificati per tipologia edilizia.....	71
Figura 4.3 Mappa di una parte centrale del comune di Milano con gli edifici classificati per tipologia edilizia	71
Figura 4.4 Mappa di una parte periferica del comune di Milano, con gli edifici classificati per tipologia edilizia.....	72
Figura 4.5 Confronto in termini percentuali tra la suddivisione degli edifici per classe d'età tra ISTAT (a sinistra) ed il modello nelle sue due configurazioni (iniziale a destra e finale al centro)	73
Figura 4.6 Confronto tra la suddivisione degli edifici per classe d'età secondo il modello e secondo ISTAT	74
Figura 4.7 Classificazione delle sezioni censuarie di Milano per classe d'età (pesatura iniziale).....	75
Figura 4.8 Classificazione delle sezioni censuarie di Milano per classe d'età (pesatura finale)	75
Figura 4.9 Edifici residenziali di Milano classificati per classe d'età, secondo la pesatura finale	76
Figura 4.10 Edifici residenziali di una zona centrale di Milano classificati per età, secondo la pesatura finale	77

Figura 4.11 Schema del procedimento per la definizione del database degli edifici, con, per ogni passaggio, la perdita di informazioni con la rispettiva motivazione.....	78
Figura 4.12 Edifici residenziali classificati per consumo di energia primaria per riscaldamento (kWh/m ² /anno).....	79
Figura 4.13 Sezioni censuarie classificate per fabbisogno di energia primaria medio	80
Figura 4.14 Sezioni censuarie classificate per fabbisogno di energia primaria medio nello scenario di riqualificazione STD....	84
Figura 4.15 Sezioni censuarie classificate per fabbisogno di energia primaria medio nello scenario di riqualificazione BAT....	84
Figura 4.16 Edifici residenziali classificati per consumo di energia primaria per riscaldamento nello scenario di riqualificazione STD.....	85
Figura 4.17 Edifici residenziali classificati per consumo di energia primaria per riscaldamento nello scenario di riqualificazione BAT.....	86
Figura 4.18 Sezioni censuarie classificate per risparmio medio di energia per riscaldamento conseguito da riq STD.....	90
Figura 4.19 Sezioni censuarie classificate per risparmio medio di energia per riscaldamento conseguito da riq BAT	90
Figura 4.20 Sezioni censuarie classificate per risparmio medio di energia per riscaldamento conseguito da riqualificazione standard in termini percentuali (%).....	91
Figura 4.21 Sezioni censuarie classificate per risparmio medio di energia per riscaldamento conseguito da riqualificazione avanzata in termini percentuali (%).....	91
Figura 4.22 Mappa della stima dei consumi attuali di energia elettrica alla scala delle sezioni censuarie (kWh/anno).....	93
Figura 4.23 Mappa della stima dei consumi di energia elettrica alla scala delle sezioni censuarie nello scenario di riduzione dei consumi del 20% (kWh/anno)	94
Figura 4.24 Mappa della stima dei consumi di energia elettrica alla scala delle sezioni censuarie nello scenario di riduzione dei consumi del 40% (kWh/anno)	94
Figura 4.25 Mappa dei 5 campioni considerati per ogni tipologia di tessuto urbano	98
Figura 4.26 Mappa degli usi del suolo del comune di Milano al 2009.....	108
Figura 4.27 Mappa dei parchi del comune di Milano e sullo sfondo gli usi del suolo al 2009	109
Figura 4.28 Mappa delle aree agricole di Milano con la distinzione tra protette e non protette al 2009	109
Figura 4.29 Mappa degli edifici residenziali di Milano considerati classificati per energia prodotta da pannelli fotovoltaici in silicio monocristallino (kWh/anno).....	116
Figura 4.30 Mappa degli edifici residenziali di Milano considerati classificati per energia prodotta da pannelli fotovoltaici in silicio policristallino (kWh/anno).....	116
Figura 4.31 Mappa degli edifici residenziali di Milano considerati, classificati per energia prodotta da pannelli fotovoltaici in silicio policristallino per lo scenario reale, con la Zona 1 evidenziata in rosso (kWh/anno)	117
Figura 4.32 Mappa delle sezioni censuarie di Milano classificate per produzione di energia da fotovoltaico media (calcolata come media tra gli edifici che contengono) (kWh/anno).....	118
Figura 4.33 Mappa delle sezioni censuarie di Milano classificate per produzione di energia da fotovoltaico totale	118
Figura 4.34 Sezioni censuarie di Milano classificate per bilancio di energia elettrica (en consumata – en prodotta) nello scenario autorizzativo teorico (in cui i tetti degli edifici centrali – zona 1 – ospitano pannelli fotovoltaici)(kWh/anno).....	120
Figura 4.35 Sezioni censuarie di Milano classificate per bilancio di energia elettrica (en consumata – en prodotta) per lo scenario autorizzativo reale (in cui i tetti degli edifici centrali – zona 1 – non ospitano pannelli fotovoltaici) (kWh/anno) ...	120
Figura 4.36 Sezioni censuarie di Milano classificate per bilancio di energia elettrica (en consumata – en prodotta) nello scenario autorizzativo teorico (in cui i tetti degli edifici centrali – zona 1 – ospitano pannelli fotovoltaici)(kWh/anno).....	121
Figura 4.37 Sezioni censuarie di Milano classificate per bilancio di energia elettrica (en consumata – en prodotta) nello scenario autorizzativo teorico (in cui i tetti degli edifici centrali – zona 1 – ospitano pannelli fotovoltaici)(kWh/anno).....	121
Figura 4.38 Grafico dei consumi di energia netta risultanti dal lavoro di Doni e Keim per i vari tessuti urbani	128

Figura A.1.1	Indicazione delle zone climatiche all'interno del territorio nazionale	142
Figura A.1.2	Schema relativo alla definizione degli edifici-tipo appartenenti all'area climatica media	144
Figura A.1.3	“Matrice della tipologia edilizia” italiana (area climatica media) con l'illustrazione degli edifici-tipo; gli archetipi sono illustrati attraverso un volumetrico semplificato, degli edifici reali utilizzati come edificio-tipo si riporta la fotografia	145
Figura A.1.4	Presentazione di alcune tipologie costruttive per l'involucro edilizio così come sono riportate da TABULA.....	146
Figura A.1.5	Tabelle esemplificative delle varie tipologie impiantistiche relative al riscaldamento	147
Figura A.2.6	Vantaggi e svantaggi delle biomasse come fonte di energia rinnovabile	152
Figura A.2.7	Filiera delle biomasse dalla raccolta alla trasformazione (fonte: Energia dalle biomasse, AREA Science Park)...	153
Figura A.2.8	Possibili percorsi tecnologici delle biomasse lignocellulosiche finalizzati alla generazione di energia	153
Figura A.2.9	Schema semplificato del processo di combustione con produzione di elettricità e/o calore	154
Figura A.2.10	Percentuale relativa alle varie tipologie di materia prima sul totale del pelletizzato da imprese italiane	155
Figura A.2.11	Confronto tra vantaggi e svantaggi dell'uso di pellet o cippato come combustibili	155
Figura A.2.12	Campi di applicazione delle tecnologie di combustione della biomassa lignocellulosica	156
Figura A.2.13	Funzionamento di una stufa a pellet, in grado di riscaldare il locale in cui è posizionata, ma anche locali adiacenti mediante sistemi di ventilazione	157
Figura A.2.14	Vantaggi e svantaggi di stufe e caldaie a pellet come fonte di energia termica	157
Figura A.2.15	Schematizzazione di un impianto a caldaia a pellet (3), con ricarica tramite cisterna 1/2 volte l'anno (1), approvvigionamento automatico della caldaia (2), e distribuzione per via idraulica del calore da una caldaia (4).....	157
Figura A.2.16	Vantaggi e svantaggi di caldaie a cippato come fonte di energia termica	158
Figura A.2.17	Schematizzazione qualitativa di una piccola rete di teleriscaldamento servita da una caldaia a cippato	158
Figura A.2.18	Schema di funzionamento di un impianto a cogenerazione di biomassa.....	159
Figura A.2.19	Vantaggi e svantaggi di impianti di cogenerazione a biomassa come fonte di energia	159
Figura A.2.20	Schema a blocchi di un impianto per il processo di digestione anaerobica	160
Figura A.2.21	Vantaggi e svantaggi del biogas come fonte di energia rinnovabile	163
Figura A.2.22	Schematizzazione di un impianto a biogas.....	163
Figura A.2.23	Percorso della radiazione solare verso la superficie terrestre.....	164
Figura A.2.24	Mappa dell'irradiazione solare su superficie orizzontale (fonte JRC - PVGIS).....	165
Figura A.2.25	Schema di funzionamento della cella fotovoltaica.....	166
Figura A.2.26	Componenti del generatore fotovoltaico.....	166
Figura A.2.27	Schema di un impianto isolato (a) e di un impianto connesso alla rete (b)	167
Figura A.2.28	Vantaggi e svantaggi della tecnologia solare fotovoltaica	168
Figura A.2.29	Principio di captazione della radiazione solare per le due tipologie di collettori solari.....	168
Figura A.2.30	Sezione di un collettore solare piano vetrato.....	169
Figura A.2.31	Schema di un collettore a tubi sottovuoto	170
Figura A.2.32	Schema di funzionamento di un impianto a circolazione naturale a singolo (a) e a doppio (b) circuito.....	170
Figura A.2.33	Schema di un impianto solare termico a circolazione forzata	171
Figura A.2.34	Curve di efficienza dei diversi tipi di collettore	171
Figura A.2.35	Applicazioni tipiche per le principali tecnologie solari	172
Figura A.2.36	Vantaggi e svantaggi della tecnologia a solare termico.....	172
Figura A.2.37	Schema del principio di funzionamento della pompa di calore, in modalità riscaldamento e raffrescamento... ..	173
Figura A.2.38	Schema di funzionamento della pompa di calore	173

Figura A.2.39 Sezione di una casa con impianto a PdC ad acqua di falda, e (nel riquadro) ad aria.....	175
Figura A.2.40 Spaccato di un impianto a sonda geotermica e tabella dei valori con le rese delle principali tipologie di sottosuolo per sonde geotermiche verticali (fonte: Caleffi, Idraulica).....	177
Figura A.2.41 Rendimenti per unità di superficie o di lunghezza dei principali scambiatori a bassa profondità.....	177
Figura A.2.42 Vantaggi e svantaggi di impianti di a pompa di calore	178
Figura A.2.43 Schema e componenti di una turbina eolica ad asse verticale (a sinistra) ed una ad asse verticale (a destra) ..	180
Figura A.2.44 Vantaggi e svantaggi della produzione di energia elettrica mediante turbine eoliche	181
Figura A.2.45 Vantaggi e svantaggi di turbine mini e micro-eoliche.....	184
Figura A.2.46 Alcuni esempi di turbine micro-eoliche integrate in ambito urbano	184

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1 Tabella riassuntiva dei pro e contro dei due differenti approcci alla modellazione dei consumi energetici degli edifici (Swan e Ugursal, 2009)	9
Tabella 2.2 Valori dei coefficienti utilizzati da Asinari e Bergamasco per la stima della superficie di tetti disponibile	24
Tabella 2.3 Tabella riassuntiva degli studi riguardanti stime di consumi energetici considerate come riferimento	25
Tabella 2.4 Tabella riassuntiva degli studi riguardanti stime del potenziale di energia da FER considerate come riferimento	26
Tabella 3.1 Valori medi riassuntivi per le 4 tipologie edilizie tipo secondo TABULA (2011)	32
Tabella 3.2 Tabella con i valori di consumi di energia termica per tipologia edilizia e classe d'età riclassificati da TABULA secondo i parametri ISTAT	37
Tabella 3.3 Tabella con i valori di consumi di energia per riscaldamento per tipologia edilizia e classe d'età colorati seconda la classificazione adottata da Regione Lombardia (CENED) (sulla destra)	38
Tabella 3.4 Tabella con i valori di consumi di energia per acqua calda sanitaria per tipologia edilizia e classe d'età colorati seconda la classificazione adottata da Regione Lombardia (CENED) (sulla destra)	38
Tabella 3.5 Valori di riferimento per la stima dei consumi elettrici del settore residenziale	41
Tabella 3.6 Tabella con i valori di consumi di energia termica per tipologia edilizia e classe d'età riclassificati da TABULA secondo i parametri ISTAT, per lo scenario di riqualificazione standard	45
Tabella 3.7 Tabella con i valori di consumi di energia per riscaldamento per tipologia edilizia e classe d'età, per lo scenario di riqualificazione standard, colorati secondo la classificazione adottata da Regione Lombardia (CENED) (sulla destra)	45
Tabella 3.8 Tabella con i valori di consumi di energia per ACS per tipologia edilizia e classe d'età, per lo scenario di riqualificazione standard, colorati secondo la classificazione adottata da Regione Lombardia (CENED) (sulla destra)	46
Tabella 3.9 Tabella con i valori di consumi di energia termica per tipologia edilizia e classe d'età riclassificati da TABULA secondo i parametri ISTAT, per lo scenario di riqualificazione avanzata	46
Tabella 3.10 Tabella con i valori di consumi di energia per riscaldamento per tipologia edilizia e classe d'età, per lo scenario di riqualificazione avanzata, colorati seconda la classificazione adottata da Regione Lombardia (CENED) (sulla destra)	47
Tabella 3.11 Tabella con i valori di consumi di energia per ACS per tipologia edilizia e classe d'età, per lo scenario di riqualificazione standard, colorati secondo la classificazione adottata da Regione Lombardia (CENED) (sulla destra)	47
Tabella 3.12 Valori del massimo potenziale di risparmio energetico considerati nel modello	50
Tabella 3.13 Confronto tra le specifiche tecniche di pellet e cippato considerate nei calcoli (Brunori, Legno ed energia)	51
Tabella 3.14 Tabella riassuntiva delle caratteristiche degli impianti a piccola e media taglia qui considerati	52
Tabella 3.15 Tabella riassuntiva delle caratteristiche generali degli impianti a cogenerazione (Caputo, Impianti a biomassa)	53
Tabella 3.16 Produzione potenziale di biogas e metano di varie biomasse agricole (Ragazzoni A., Biogas)	56
Tabella 3.17 Valori di superficie per ogni kWp delle principali tecnologie di pannelli FV (Sconamiglio, Fotovoltaico negli edifici, 2012)	60
Tabella 3.18 Fattori di correzione da applicare ai valori di irraggiamento su superficie ottimale (Sconamiglio, Fotovoltaico negli edifici, 2012)	61
Tabella 3.19 Fattori di correzione da applicare ai valori di irraggiamento su superficie orizzontale (Ferrari, 2008)	63
Tabella 3.20 Classificazione delle turbine eoliche per potenza seguita in questo lavoro di tesi (Andreolli, 2011)	67
Tabella 4.1 Valori dei pesi utilizzati per la definizione dell' anno medio per la definizione delle classi d'età delle sezioni censuarie e quindi degli edifici	75
Tabella 4.2 Stima dei consumi medi e totali degli edifici del comune di Milano considerati elaborata dal modello, per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, nei tre diversi scenari (kWh/m ² /anno)	80
Tabella 4.3 Stima dei consumi medi e totali delle sezioni censuarie del comune di Milano considerate elaborata dal modello, per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, nei tre diversi scenari (kWh/m ² /anno)	81

Tabella 4.4 Stima dei consumi medi degli edifici del comune di Milano per classe d'età elaborata dal modello, per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, nei tre diversi scenari (kWh/m ² /anno)	81
Tabella 4.5 Stima dei consumi medi degli edifici del comune di Milano per tipologia edilizia elaborata dal modello, per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, nei tre diversi scenari (kWh/m ² /anno)	81
Tabella 4.6 Stima dei consumi medi degli edifici del comune di Milano considerati elaborata dal modello, per riscaldamento, nei tre diversi scenari (kWh/mq/anno) con il rispettivo risparmio energetico.....	87
Tabella 4.7 Stima dei consumi medi degli edifici del comune di Milano considerati elaborata dal modello, per acqua calda sanitaria, nei tre diversi scenari (kWh/m ² /anno) con il rispettivo risparmio energetico	88
Tabella 4.8 Stima dei consumi medi degli edifici del comune di Milano e dei consumi totali di tutto il parco edifici considerato, per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, nei tre diversi scenari	88
Tabella 4.9 Stima dei risparmi di energia conseguibili dalla riqualificazione (standard o avanzata) del parco edifici di Milano per classe d'età (kWh/m ² /anno e %).....	89
Tabella 4.10 Stima dei risparmi di energia conseguibili dalla riqualificazione (standard o avanzata) del parco edifici di Milano per tipologia edilizia (kWh/m ² /anno e %).....	90
Tabella 4.11 Tabella riassuntiva con i dati stimati per il consumo di energia elettrica attuali e nei due scenari di efficientamento.....	95
Tabella 4.12 Foto da GoogleEarth con descrizione e principali caratteristiche delle tipologie di tessuto urbano considerate ..	98
Tabella 4.13 Valori dei consumi attuali medi per i campioni di tessuto urbano selezionati per riscaldamento ed ACS (kWh/m ² /anno).....	101
Tabella 4.14 Valori dei consumi negli scenari di riqualificazione medi per i campioni di tessuto urbano selezionati per riscaldamento ed ACS (kWh/m ² /anno).....	103
Tabella 4.15 Valori (in ettari) delle varie categorie di superficie agricola del comune di Milano al 1999 e al 2009 con le rispettive variazioni (ha).....	109
Tabella 4.16 Superfici a seminativo semplice rispetto alle varie superfici agricole del comune di Milano	111
Tabella 4.17 Potenziale di energia elettrica prodotta nei vari scenari di superficie adibita a colture energetiche	112
Tabella 4.18 Numero di bovini e suini per il comune di Milano (ASL, Media capi censiti tra il 30/06/12 ed il 31/05/13).....	113
Tabella 4.19 Tabella riassuntiva dei termini considerati nel calcolo della superficie disponibile per i pannelli fotovoltaici ...	115
Tabella 4.20 Distribuzione delle tre principali tecnologie di pannelli solari per potenza installata al 2011 (Rapporto Statistico 2011 – Solare fotovoltaico, GSE, 2011).....	115
Tabella 4.21 Valori riassuntivi della stima di energia elettrica prodotta dalla superficie disponibile per pannelli fotovoltaici per il comune di Milano nei vari scenari di produzione	116
Tabella 4.22 Valori percentuali riguardo al soddisfacimento della domanda di energia elettrica da fotovoltaico nei vari scenari di produzione e di consumo	124
Tabella 4.23 Valori dei consumi di energia elettrica medi per sezione censuaria per i cinque tessuti urbani considerati (kWh/anno/sezione).....	125
Tabella 4.24 Valori (complessivi rispetto alle sezioni censuarie delle 5 tipologie di tessuto urbano) riassuntivi della produzione di energia elettrica da fotovoltaico e quindi di energia elettrica netta (MWh/anno/sezione)	127
Tabella 4.25 Confronto tra i dati in output dal modello ed i dati del CENED (kWh/m ² /anno)	128
Tabella 4.26 Confronto dei dati risultanti dal modello oggetto del lavoro di tesi con quelli da Caputo et al. (2013).....	129
Tabella 4.27 Confronto tra il fabbisogno di energia primaria calcolato dal nostro modello ed il fabbisogno netto di energia stimato da Doni e Keim (kWh/mq/anno)	129

Tabella A.2.1 Confronto tra le specifiche tecniche di pellet e cippato considerate nei calcoli (Brunori, Legno ed energia)	154
Tabella A.2.2 Tabella riassuntiva delle caratteristiche degli impianti a piccola e media taglia qui considerati	155
Tabella A.2.3 Tabella delle caratteristiche generali degli impianti a cogenerazione (Caputo, Impianti a biomassa)	158
Tabella A.2.4 Produzione potenziale di biogas e metano di varie biomasse agricole (fonte: Ragazzoni A., Biogas)	161
Tabella A.2.5 Classificazione delle turbine eoliche per potenza seguita in questo lavoro di tesi.....	178
Tabella A.2.6 Caratteristiche generali di una delle turbine mini-eoliche considerate.....	181
Tabella A.2.7 Caratteristiche generali di una delle turbine micro-eoliche ad asse orizzontale considerate	182
Tabella A.2.8 Caratteristiche generali di una delle turbine micro-eoliche ad asse verticale considerate.....	183
Tabella A.3.9 Dati riassuntivi dei campioni Detached Housing	185
Tabella A.3.10 Dati riassuntivi dei campioni di tessuto Traditional Urban Block	186
Tabella A.3.11 Dati riassuntivi del campione di tessuto Regular Urban Block (RUB)	187
Tabella A.3.12 Dati riassuntivi dei campioni di tessuti Slab Housing (SH)	188
Tabella A.3.13 Dati riassuntivi dei campioni di tessuto Tower Block (TB)	189

INDICE DEI GRAFICI

Grafico 3.1 Andamento del fabbisogno di energia termica per riscaldamento, al variare dell'età degli edifici per le 4 quattro tipologie edilizie risultante dall'incrocio da dati TABULA ed ISTAT, utilizzato per il presente lavoro	38
Grafico 3.2 Andamento del fabbisogno di energia termica per acqua calda sanitaria, al variare dell'età degli edifici per le 4 quattro tipologie edilizie risultante dall'incrocio da dati TABULA ed ISTAT, utilizzato per il presente lavoro	38
Grafico 3.3 Andamento dei consumi di energia termica per riscaldamento nel tempo per le quattro tipologie edilizie	39
Grafico 3.4 Andamento dei consumi di energia termica per ACS nel tempo per le quattro tipologie edilizie	39
Grafico 3.5 Andamento del fabbisogno di energia termica per riscaldamento, al variare dell'età degli edifici per le 4 quattro tipologie edilizie (valori puntuali e linee di tendenza), nello scenario di riqualificazione standard	47
Grafico 3.6 Andamento del fabbisogno di energia termica per riscaldamento, al variare dell'età degli edifici per le 4 quattro tipologie edilizie (valori puntuali e linee di tendenza), nello scenario di riqualificazione avanzata	47
Grafico 3.7 Andamento dei consumi di energia termica per riscaldamento nel tempo per le quattro tipologie edilizie nello scenario di riqualificazione standard	48
Grafico 3.8 Andamento dei consumi di energia termica per riscaldamento nel tempo per le quattro tipologie edilizie nello scenario di riqualificazione avanzata	48
Grafico 4.1 Valori numerici e percentuali degli edifici residenziali del comune di Milano considerati per ogni tipologia edilizia secondo il modello	72
Grafico 4.2 Distribuzione degli edifici del comune di Milano per classe d'età secondo la classificazione finale e definitiva del modello realizzato	74
Grafico 4.3 Consumi medi stimati di energia primaria per riscaldamento per classe d'età e nei tre scenari	81
Grafico 4.4 Consumi medi stimati di energia primaria per riscaldamento per tipologia edilizia nei tre scenari	82
Grafico 4.5 Consumi medi stimati di energia primaria per acqua calda sanitaria per classe d'età e nei tre scenari	82
Grafico 4.6 Consumi medi stimati di energia primaria per acqua calda sanitaria per tipologia edilizia nei tre scenari	83
Grafico 4.7 Stima dei risparmi medi in termini di energia (kWh/m ² /anno) e percentuali per edificio dei due scenari di riqualificazione rispetto alla stima del consumo attuale per tipologia edilizia (consumi per riscaldamento)	88
Grafico 4.8 Stima dei risparmi medi in termini di energia (kWh/m ² /anno) e percentuali per edificio dei due scenari di riqualificazione rispetto alla stima del consumo attuale per tipologia edilizia (consumi per acqua calda sanitaria)	88
Grafico 4.9 Stima dei risparmi medi in termini di energia (kWh/m ² /anno) e percentuali per edificio dei due scenari di riqualificazione rispetto alla stima del consumo attuale per classe d'età (energia per riscaldamento)	89
Grafico 4.10 Stima dei risparmi medi in termini di energia (kWh/m ² /anno) e percentuali per edificio dei due scenari di riqualificazione rispetto alla stima del consumo attuale per classe d'età (energia per acqua calda sanitaria)	89
Grafico 4.11 Consumi stimati per riscaldamento per i 5 campioni di sezioni censuarie che vanno a costituire i 5 rispettivi campioni di tessuto urbano (kWh/m ² /anno)	100
Grafico 4.12 Consumi medi attuali stimati per riscaldamento dei 5 campioni di tessuto urbano analizzati (kWh/m ² /anno)	100
Grafico 4.13 Consumi stimati per acqua calda sanitaria per i 5 campioni di sezioni censuarie che vanno a costituire i 5 rispettivi campioni di tessuto urbano (kWh/m ² /anno)	101
Grafico 4.14 Consumi medi attuali stimati per acqua calda sanitaria dei 5 campioni di tessuto urbano analizzati	101
Grafico 4.15 Risparmio energetico medio stimato netto per riscaldamento per le 5 tipologie di tessuto urbano	103
Grafico 4.16 Risparmio energetico medio stimato percentuale per riscaldamento per le 5 tipologie di tessuto urbano (%)	103
Grafico 4.17 Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento medio per i campioni di tessuto urbano analizzati per i due scenari di riqualificazione (kWh/m ² /anno)	104
Grafico 4.18 Fabbisogno di energia primaria per acqua calda sanitaria medio per i campioni di tessuto urbano analizzati per i due scenari di riqualificazione (kWh/m ² /anno)	104

Grafico 4.19 Consumi per riscaldamento medi per i 5 tessuti considerati negli scenari di riqualificazione (kWh/m ² /anno).	104
Grafico 4.20 Consumi per ACS medi per i 5 tessuti considerati negli scenari di riqualificazione (kWh/m ² /anno)	105
Grafico 4.21 Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento medio per i campioni di tessuto urbano analizzati nello scenario in cui si ipotizza una riqualificazione standard per i tessuti TUB ed una avanzata per i restanti tessuti.....	105
Grafico 4.22 Valori stimati di produzione annua di energia elettrica da pannelli fotovoltaici installati sui tetti degli edifici residenziali di Milano nei vari scenari tecnologici e amministrativi.....	115
Grafico 4.23 Suddivisione delle sezioni censuarie per classi di energia netta (kWh/anno) per lo scenario teorico (che include gli edifici centrali) e lo scenario reale (che prevede di escluderli) nel caso dei consumi elettrici attuali.....	119
Grafico 4.24 Suddivisione delle sezioni censuarie per classi di energia netta (kWh/anno) per lo scenario teorico (che include gli edifici centrali) e lo scenario reale (che prevede di escluderli) nel caso dei consumi elettrici ridotti del 40%.....	119
Grafico 4.25 Consumi di energia elettrica medi per le sezioni censuarie dei 5 campioni di tessuto urbano considerati	123
Grafico 4.26 Valori di bilancio di energia elettrica netta (consumata – prodotta) medi per le sezioni censuarie dei 5 campioni di tessuto urbano considerati (GWh/anno/sezione).....	124
Grafico 4.27 Valori medi del grado di autoproduzione di energia elettrica per i 5 campioni di tessuto urbano considerati	125
Grafico 4.28 Valori complessivi del grado di autoproduzione di energia elettrica per i 5 campioni di tessuto urbano considerati (%).	125
Grafico 4.29 Consumi medi attuali per riscaldamento dei 5 campioni di tessuto urbano analizzati (kWh/mq/anno).....	128

1 INTRODUZIONE

Questo lavoro di tesi si inquadra in quel filone di ricerca volto ad una miglior comprensione delle relazioni esistenti tra consumi energetici, produzione di energia da fonti rinnovabili e città. In questo capitolo introduttivo verrà affrontata la questione riguardante i consumi di energia e le problematiche conseguenti, partendo dalla scala globale, per arrivare a quella urbana e del singolo edificio. Verranno quindi presentati gli obiettivi del presente lavoro di tesi ed il filo logico seguito per la stesura dell'elaborato.

1.1 La questione energetica: consumi di energia e città

La questione energetica alla scala globale

E' ormai noto da tempo che il tenore di vita della popolazione ha una relazione diretta con l'energia: vari indicatori mostrano correlazioni positive fra consumi energetici e, per esempio, prodotto nazionale lordo pro capite e vita media delle persone, tasso di mortalità infantile, tenore e qualità della vita. La disponibilità di energia a basso prezzo ha infatti fatto migliorare la qualità della vita delle popolazioni nei paesi sviluppati e l'alto consumo di energia è stato un prerequisito per ottenere più prodotti e servizi. I consumi energetici hanno avuto una crescita enorme: in Italia, per esempio, attorno agli anni 1950 - 1970 la crescita annua per persona è stata di circa il 10%, con un incremento ancora più rapido per l'energia elettrica.

Di questo passo si è arrivati ai giorni nostri, in una situazione in cui i consumi, a livello mondiale, continuano a crescere, ed inoltre le preoccupazioni di natura economica e finanziaria sembrano aver allontanato l'attenzione dei governi dalle politiche energetiche e ridotto i loro strumenti di intervento, segnale tutt'altro che incoraggiante per il conseguimento degli obiettivi climatici concordati a livello globale. Infatti, circa l'84% delle attuali emissioni di CO₂ è legato all'energia e circa il 56% delle emissioni totali di gas ad effetto serra può essere imputato alla produzione e al consumo di energia (*Energy Technologies Perspective*, IEA, 2012). Il World Energy Outlook 2011 dell'International Energy Agency (IEA), evidenziando le implicazioni ambientali dei trend in atto e la prospettiva di non centrare gli obiettivi di contenimento delle emissioni di CO₂ condivise a livello internazionale, sottolinea le criticità dei governi nella definizione di obiettivi e nell'implementazione delle politiche necessarie al loro conseguimento (World Energy Outlook, IEA, 2011). La domanda di energia primaria nel corso del 2010 è stata maggiore del 5% rispetto all'anno precedente e di conseguenza anche le emissioni di gas ad effetto serra hanno registrato un nuovo picco (33 Mt CO₂), con una crescita del 5,8% rispetto ai valori 2009. Inoltre, nonostante molti paesi abbiano adottato misure di miglioramento dell'efficienza energetica, l'intensità energetica mondiale è peggiorata per il secondo anno consecutivo: l'incremento dei consumi di energia primaria tra il 2000 e il 2009 mostra la forte concentrazione della domanda aggiuntiva in alcuni paesi (vedi Figura 1.1), prima di tutto in Cina, seguita dall'India, e principalmente determinata dal consumo di carbone. Anche il Brasile evidenzia un aumento della domanda soddisfatta con una crescita della disponibilità di biomassa e l'Unione Europea mostra un incremento nel consumo primario di energia da fonti rinnovabili (ENEA, 2012). Per quanto riguarda la situazione energetica in Italia, la domanda di energia primaria, nel 2011, si è attestata sui 184,2 Mtep, l'1,9% in meno rispetto al 2010. La contrazione del fabbisogno energetico è stata determinata dall'effetto di diversi fattori: il clima più mite, il perdurare della crisi economica e l'applicazione di politiche di efficienza energetica.

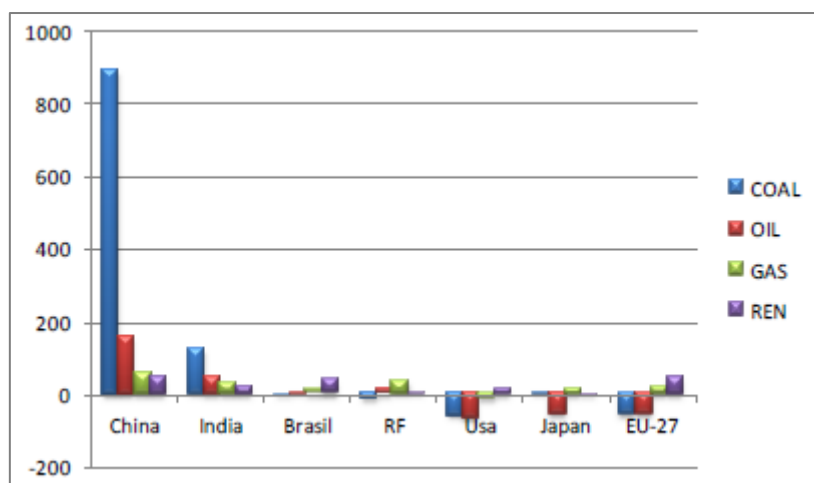


Figura 1.1 Incremento dei consumi di energia primaria per paese e combustibile (2000- 2009) (Mtep) (ENEA, 2012)

Per contrastare i rischi dei cambiamenti climatici, il Consiglio Europeo ha adottato l'obiettivo per l'UE di ridurre entro il 2050 le emissioni di gas serra di almeno l'80% rispetto ai livelli del 1990, in modo tale da essere in grado di contenere il riscaldamento globale entro i 2-2,4°C. Secondo la Roadmap europea, come tappe intermedie verso l'obiettivo al 2050, le emissioni dovrebbero essere ridotte almeno del 40% rispetto al 1990 entro il 2030 e del 60% entro il 2040. A livello mondiale, invece, si parla di riduzioni complessive meno contenute (riduzione delle emissioni di CO₂ del 50% al 2050), in quanto si tiene conto dei paesi in via di sviluppo ed emergenti, che per forza di cose saranno meno coinvolti nella pesante riduzione delle emissioni che vede in prima linea, tra gli altri, i paesi europei. Il raggiungimento di tale obiettivo implica per il 2050 la quasi completa decarbonizzazione della produzione elettrica, un processo di efficientamento e di innovazione che potrebbe rafforzare al contempo sicurezza degli approvvigionamenti e competitività dell'Europa. Sono quattro le strade principali prospettate per un sistema energetico a zero emissioni per i paesi sviluppati:

- efficienza energetica, con effetti soprattutto sul versante della domanda;
- produzione di energia da fonti rinnovabili;
- tecnologie di cattura e stoccaggio della CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS);
- nucleare, che non viene prescritto, ma continua a essere ritenuto un'alternativa sicura e sostenibile rispetto alle fonti tradizionali.

La Roadmap non indica nessuna delle opzioni prospettate come quella vincente: tutti gli scenari proposti combinando in vario modo i diversi fattori evidenziano che la decarbonizzazione del sistema energetico è possibile e a costi accessibili (vedi Figura 1.2). Dalla figura qui di seguito si nota come efficienza energetica e produzione di energia da FER siano le basi per questa decarbonizzazione, contribuendovi, infatti, per oltre il 60%.

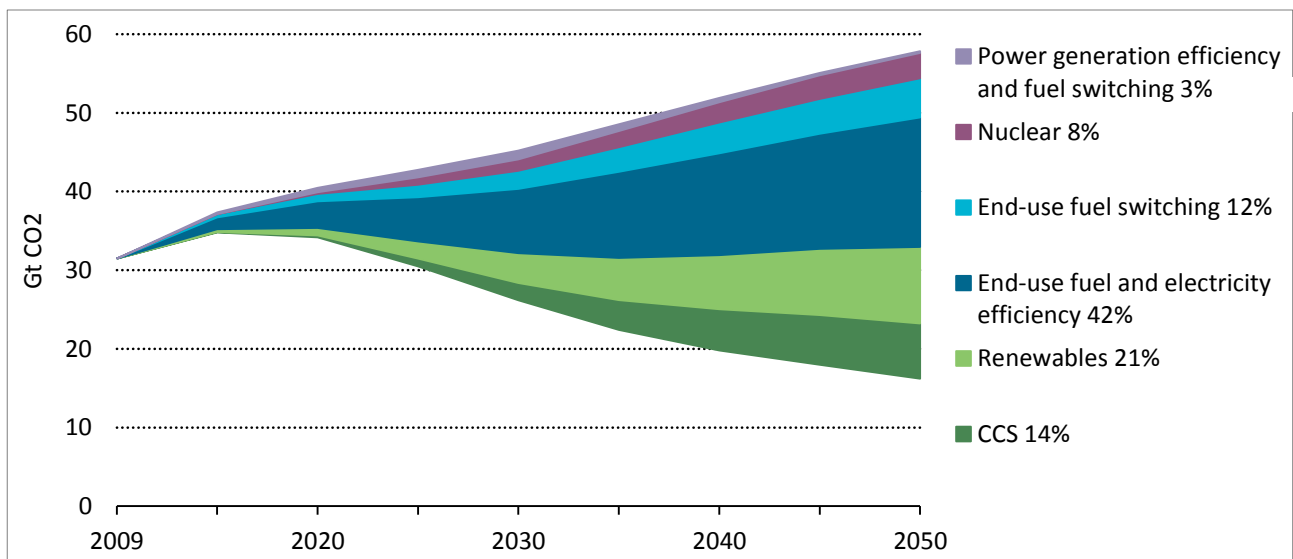


Figura 1.2 Principali tecnologie per la riduzione delle emissioni di CO₂ a scala globale, rispetto allo scenario attuale, per l'obiettivo -50% al 2050 (IEA, 2012)

Consumi energetici, città ed edifici

In un tale contesto si inseriscono il settore residenziale e la *scala urbana*: le città hanno un ruolo di primo piano quanto a consumi di energia ed emissioni di gas climalteranti: l'urbanizzazione è il fenomeno e il processo chiave del Novecento, e lo è attualmente per i paesi emergenti e in via di sviluppo. Negli ultimi anni l'inurbamento ha portato, infatti, ad un grande mutamento delle cifre che ne definiscono le dimensioni: a livello globale, da 600 milioni di persone che vivevano in città nel 1920 si è passati a circa 2 miliardi nel 1986. Fino a un secolo fa, solo il 14% della popolazione risiedeva in città e nel 1950 si era ancora al di sotto del 30%; ora siamo circa al 50%. Secondo alcune stime, la popolazione urbana rappresenterà all'incirca l'80% della popolazione mondiale entro il 2100. Da un punto di vista energetico, si stima che i settori residenziale e terziario siano responsabili in una quota all'incirca pari al 10% delle emissioni globali di CO₂, ma includendo anche le emissioni indirette associate all'uso di elettricità del comparto, la quota sale a circa il 30%; guardando al futuro, per alcune previsioni, al 2030 le città consumeranno, invece, circa il 75% della totalità dell'energia prodotta, e gli edifici useranno oltre il 40% dell'energia primaria globale (IEA, 2010).

In Italia, considerando la ripartizione degli impieghi finali di energia tra i diversi settori si fa riferimento al grafico di Figura 1.3, in cui, tra le altre cose, si fa notare la riduzione del 2,65% tra 2010 e 2011, mentre tra 2000 e 2011 si ha una forte riduzione (-23%) per il settore industriale ed un significativo aumento del settore civile (+15%) (per settore civile si intende settore residenziale + terziario) (Rapporto Annuale Efficienza Energetica - 2011, ENEA, 2012). Per quanto riguarda il settore di maggiore interesse ai fini di introdurre il presente lavoro di tesi, nel 2010, il consumo energetico del settore residenziale è stato di circa 28 Mtep, con un incremento dell'8,3% rispetto al 2009. La principale fonte energetica utilizzata, il gas naturale, ha registrato un aumento del 9,0%; incrementi si sono registrati anche per la legna (+52%) e per l'energia elettrica (+0,9%). Le altre fonti energetiche hanno subito tutte una riduzione del consumo. I consumi, dopo la contrazione verificatasi nel periodo 2005-2007, sono tornati a salire negli ultimi due anni, favoriti anche dal maggior utilizzo di gas naturale, che nel 2010 ha coperto il 54% del consumo totale, mentre l'utilizzo dell'energia elettrica che nel 1990 era pari al 18%, nel 2010 ha raggiunto il 22%.

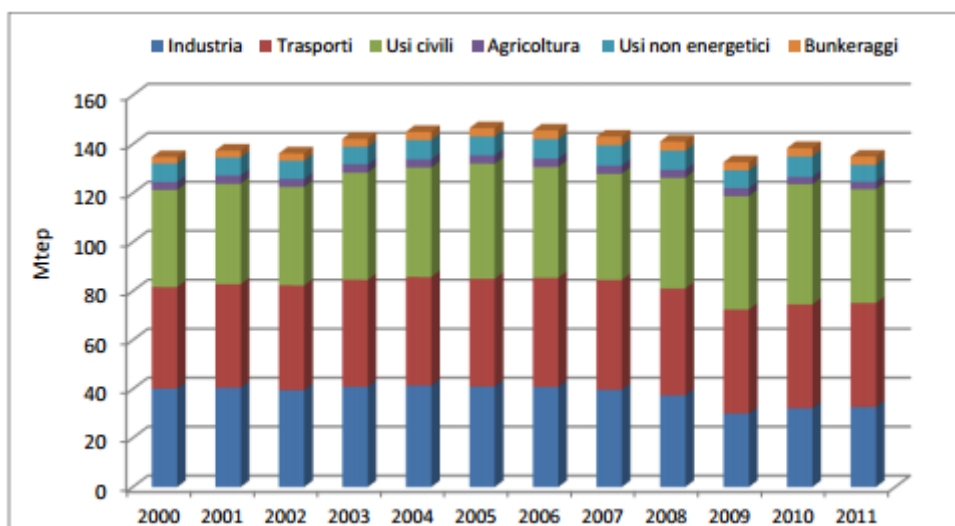


Figura 1.3 Impieghi finali di energia per settore dal 2000 al 2011 (RAEE 2011, ENEA, 2012)

Dalla ripartizione dei vari consumi italiani, emergono i consumi per riscaldamento, che coprono oltre i due terzi dei consumi complessivi (vedi Figura 1.4). Per quanto concerne, invece, il consumo di energia per abitazione, l'Italia mostra una riduzione dell'8,3% tra 2000 e 2010, variazione tuttavia inferiore rispetto al corrispondente valore della media EU27 (-15,5%). Il consumo elettrico per abitazione, nel periodo considerato, ha registrato una riduzione di poco superiore al 4%, collegata all'acquisto e all'utilizzo da parte dei consumatori di apparecchi elettrici più efficienti, rispetto all'aumento di circa il 6% della media europea (vedi Figura 1.5)(ENEA, 2012).

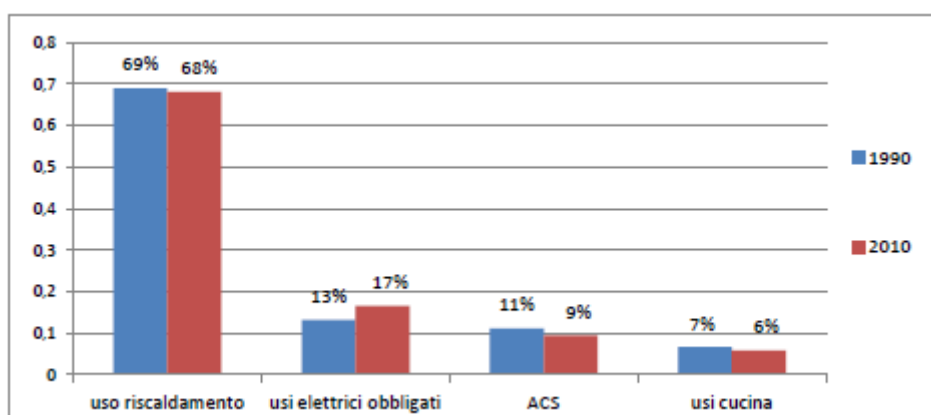


Figura 1.4 Confronto tra i consumi per uso nel settore residenziale nel periodo 1990-2010 (ENEA, 2012)

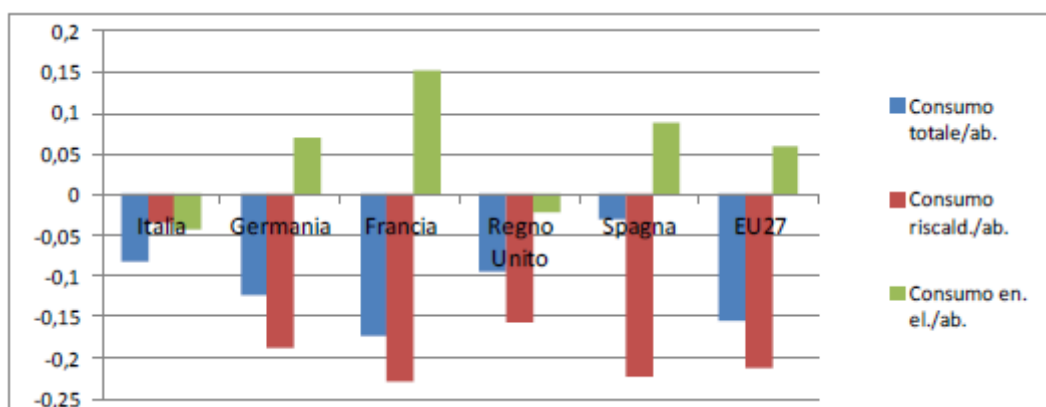


Figura 1.5 Variazioni del consumo totale, elettrico e per riscaldamento per abitazione tra 2000 e 2010 (ENEA, 2012)

In Figura 1.6 vengono definite le percentuali di riduzione di energia necessari alla riduzione al 2050 del 50% delle emissioni rispetto al 2000 per il settore civile; si noti come il settore residenziale pesi per oltre il 70% in

tale contesto, ed il riscaldamento ambienti per il 25%. In Figura 1.7 presentiamo, invece, i diversi contributi alla riduzione di CO₂ per le varie opzioni dello scenario *BLUE Map* (che prevede, su scala globale, al 2050 una riduzione del 50% sui livelli del 2000) rispetto alla proiezione della situazione attuale (*Baseline*), in cui risulta evidente l'importanza della transizione di un'ampia quota di consumi ad energia elettrica ed il ricorso ad impianti a fonti rinnovabili ed ad elevata efficienza.

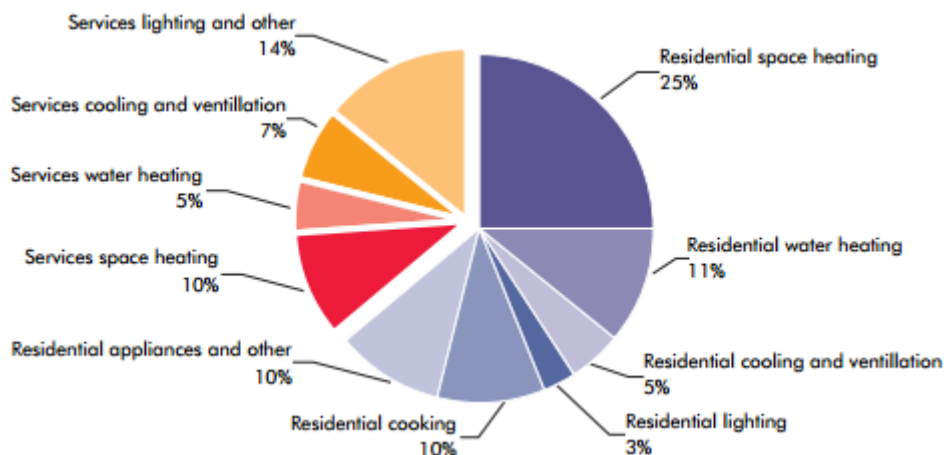


Figura 1.6 Risparmi di energia necessari per lo scenario *BLUE Map* per i settori servizi e residenziale per usi finali (IEA, 2010)

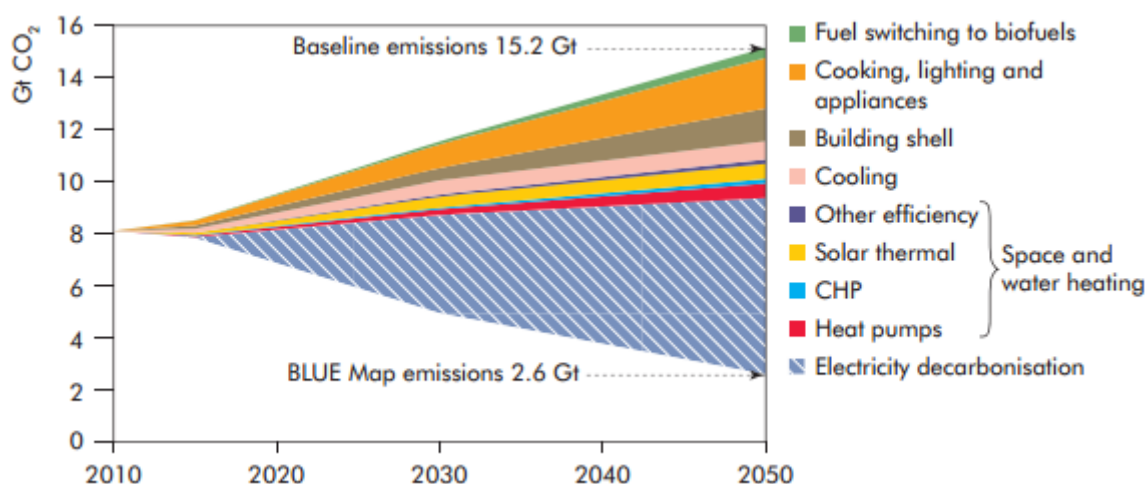


Figura 1.7 Contributo alla riduzione di CO₂ del settore residenziale per le diverse opzioni nello scenario *BLUE Map* (IEA, 2010)

Pianificazione energetica alla scala locale

In campo energetico, attualmente operano a livello locale alcuni strumenti programmatici allo scopo di recepire gli obiettivi comunitari e regionali, ed applicarli alla scala comunale; citiamo, quindi, il Piano Energetico Comunale (PEC) ed il Piano d'Azione per l'Energia Sostenibile (PAES). I primi furono introdotti dalla Legge 10/91, e prevedono accanto alla redazione del vecchio PRG (per i comuni oltre i 50.000 abitanti) "uno specifico piano a livello comunale relativo all'uso delle fonti rinnovabili di energia", con l'obiettivo della razionalizzazione dei consumi, della diversificazione delle fonti tradizionali e della sostituzione delle fonti convenzionali con fonti rinnovabili, dell'utilizzazione di disponibilità energetiche locali e della limitazione dell'inquinamento e degli usi energetici non compatibili con il territorio; al 2009, però, secondo ISTAT, solo il 37% dei comuni interessati aveva provveduto all'elaborazione di un PEC. I PAES sono, invece, uno strumento proposto dalla Commissione Europea come iniziativa su base volontaria (*Patto dei Sindaci*), che impegna le città europee a ridurre di almeno il 20% le proprie emissioni di gas serra; al 2011, però, dei 1000 comuni italiani che avevano aderito (circa il 13% dei comuni totali), circa 120 hanno inviato il piano, e solo uno di questi è stato già accettato. Oltre quindi ad una questione di tempistica del recepimento normativo, si affianca una generale limitatezza nelle competenze e nelle risorse a livello comunale, in particolare per i comuni più piccoli, che porta inevitabilmente ad azioni poco

efficaci ed incomplete. Inoltre, in stretta relazione con il modello definito in questo lavoro di tesi, i consumi vengono generalmente stimati su basi di dati esclusivamente di tipo statistico, in quanto risulta molto limitata l'applicazione di metodologie e/o modelli in grado di effettuare una stima puntuale e precisa dei fabbisogni energetici reali.

2 RIFERIMENTI

In questo capitolo si tratterà dei paper a cui si è fatto riferimento per la costruzione del modello e per l'analisi dei relativi risultati, o da cui semplicemente si è preso spunto nella stesura concettuale del lavoro. Si parlerà come prima cosa di lavori riguardanti heatmaps urbane, e cioè mappe in cui vengano visualizzati i consumi energetici a scala urbana, siano misurati o stimati, definendo prima una proposta di classificazione riferendosi ad un primo paper, per poi andare a commentarne altri che hanno realizzato heatmaps urbane simili a quelle obiettivo del presente lavoro di tesi. Si è passati quindi a parlare di lavori riguardanti modelli per la stima del potenziale di energia da fonti rinnovabili, tenuti come riferimento per la seconda parte del lavoro, riguardante appunto la stima dell'energia che è possibile produrre da fonti energetiche rinnovabili reperite localmente.

2.1 Introduzione alle heatmaps urbane

Nel capitolo precedente si è parlato di quanto sia importante a livello urbano la questione dei consumi energetici e la necessità di ridurli drasticamente, riducendo l'impatto del consumo di energia partendo da una pianificazione attenta anche a questo campo d'azione. Come detto, le città hanno un ruolo di primo piano quanto a consumi di energia ed emissioni di gas climalteranti: l'urbanizzazione è il fenomeno e il processo chiave del Novecento, e lo è attualmente per i paesi emergenti e in via di sviluppo. Secondo alcune previsioni, al 2030 le città consumeranno circa il 75% della totalità dell'energia prodotta, e gli edifici useranno oltre il 40% dell'energia primaria globale (IEA, 2008). D'altra parte, però, così come le città sono in prima fila per quanto riguarda i consumi energetici, proprio per questo, devono e dovranno essere in primo piano anche nell'impegno di ridurre i consumi, di incrementarne l'efficienza, e quindi di dare il proprio contributo per mitigare i cambiamenti climatici e ridurre l'inquinamento. Ma com'è noto, *if you can't measure it, you can't manage it*, e quindi le mappe urbane dei consumi energetici nascono proprio dalla necessità di misurare i consumi di energia legati alla città, per poterli gestire, con il fine di ridurli. Esse sono infatti il principale output di modelli di previsione o di stima delle prestazioni energetiche, e quindi dei relativi consumi, di edifici, quartieri, intere città, comuni o addirittura regioni, a seconda della scala a cui il modello si prefigge di lavorare.

Una proposta di classificazione

Come tutti i modelli, anche quelli di stima dei consumi energetici a livello cittadino si sviluppano su caratteristiche e scale diverse, inducendo quindi la necessità di una classificazione per meglio interpretarne le differenti peculiarità e potenzialità. Swan e Ugursal (2009) distinguono innanzitutto i due approcci di base: *top-down* (dall'alto verso il basso) e *bottom-up* (dal basso verso l'alto) (vedi Figura 2.1). Il primo tratta il parco edifici come un assorbitore e dissipatore di energia, senza curarsi di come sono suddivisi gli usi finali; la stima dei consumi avviene solitamente sulla base di dati storici, sopra i quali si vanno a considerare le variazioni occorse nel tempo. Le variabili che vengono considerate possono essere di tipo *econometrico* (e.g. GDP, tasso occupazione, indici di valore, ...) o *tecnologico* (e.g. dati climatici, tasso di costruzione/demolizione edifici, numero medio elettrodomestici, numero di addetti/residenti, ...). Quindi i modelli che si basano sull'approccio top-down necessitano in input di dati storici, che vengono poi riscaldati o pesati a seconda delle evoluzioni (*econometriche* o *tecnologiche*) che si considerano. Dall'altra parte, l'approccio *bottom-up* comprende tutti quei

modelli che utilizzano dati di input con una certa gerarchia, piuttosto che dati complessivi di un intero settore: sono in grado di considerare il consumo di energia di singoli usi finali, utenze singole e gruppi di utenze, che vengono quindi estrapolate per definire usi finali/utenze tipo, che vengono quindi “spalmate” su usi finali/utenze simili, per definire i consumi ad una scala più ampia.

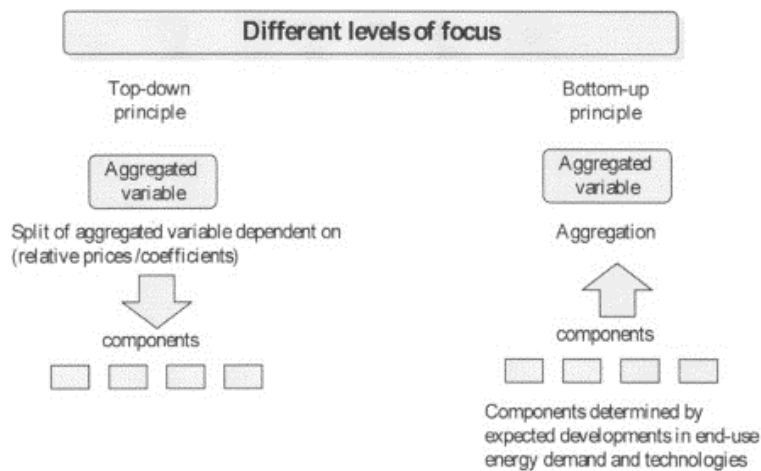


Figura 2.1 Schematizzazione degli approcci top-down e bottom-up (Swan e Ugursal, 2009)

Tra i *bottom-up*, i metodi di estrapolazione possono essere di tipo *statistico* o *ingegneristico*. I primi si basano su informazioni storiche e mediante varie tecniche di regressione attribuiscono ai vari consumi i rispettivi usi finali; i secondi sfruttano informazioni tecnologiche, quali l'efficienza e la tipologia di applicazioni energetiche o relazioni termodinamiche. Definiti quindi i consumi di alcune utenze tipo, i risultati possono, come detto, essere estrapolati per essere rappresentativi anche a livello regionale o nazionale.

Come risulta evidente da **Errore. L'autoriferimento non è valido per un segnalibro.**, i metodi statistici si suddividono in:

- **metodi di regressione**, che utilizzano, appunto, analisi di regressione su serie storiche per determinare i coefficienti del modello corrispondenti ai parametri di input; la precisione della stima finale dipenderà quindi fortemente dalla bontà della regressione, e quindi da precisione e pertinenza dei dati storici;
- **metodi Conditional Demand Analysis (CDA)**, che effettuano la regressione basata sul numero di apparecchi e occupanti degli edifici in questione, necessitando quindi di indagini su edifici campione;
- **reti neurali**, in cui i *neuroni* sono rappresentati dai singoli usi finali, che vengono quindi interconnessi a seconda delle diverse caratteristiche.

I metodi ingegneristici si dividono invece in:

- **metodi di distribuzione**, che utilizzano la distribuzione dei dispositivi energivori e dei rispettivi consumi tra le varie utenze per definire il consumo di energia per ogni end-use;
- **metodi ad Archetipo**, in cui vengono definiti edifici tipo (*Archetipi*) con i rispettivi consumi a seconda di anno costruzione, grandezza, tipologia edilizia, ..., per poi essere “spalmati” sugli edifici esistenti;
- **metodi a campione**, in cui viene definito un campione (*sample*) di utenza tipo, il più possibile rappresentativo della regione in questione, e mediante opportune pesature si stima il consumo di energia totale.

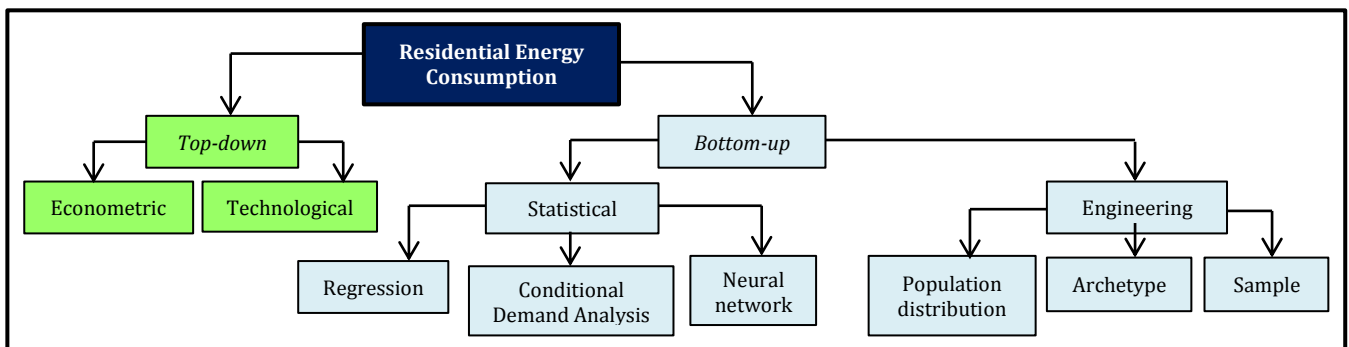


Figura 2.2 Suddivisione delle tecniche di modellazione dei consumi energetici degli edifici (Swan e Ugursal, 2009)

Nella seguente tabella vengono riassunti e schematizzati aspetti positivi e negativi delle due metodologie appena descritte:

Tabella 2.1 Tabella riassuntiva dei pro e contro dei due differenti approcci alla modellazione dei consumi energetici degli edifici (Swan e Ugursal, 2009)

	Top-down	Bottom-up statistical	Bottom-up engineering
<i>Positive attributes</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Long term forecasting in the absence of any discontinuity • Inclusion of macroeconomic and socioeconomic effects • Simple input information • Encompasses trends 	<ul style="list-style-type: none"> • Encompasses occupant behaviour • Determination of typical end-use energy contribution • Inclusion of macroeconomic and socioeconomic effects • Uses billing data and simple survey information 	<ul style="list-style-type: none"> • Model new technologies • “Ground-up” energy estimation • Determination of each end-use energy consumption by type, rating, etc. • Determination of end-use qualities based on simulation
<i>Negative attributes</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Reliance on historical consumption information • No explicit representation of end-uses • Coarse analysis 	<ul style="list-style-type: none"> • Multicollinearity • Reliance on historical consumption information • Large survey sample to exploit variety 	<ul style="list-style-type: none"> • Assumption of occupant behaviour and unspecified end-uses • Detailed input information • Computationally intensive • No economic factors

Questo tipo di classificazione non è rigorosa, ma vuole semplicemente porsi l'intento di fare ordine all'interno della molteplicità di studi che sono stati condotti sulla modellazione e sulla stima dei consumi energetici, con il fine di facilitarne l'analisi e la comprensione. Si è visto, infatti, analizzando, per quanto possibile, la letteratura scientifica del settore, che è difficile trovare lavori perfettamente coerenti in tale paradigma: mentre per indagini a scala vasta (nazionale o regionale) sono utilizzati quasi esclusivamente modelli *top-down* e a scala di città/quartiere modelli *bottom-up*, risulta meno rigoroso il confine (all'interno di questi ultimi) tra metodi statistici e ingegneristici; si è, infatti, rivelato piuttosto frequente l'utilizzo nello stesso modello *bottom-up* sia di metodi statistici che ingegneristici per definire i consumi dell'utenza tipo.

Di seguito verranno presentati alcuni lavori che hanno lo scopo di modellizzare e stimare i consumi energetici, e che sono stati studiati come base bibliografica per la stesura del presente lavoro di tesi.

Lavori di riferimento

In questo paragrafo vengono riportati i lavori a mio avviso più importanti studiati in quanto base bibliografica di questo lavoro di tesi. Scopo di questa sezione del lavoro è la definizione di analogie e differenze tra essi, dei dati necessari in input e delle informazioni che i modelli forniscono, evidenziando quindi vantaggi e svantaggi delle diverse scelte effettuate.

Il primo lavoro citato riguarda il modello per la stima dei consumi di energia per usi finali della città di New York (Modi et al., 2012). Questo paper ha l'obiettivo di stimare i consumi energetici (per riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria e elettricità) a scala urbana, per aiutare politici e tecnici a capire le dinamiche locali dei consumi e degli usi finali di energia degli edifici, in particolare al variare della *funzione*, fornendo anche la possibilità di simulare e quindi valutare gli effetti di futuri interventi di upgrade. Ipotesi di

base che gli usi finali dipendono, quindi, dalla funzione degli edifici (residenziale, uffici, istruzione, ...) e non da altri parametri, quali tipologia edilizia o anno di costruzione. La stima viene effettuata mediante regressione lineare usando come predittori $x_{f,i}$ le superfici totali per ogni edificio di funzione f e zip-code i , mentre i coefficienti β_f sono gli opportuni valori di intensità elettrica (per cooling + appliances) o di combustibile totale (per heating + ACS). Per ottenere i 4 consumi separati, si sono disaggregati i dati complessivi mediante una pesatura basata su indagini precedenti. L'unità di riferimento risulta quindi essere il *tax lot*, e cioè l'edificio singolo o l'insieme di edifici contigui, caratterizzato dal rispettivo zip-code. Come dati di input sono necessari i consumi annui di alcuni tax lot campione forniti da indagini precedenti, necessari per stimare i consumi di tutti i restanti edifici mediante, come detto, regressione lineare. Vengono poi considerati tutti gli edifici cittadini, distinti a seconda delle 8 funzioni: residenziale 1-4 famiglie, residenziale multi-famigliare, uffici, negozi, scuole, ospedali, magazzini e altro commerciale. Come output sono state realizzate mappe come quella di Figura 2.3, che presenta il consumo totale annuo per la città di New York in kWh/m². Facendo riferimento alla classificazione del paragrafo precedente, questo modello si potrebbe classificare come *bottom-up statistico*.

In un altro lavoro, a cura di Reiter e Marique (2012), viene proposta, invece, una metodologia per la definizione dei consumi di energia del settore residenziale per quanto riguarda gli edifici ed i trasporti alla scala urbana. Anche qui lo scopo, oltre a quello di stimare i fabbisogni di energia dell'area urbana in questione, riguarda la possibilità, grazie a strumenti GIS combinati con analisi statistiche dei dati, di valutare gli effetti dati da potenziali interventi migliorativi (di seguito verrà trascurata la parte sui trasporti, per concentrarsi sui consumi degli edifici). Qui la definizione dei consumi avviene dall'estensione a tutto lo stock dei consumi specifici di alcuni edifici tipo (per riscaldamento, ACS e lighting), definiti secondo 4 criteri (che sono anche i dati necessari in input): periodo di costruzione dell'edificio, eventuali interventi di rinnovamento dell'edificio, tipologia edilizia (pareti libere, n° piani, ...), tipologia di *housing* (abitazione singola o più abitazioni nello stesso edificio). L'analisi viene condotta sull'area urbana di Liegi (Belgio), sulla quale vengono poi definiti 6 scenari di rinnovamento del parco edilizio esistente e di stime sul consumo dei nuovi edifici, per valutare i consumi energetici sul lungo termine (a 60 anni) a seconda delle diverse strategie implementate negli scenari stessi.

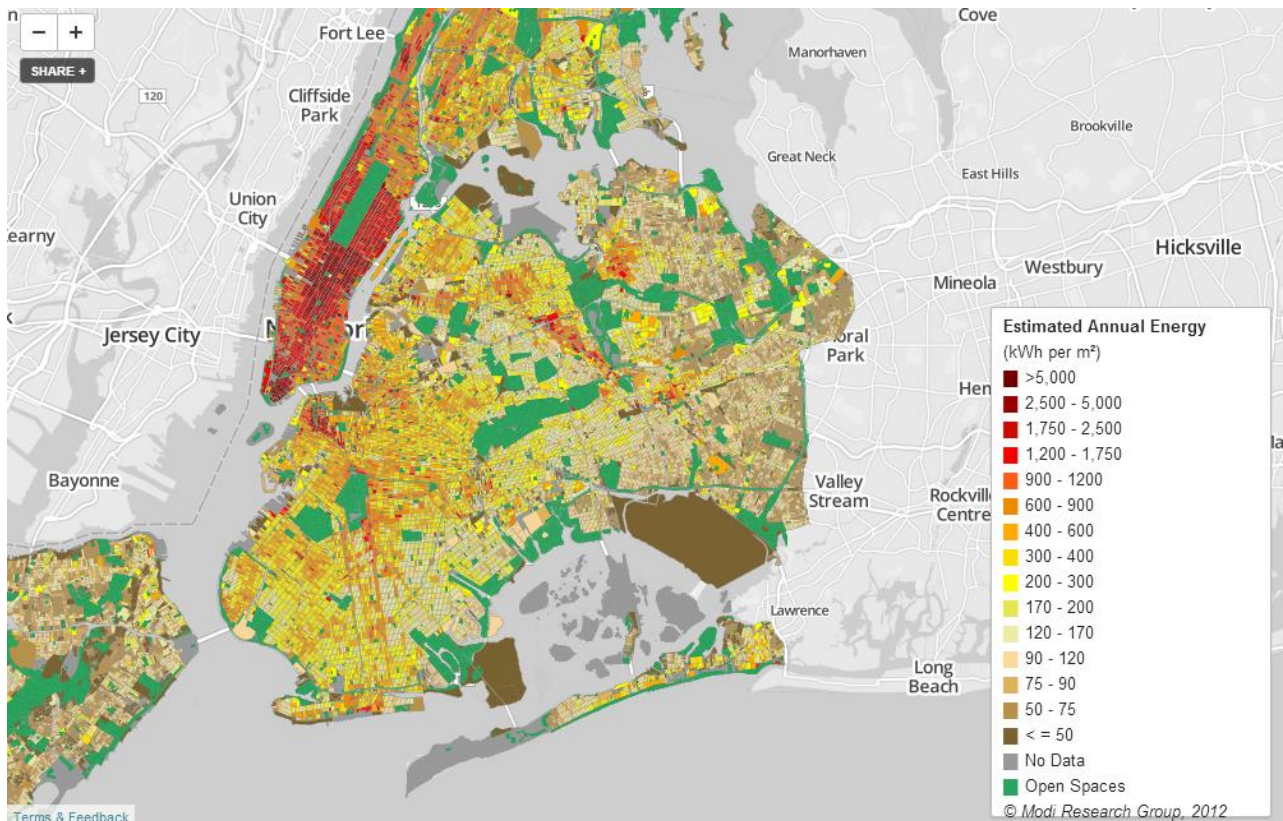


Figura 2.3 Mappa dei consumi annuali di energia per unità di superficie stimati da Modi et al. per la città di New York

Così come nel paper di Reiter e Marique, anche Jones et al. (2001) definiscono un modello (*EEP, Energy and Environmental Prediction*) per la stima di consumi energetici attuali e relative emissioni per valutare quindi i benefici derivanti da proposte di miglioramento dell'efficienza energetica per differenti settori e contesti spaziali. I dati necessari in input sono i seguenti:

- Localizzazione di ogni proprietà (ottenute via GIS, mediante post-code, road name,...)
- Dimensioni dell'edificio (ottenute via GIS, per avere una stima di superficie riscaldata, area facciata, superficie esposta, superficie per piano)
- Età dell'edificio (5 differenti classi)
- Forma dell'edificio (e.g. n° piani, area finestrata, rapporto facciata opaca/facciata totale)
- Assunzioni fatte durante la compilazione dei dati: n° stanze per piano, U-values per pareti, tetto e pavimenti, tecnologie di produzione di ACS, space heating, ..., provenienti da indagini in loco.

Da tali dati, ogni unità (post-code) viene collocata in una delle 20 tipologie di utenza tipo, per le 5 classi di età, producendo così 100 "cluster type", ognuno con un ben definito consumo energetico e relative emissioni inquinanti. Vengono quindi formulate delle proposte di miglioramento dell'efficienza energetica, che possono essere visualizzate e confrontate con la mappa dello stato di fatto. Oltre al modello di base che tratta esclusivamente edifici residenziali, sono stati implementati altri sub-models: non-domestic energy, energy use by industrial processes, traffic flow, emission dispersal model e health model. Un esempio di output del modello base viene presentato in Figura 2.4.

Il modello di Yamaguchi et al. (2007) è invece centrato sulla stima dei consumi del settore commerciale (inteso come complessivo di uffici, hotel, ospedali e negozi), per cui viene proposto un nuovo approccio modellistico (*district clustering modeling approach*) ed una conseguente valutazione di proposte per incrementare l'efficienza e ridurre quindi i consumi ed in particolare le emissioni di CO₂. In questo approccio si divide la città/comune campione in celle da 500m x 500m, classificate in 6 categorie di *districts*, per poi scegliere la cella (district) rappresentativa per ogni tipologia. Viene quindi applicato il modello, che va a quantificare il consumo annuale

per usi finali di energia al m² per il distretto campione; tale dato viene poi estrapolato per definire il consumo totale di energia dell'intera area urbana (approccio di tipo bottom-up). Come dati in input sono necessarie informazioni su forma, taglia e configurazione dell'edificio, informazioni su eventuali misure di risparmio energetico adottate, e informazioni su suddivisione ed utilizzo degli spazi dell'edificio.

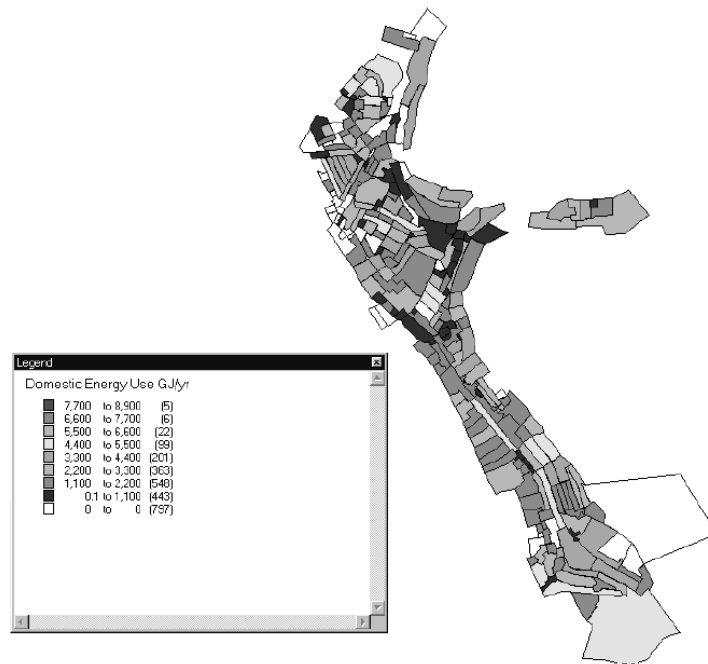


Figura 2.4 Mappa dei consumi energetici annuali stimati dal modello di Jones et al., 2001

Fino a questo punto si sono considerati studi riguardanti città estere, mentre in seguito verranno presentati lavori su città italiane, ed in particolare la città di Milano ed alcuni comuni vicini.

Consideriamo innanzitutto lo studio di Dall'O' et al. (2012), che prevede la definizione di uno strumento che permetta agli enti pubblici (in particolare i comuni) di creare un database, di semplice ed economica realizzazione, complessivo delle prestazioni energetiche degli edifici (energia termica per riscaldamento) in un contesto urbano. Si ottiene quindi in output un database, connesso ad un supporto cartografico mediante GIS, che definisce l'EP_H (fabbisogno di en primaria per riscaldamento) stimato/calcolato o reale (da certificazione) degli edifici della municipalità in questione, partendo sia da dati statistici che tecnici per la definizione di edifici tipo; l'approccio è quindi del tipo *bottom-up*, ma che unisce sia metodi statistici che ingegneristici. Il modello viene applicato come caso di studio al comune di Carugate (MI); in Figura 2.5 la schermata in GIS degli edifici classificati a seconda della classe energetica stimata. Il modello è applicato ai singoli edifici, e solamente alla categoria dei residenziali; i dati necessari in input sono i seguenti:

- Tipologia edilizia
- Periodo di costruzione
- Destinazione edificio (commerciale, residenziale, ...)
- Dati geometrici edifici (tra cui importante il rapporto S/V)
- Dati climatici (gradi giorno GG)

Un altro lavoro applicato ad un comune della provincia di Milano è quello di Troglia et al. (2011), che va a definire la stima della domanda di energia per riscaldamento della città di Gorgonzola (MI), partendo dall'analisi delle performance energetiche del parco edifici esistente, comparando in particolare i consumi per le differenti tipologie edilizie, realizzando quindi un modello che sia in grado di integrare nella progettazione e nella pianificazione urbana la questione energetica. Il modello è stato realizzato definendo come prima cosa un database per determinare gli edifici tipo (archetipi) del contesto urbano in questione (circa il 20-25% degli

edifici totali) con le rispettive caratteristiche (vedi dati di input), per poi simularne i consumi da heating mediante il software CASAnova; vengono quindi definiti i consumi di tutti gli edifici attribuendo i consumi degli edifici archetipo ai rispettivi cluster di appartenenza (di edifici per ogni tipologia). Un esempio di output del modello è presentato in Figura 2.6.

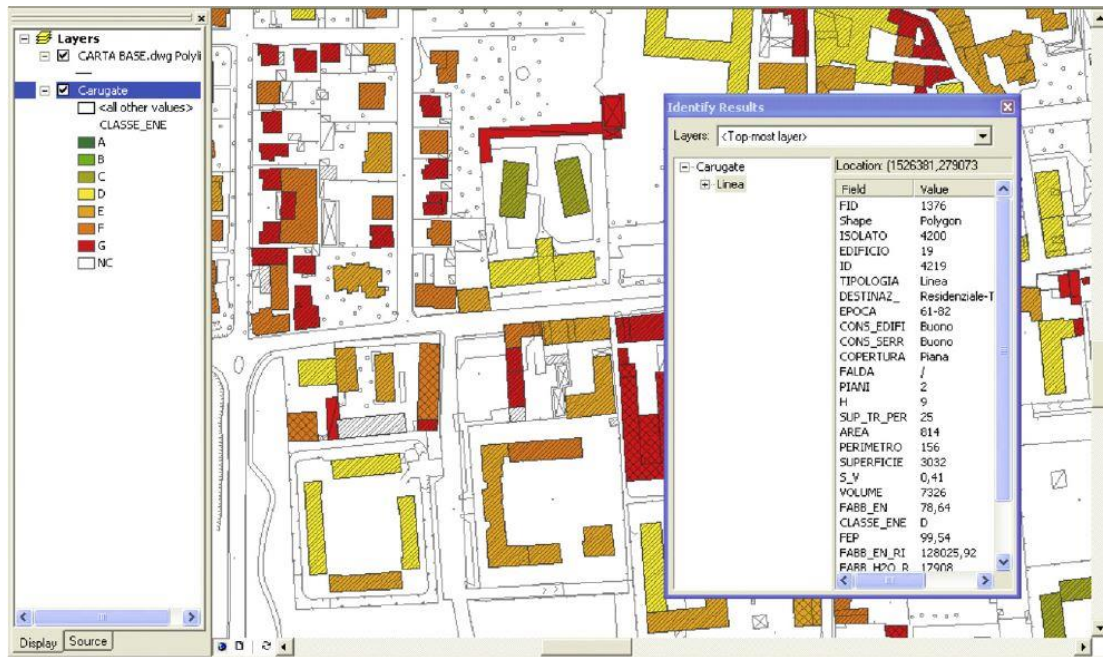


Figura 2.5 Schermata in sw GIS degli edifici del comune di Carugate colorati a seconda della classe energetica stimata (Dall'O' et al., 2012)



Figura 2.6 Dettaglio della mappa del fabbisogno di calore per riscaldamento degli edifici del comune di Gorgonzola (Troglio et al., 2010)

I dati in input necessari sono i seguenti:

- Tipologia edilizia (traditional urban block, regular urban block, detached housing, slab housing, terraced housing)
- Età dell'edificio (per definire in particolar modo i valori U dei materiali)
- Altezza dell'edificio (calcolata come differenza tra livello terreno e livello cornicione)
- Ulteriori dati geometrici calcolati con sw GIS.

In questo paper vengono inoltre presentate alcune considerazioni riguardo ai consumi delle diverse tipologie edilizie al variare del periodo di costruzione (che presentiamo in Figura 2.7), interessanti in quanto evidenziano il fatto che per i dati analizzati il periodo di costruzione (e quindi i materiali utilizzati e l'impiantistica installata) possa influire maggiormente rispetto alla variazione della tipologia edilizia, ribadendo quindi l'importanza ed i benefici di una progettazione dell'involucro edilizio attenta alla questione energetica.

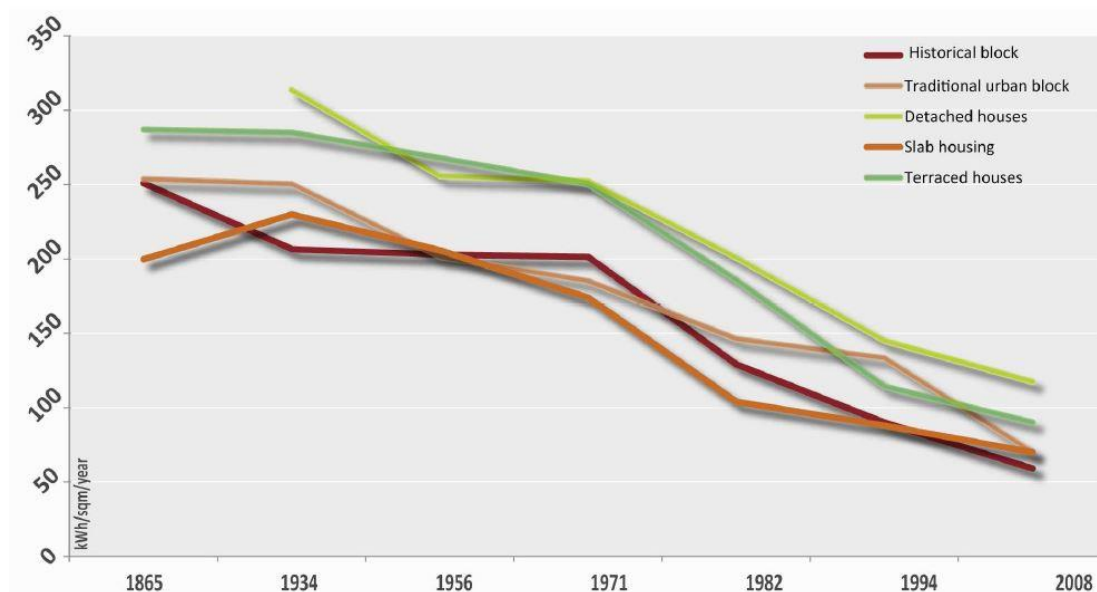


Figura 2.7 Andamento del consumo medio di energia per riscaldamento per ogni età e tipologia edilizia (Troglio et al., 2010)

Anche il paper di Doni e Keim (2010) ha lo scopo di effettuare una stima del fabbisogno energetico della città di Milano, andando a correlare i temi dell'analisi del tessuto urbano con quelli del consumo energetico. Viene eseguita una stima del fabbisogno energetico della città di Milano a partire dalle performances energetiche dei vari brani di tessuto urbano che la compongono, andando a definire 5 tessuti tipo (con la descrizione per ognuno di alcuni parametri geometrico-funzionali), e, a seconda di epoca di costruzione, tipologia edilizia, irraggiamento solare e trasmittanza, viene definito il fabbisogno energetico per riscaldamento degli edifici per ogni tessuto grazie al modello di calcolo sviluppato dall'EIFER (European Institute For Energy Research). I principali dati necessari in input sono i seguenti:

- Tipologia di tessuto urbano (*Traditional urban block, Regular urban block, Slab housing, Tower block housing e Detached housing*)
- Periodo di costruzione
- Tipologia edilizia (*Villa isolata su lotto, Villetta a schiera, Stecca ad alta densità, Stecca a bassa densità, Torre, Blocco, Grande corte, Edificio intercluso*)
- Trasmittanza media (U)
- Dati geometrici degli edifici (calcolati in sw GIS, in funzione della tipologia edilizia)
- Irraggiamento solare degli edifici.

Vengono definiti due diversi scenari: uno in cui si valuta il fabbisogno energetico al variare della tipologia di tessuto urbano, quindi senza l'influenza del periodo di costruzione; l'altro (più realistico e preciso) in cui si considera anche l'epoca di costruzione mediante i diversi valori di trasmittanza termica. I risultati del primo vengono riportati in Figura 2.8, quelli del secondo in Figura 2.9, presentati sia per tipologia di tessuto urbano (a sinistra) che per tipologia edilizia (a destra).

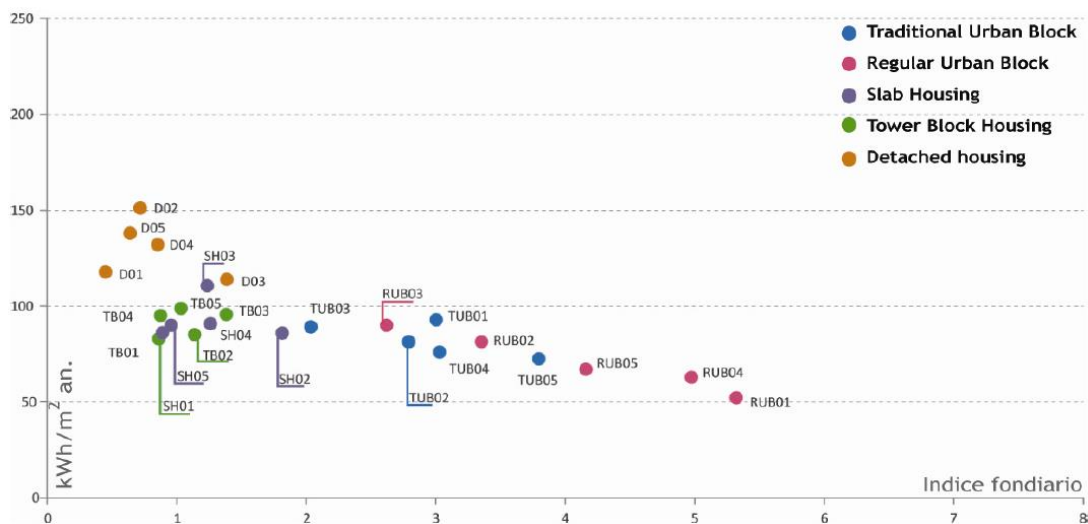


Figura 2.8 Grafico risultante dal primo scenario del modello di Doni e Keim, 2011 (stima dei consumi energetici delle differenti tipologie di tessuto urbano, ipotizzando come unica variabile proprio la tipologia di tessuto)



Figura 2.9 Grafico risultante dal secondo scenario del modello di Doni e Keim, 2011 (consumi energetici delle differenti tipologie di tessuto urbano a sinistra, e delle differenti tipologie edilizie a destra)

Dal primo grafico (Figura 2.8), in cui si è analizzata l'influenza della sola morfologia urbana sul consumo energetico, non tenendo conto del contributo generato dalle tecniche costruttive nelle diverse epoche storiche, si nota come l'efficienza delle tipologie urbane ad elevate densità costruttive risulta sicuramente maggiore. Dal secondo scenario (Figura 2.9), in cui si è tenuto invece conto dell'età degli edifici, i grafici denotano, come prevedibile, un generale peggioramento delle performance energetiche per le tipologie più antiche. I tessuti densi più recenti, come le Tower Block e Slab Housing, presentano in media migliori coefficienti di trasmissione termica, rendendo pertanto questi tessuti più efficienti rispetto allo scenario precedente. Si osserva comunque come la tipologia urbana con maggior densità risulti più efficiente rispetto a quella delle Detached Housing come nel caso descritto per il grafico precedente.

Lo studio di Fabbri et al. (2012) è centrato invece sulla città di Ferrara, caso di studio particolare, in quanto caratterizzata da un patrimonio di edifici storici estremamente ampio, che rappresenta, però, un punto critico quanto agli elevati consumi, ma anche alle difficoltà, tecniche ed economiche, per ridurli. Scopo del paper è quindi l'analisi e la stima di consumi e performance energetiche (con annessa rappresentazione cartografica mediante sw GIS) della città di Ferrara. Tale valutazione si basa sulle certificazioni energetiche già effettuate sugli edifici cittadini: circa il 5% degli edifici totali possiede un certificato energetico, e quindi è noto il consumo di energia primaria per riscaldamento (EPH). Reputando tale percentuale statisticamente significativa, sulla base di tali dati si eseguono alcune valutazioni, a seconda delle diverse zone e delle diverse funzioni. Si passa poi alla visualizzazione mediante GIS degli edifici classificati, vedi Figura 2.10. Come dati in input sono semplicemente necessari i valori di EPH proveniente dalle certificazioni energetiche già effettuate sugli edifici cittadini e dati su

periodo di realizzazione e funzione degli edifici da censimento ISTAT. Il principale svantaggio di questa procedura sta nell'attribuzione a tutto l'edificio della classe energetica dell'appartamento, per cui se un edificio comprende un appartamento certificato in classe C, tutto l'edificio risulterà così classificato, cosa che non sempre corrisponde alla realtà.

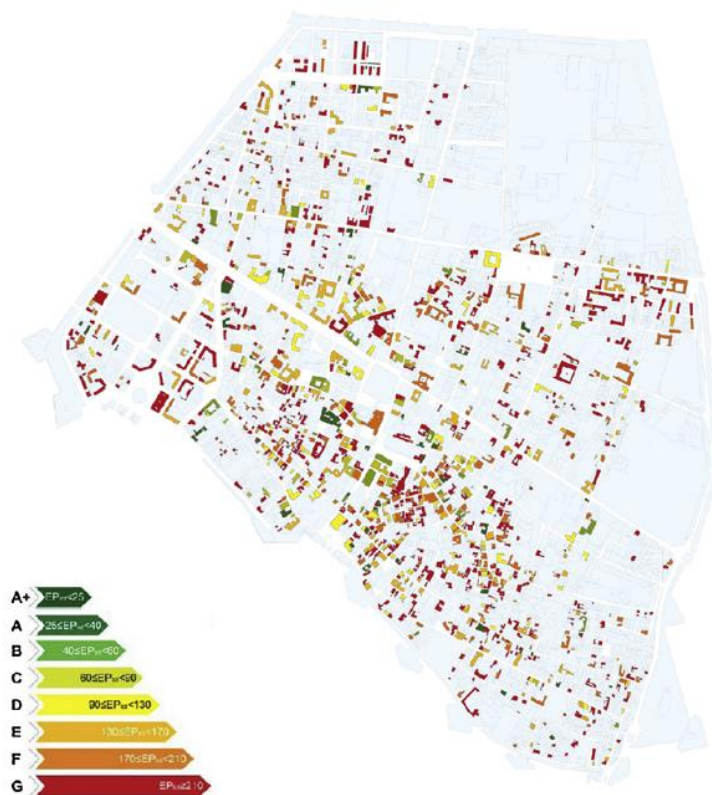


Figura 2.10 Proiezione delle classi energetiche per il centro storico della città di Ferrara (Fabbri, 2012)

Concludiamo con il lavoro di Caputo et al. (2013), che definisce una metodologia per stimare le prestazioni energetiche degli edifici (residenziali e commerciali), e per valutare/simulare i potenziali effetti di differenti strategie di risparmio energetico o relative all'implementazioni di sistemi di cogenerazione o a FER; vuole inoltre essere uno strumento applicabile, in presenza di database opportuni, a qualunque città o comune. La realizzazione di questo strumento passa attraverso le seguenti fasi:

- reperimento dei dati opportuni (vedi dati di input)
- caratterizzazione dello stock di edifici
- definizione degli archetipi (vedi Figura 2.11)
- e loro valutazione dei consumi energetici (mediante il software EnergyPlus, 2010)
- valutazione dei consumi energetici per tutta la città "estendendo" a tutto il territorio gli edifici archetipi.

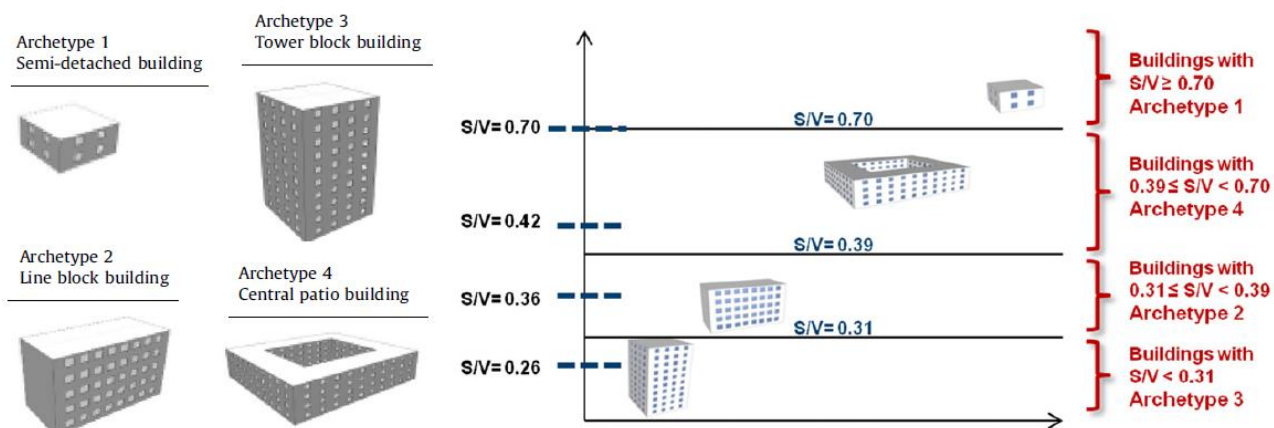


Figura 2.11 Tipologie degli archetipi e loro suddivisione in base al rapporto S/V da Caputo et al., 2013

I dati in input necessari alla stima sono i seguenti:

- Dati geometrici dell'edificio (mappa edifici da fotogrammetria)
- Dati tipologia edilizia e periodo costruzione edificio (da censimento ISTAT)
- Dati prestazioni energetiche aggiuntive edificio (CNR, 1982)
- Dati su sistemi ed impianti energetici edifici (norme UNI)

Il modello viene applicato alla città di Milano come caso di studio, e la validazione viene effettuata confrontando la stima dei consumi totali di Milano con il corrispondente valore del database SIRENA: risulta uno scostamento intorno al -4%, quindi certamente accettabile. In Figura 2.12 le mappe che localizzano i consumi per riscaldamento, raffrescamento (solo per commerciale), cooking, elettricità e ACS stimati. Viene infine fatta una simulazione dei consumi per riscaldamento che si avrebbero con una riduzione del valore U, valori per i differenti elementi che si avrebbero in caso di riqualificazione e/o restauro conforme alle normative vigenti, ottenendo una risparmio del 47%, evidenziando quindi le grandi potenzialità di risparmio energetico del settore.

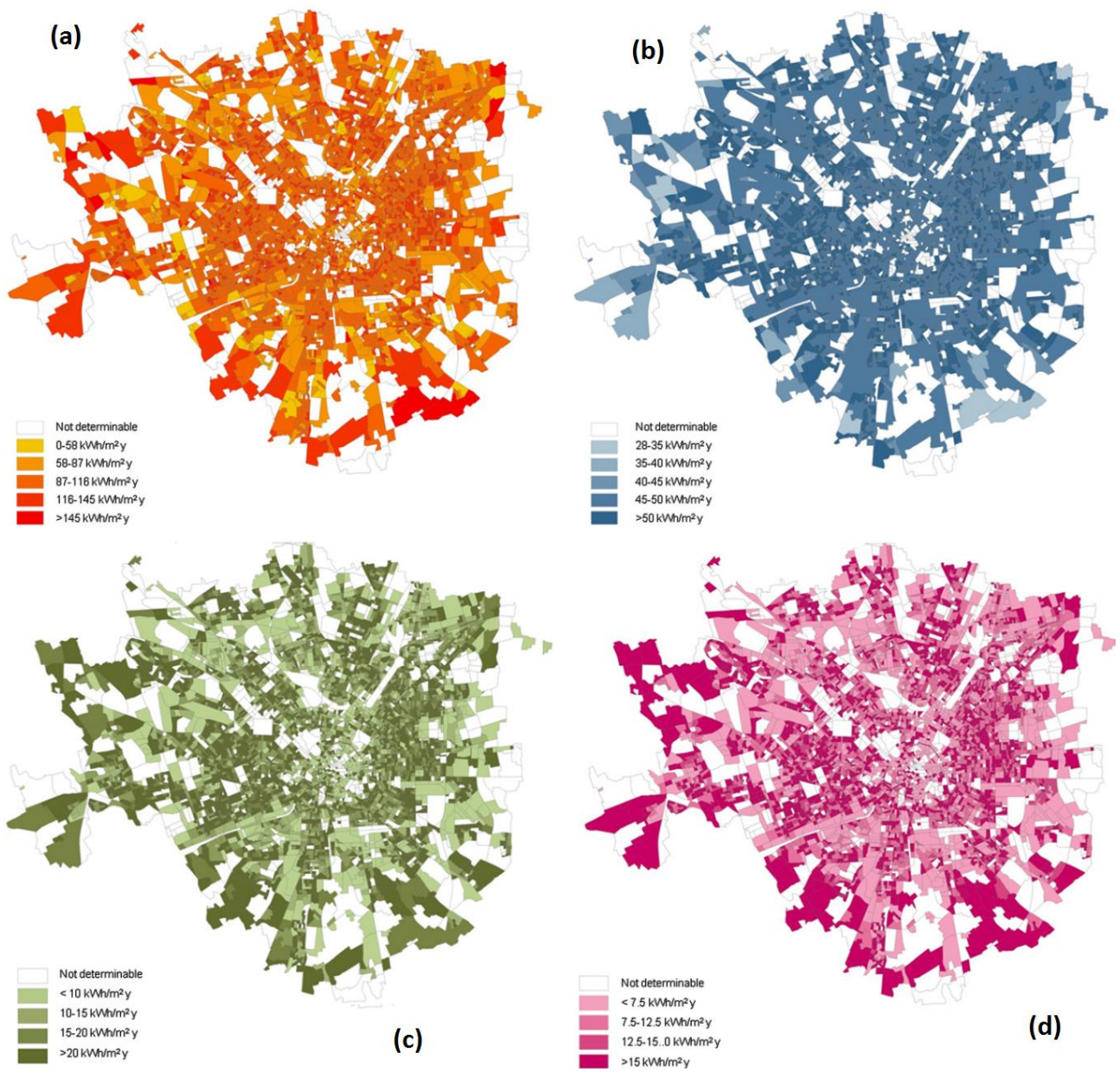


Figura 2.12 Mappe della stima dei consumi energetici per riscaldamento (a), elettricità (b), ACS (c) e cooking (d) per il comune di Milano (Caputo et al., 2013)

2.2 Introduzione alle *FERmaps*

Oltre alla definizione di un modello per la stima dei consumi degli edifici del settore residenziale, in questo lavoro ci si è occupati anche di come soddisfare tali consumi mediante fonti di energia rinnovabili locali. Per questo motivo, oltre a riferimenti riguardanti stime di consumi energetici, qui di seguito presentiamo altri riferimenti da letteratura scientifica riguardanti metodologie o modelli per la stima del potenziale di energia da fonti rinnovabili (sinteticamente riassunti sotto il nome di *FERmaps*).

Approccio top-down e bottom-up

Come per i paper riguardanti la stima dei consumi, presentiamo anche qui come prima cosa una sorta di approccio metodologico per la definizione del potenziale di energia da FER (*Fonti Energetiche Rinnovabili*). Per questo fine si farà riferimento ai lavori di Angelis-Dimakis et al. (2011) e Biberacher et al. (2009); all'interno del primo articolo viene presentata un'analisi riguardante le metodologie e gli strumenti disponibili per determinare il potenziale di energia e l'energia sfruttabile nei principali campi delle fonti di energia rinnovabili, mentre nel secondo si va a definire un approccio modellistico per l'ottimizzazione del soddisfacimento della domanda di energia per riscaldamento mediante FER all'interno di una regione di interesse. Tra le altre cose, appunto, tali articoli trattano diffusamente le metodologie di approccio alla stima del potenziale di energia da FER, facendo riferimento, come per i modelli di stima dei consumi, agli approcci *top-down* e *bottom-up*, che, vista la differente natura dei fenomeni da stimare, vengono intesi in maniera differente. Nel campo della stima del potenziale energetico da FER, infatti, l'approccio bottom-up risulta praticamente impossibile, in quanto per le rinnovabili è necessario partire da un livello più "alto" per poi ridurre il potenziale massimo in funzione di limiti tecnici, fisici, economici, ..., e quindi l'approccio più indicato risulta essere quello di tipo *top-down*.

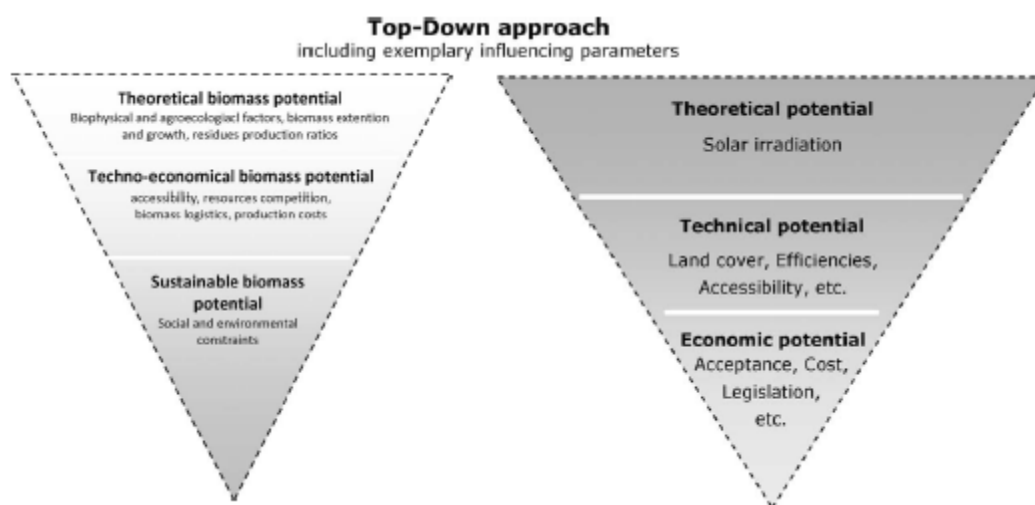


Figura 2.13 Classificazione del potenziale di energia da biomassa (a sinistra) e da energia solare (a destra) (Angelis-Dimakis et al. 2011)

Come approccio metodologico verso la stima del potenziale di energia da FER si tende quindi a partire dal potenziale massimo di energia, per poi ridurlo in funzione prima di tutto di limiti per esempio di tipo tecnico (e.g. efficienza, accessibilità) ed in seguito per limiti economici o ambientali. Anche qui la procedura non è rigorosa, ed infatti all'interno del paper di Angelis-Dimakis et al. (2011) per quanto riguarda la biomassa il potenziale teorico viene ridotto prima secondo criteri tecnico-economici ed in seguito per criteri di sostenibilità, mentre per l'energia solare si passa dal potenziale teorico al potenziale tecnico e solo in seguito quello economico. Lo schema non è quindi fisso, ma varia con la tecnologia impiantistica e del contesto.

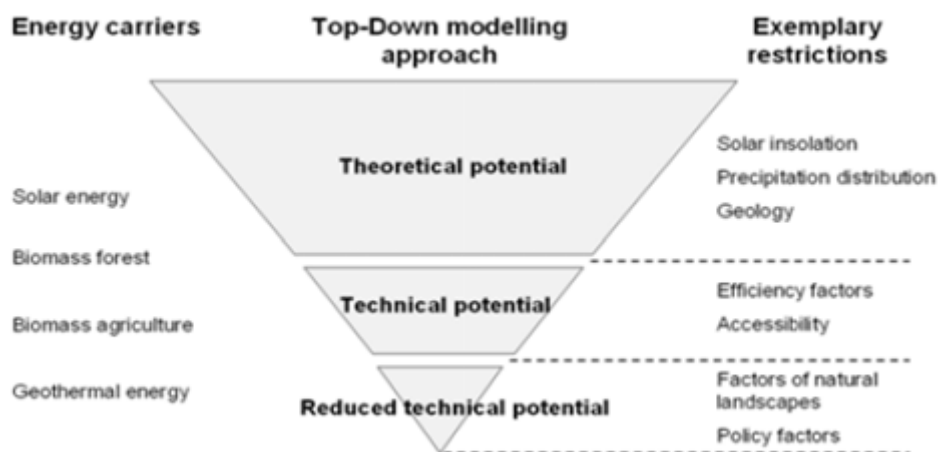


Figura 2.14 Classificazione del potenziale di energia solare secondo l'approccio top-down (Biberacher et al., 2009)

Lavori di riferimento

In questo paragrafo vengono riportati i lavori a mio avviso più importanti studiati in quanto base bibliografica di questo lavoro di tesi per la parte riguardante la stima del potenziale di energia da fonti rinnovabili.

Il primo lavoro citato riguarda la definizione e l'applicazione di un metodo per stimare la potenziale disponibilità di energia da FER e la domanda di energia degli edifici su scala locale, valutando la congruenza spaziale tra "domanda e offerta" (Vettorato et al., 2011). Per ogni FER sono state realizzate delle mappe di "disponibilità", che vengono poi fatte confluire in un'unica mappa, a seconda delle potenzialità delle singole fonti; tale mappa viene confrontata con quella della domanda di energia degli edifici, con lo scopo di definire una classificazione del territorio comunale (pixel per pixel) a seconda di domanda di energia degli edifici e disponibilità di energia da FER. Il modello è stato applicato al comune di Roncegno Terme (comune di 2700 abitanti della Valsugana), in provincia di Trento. Le fonti considerate sono: energia solare (termico e fotovoltaico), energia geotermica (pompe di calore a sonde verticali), biomassa legnosa e micro-idroelettrico da sistemi di approvvigionamento esistenti. I dati in input necessari sono diversi a seconda della fonte:

Energia solare:

- Digital Surface Model (DSM) con 1-m di risoluzione orizzontale dal LiDAR
- Mappa 1 : 5000 degli edifici esistenti
- 10-m Digital Elevation Model (DEM)

Energia geotermica:

- Indagine degli strati geologici sotterranei fino a 200 m di profondità
- Mappa della distribuzione delle risorse idriche

Energia da Biomassa:

- Produzione netta di biomassa per il comune da Forest Inventory, 2007

Si ottiene così in output il livello di disponibilità di energia da FER rispetto alla domanda di energia degli edifici per ogni pixel del comune; nella seguente figura viene riportata la mappa finale, in cui per ogni pixel del territorio comunale (quello coincidente con l'abitato, e cioè i pixel in cui si hanno consumi) vengono definiti simultaneamente il livello di domanda e quello del relativo soddisfacimento (vedi Figura 2.15).

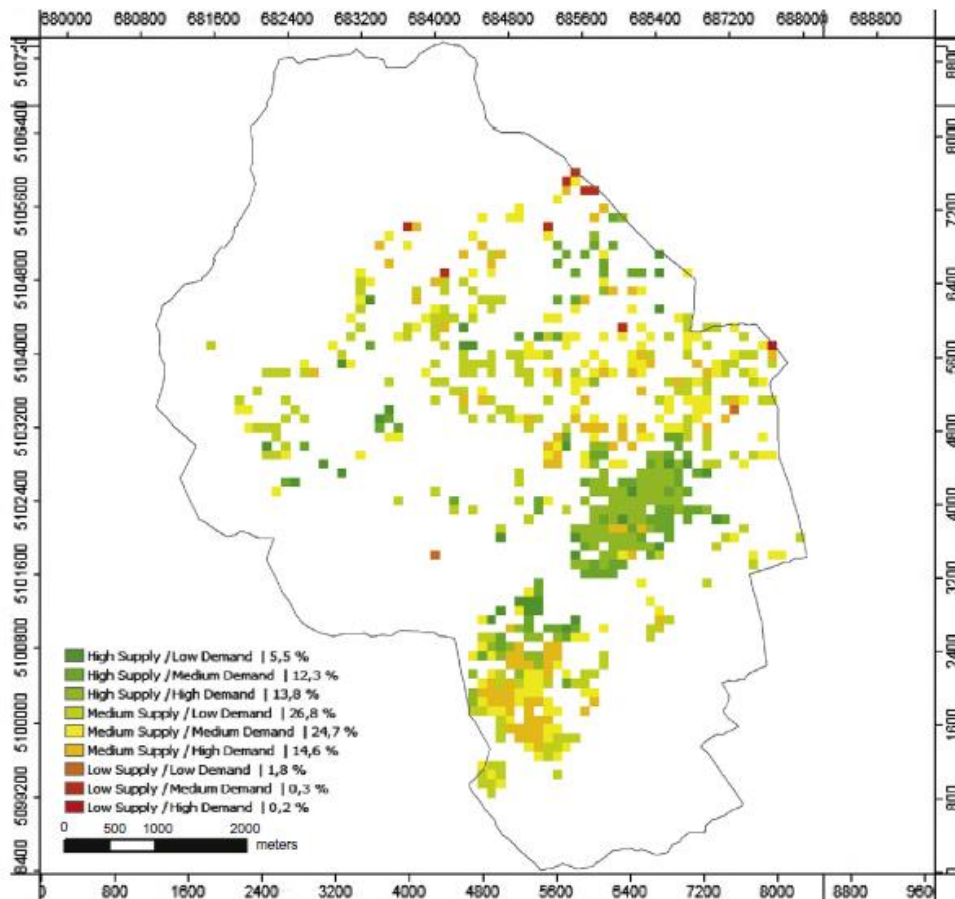


Figura 2.15 Mappa di confronto tra supply da FER e domanda di energia (Vettorato et al., 2011)

Il modello di Mourmouris e Potolias (2013) è applicato, invece, all'isola di Thassos, in Grecia. Il rispettivo paper ha come obiettivo l'analisi e lo sviluppo di un modello di decision-making multi-criteria (REGIME), per la pianificazione energetica e lo sfruttamento di FER a scala regionale. Fine ultimo è la definizione del mix ottimale di energia dalle diverse fonti rinnovabili. Il primo passo è la definizione dello scenario energetico attuale (domanda e offerta, suddivisa per fonti), quindi la stima dell'energia producibile da FER, ed infine mediante il modello di decisione viene definito il miglior mix energetico. Per quanto riguarda invece il modello decisionale, gli step sono i seguenti:

1. Formulazione di un set di criteri per definire le zone in cui non conviene sviluppare FER e quelle in cui invece conviene;
2. Formulazione di un set di criteri basato su esperienze precedenti in modo da minimizzare il numero di criteri ed evitare sovrapposizioni;
3. Raggruppamento di tali criteri a seconda delle caratteristiche dall'area in questione;
4. Definizione dei pesi da dare ad ogni singolo criterio all'interno di tali raggruppamenti (economici, ambientali, sociali e tecnologici).

In output si ottiene, così, la migliore fonte di energia o mix di fonti da cui rifornirsi, secondo i criteri definiti nel modello decisionale; nel caso di Thassos, i risultati sono presentati nella figura seguente, dove si nota che la combinazione migliore (cioè quella che ha ottenuto il maggior punteggio) è quella che prevede il mix tra energia dal vento ed energia da biomassa (vedi Figura 2.16).

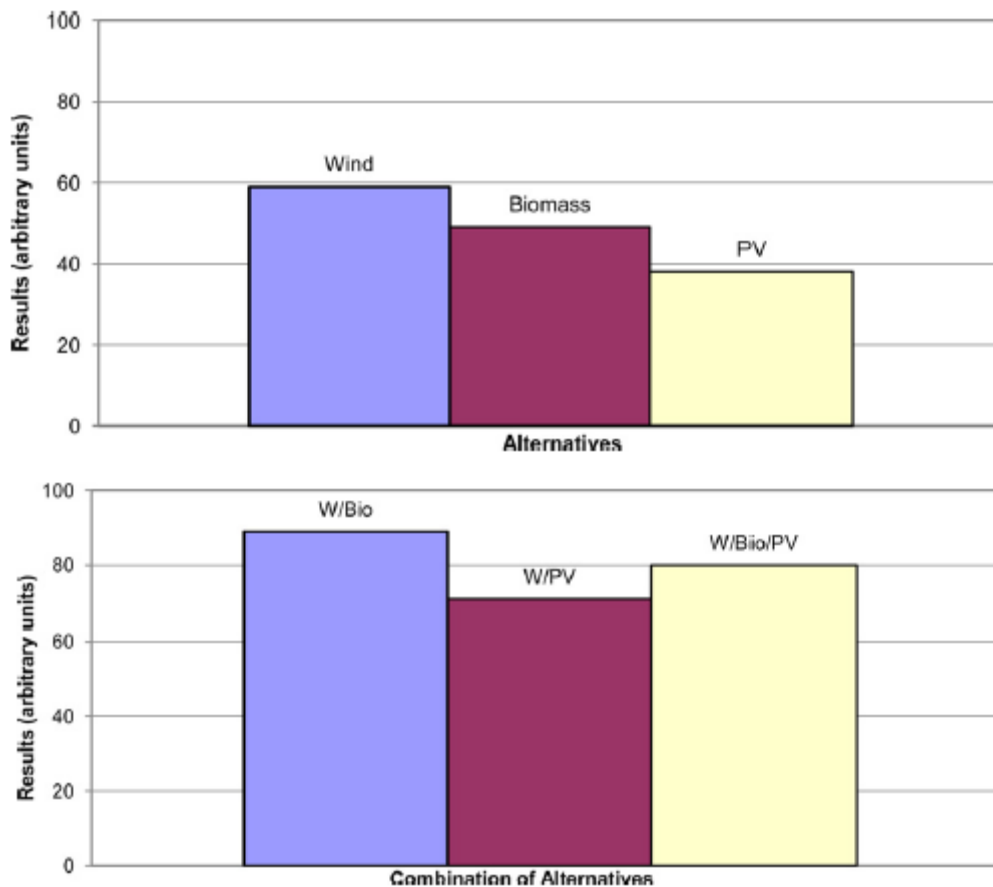


Figura 2.16 Risultato del modello per l'isola di Thassos nel caso di alternative singole (in alto) o nel caso di un mix tra più alternative (in basso) (Mourmouris e Potolias, 2013)

Nei due seguenti lavori, invece, si valuta il potenziale di un'unica fonte, anziché il potenziale da più FER differenti. Il primo, a cura di Fiorese e Guariso (2010), valuta il potenziale di energia da sola biomassa da colture dedicate: viene proposto un metodo per massimizzare la produzione di energia da colture dedicate di biomassa arborea (pioppo, salice e robinia) ed erbacea (sorgo), tenendo conto delle caratteristiche locali (geomorfologiche, climatiche, naturalistiche e dell'attuale uso del suolo), ed ipotizzando di sfruttare le aree agricole marginali e non sfruttate. Fine ultimo è la definizione del potenziale di mitigazione dei cambiamenti climatici che la produzione di energia (elettrica e termica) da impianti a cogenerazione di biomasse (erbacee e legnose) può comportare. la procedura si struttura in 4 step (vedi anche Figura 2.17):

1. selezione delle specie, tra quelle più promettenti da un punto di vista energetico
2. definizione delle superfici agronomicamente adatte, basandosi su alcuni criteri (morfologici, pedologici, climatici, ...)
3. definizione delle superfici disponibili tra quelle adatte: questa scelta implica decisioni anche di tipo politico-strategico, quindi si è deciso, per minimizzare il conflitto con le colture alimentari, di dedicare aree agricole abbandonate, marginale o a riposo
4. localizzazione ottima degli impianti, risolta mediante un problema di ottimizzazione, basato sulla massimizzazione della produzione di energia

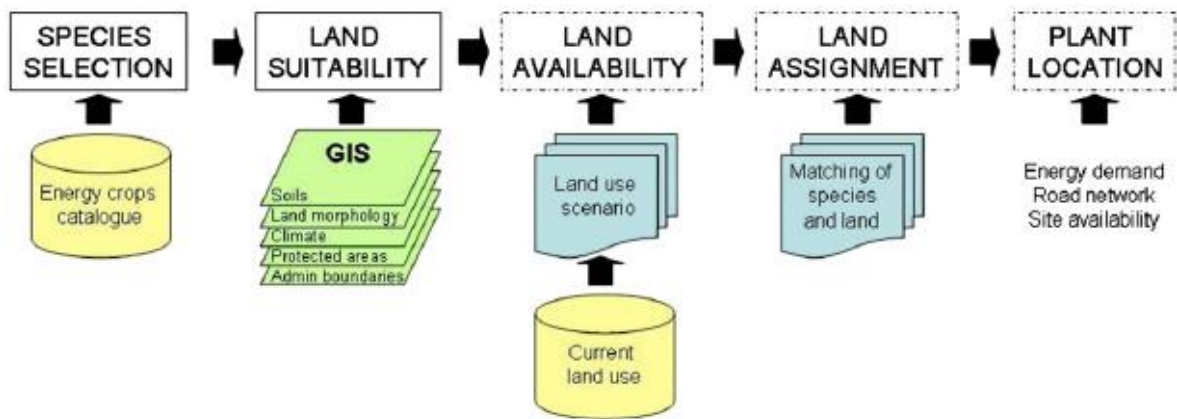


Figura 2.17 Steps della metodologia proposta con i relativi databases necessari (Fiorese e Guariso, 2010)

Il modello prevede come scala di riferimento l'intera regione, e fornisce in output la localizzazione ottimale degli impianti (CHP) e la quantificazione della superficie da destinare a energy-crops. Il caso di studio scelto è la regione Emilia Romagna.

Il secondo, a cura di Fiorese et al. (2008), riguarda, invece, l'ottimizzazione della localizzazione di impianti a biogas su scala provinciale: viene definito un metodo per la valutazione della convenienza della realizzazione di impianti di digestione anaerobica della biomassa per un dato territorio, da un punto di vista economico, energetico ed emissivo. Si definisce, cioè, un modello matematico di ottimizzazione, in modo tale da definire il numero, la capacità, la localizzazione ed il bacino di approvvigionamento degli impianti ottimali per la provincia di Cremona (Lombardia). Risulta quindi essere uno strumento utile per la pianificazione a livello comunale/provinciale, per cui i comuni possono essere in grado di incentivare/incoraggiare la realizzazione (da localizzazione ottima) di impianti a biogas senza la necessità di decisioni *centralizzate*. Viene quindi realizzato un modello di ottimizzazione per definire la possibilità per ogni comune di realizzare impianti di digestione anaerobica. L'area di studio viene suddivisa in N parcelle, ognuna con il dato sulla rispettiva quantità di biomassa concentrata al suo interno. Le variabili di decisione sono le frazioni di biomassa della parcella i convogliate all'impianto j , da cui deriva la potenza del dato impianto di cogenerazione. La funzione obiettivo rappresenta la massimizzazione del ritorno economico dalla produzione di energia, calcolato come il ricavo dalla vendita dell'energia a cui vengono sottratti i costi di manutenzione dell'impianto e quelli di coltivazione e trasporto della biomassa. Si hanno infine due vincoli: il primo impone che tutta la biomassa per ogni parcella i venga convogliata ad un impianto di digestione, mentre il secondo impone che la capacità nominale di ogni impianto j sia limitata ad un valore massimo (oltre che ad un valore minimo, per non avere impianti troppo piccoli). Per ogni soluzione del problema di ottimizzazione vengono infine definiti due indicatori, uno energetico ed uno ambientale. Di seguito il risultato dell'applicazione del modello di ottimizzazione alla provincia di Cremona (vedi Figura 2.18).

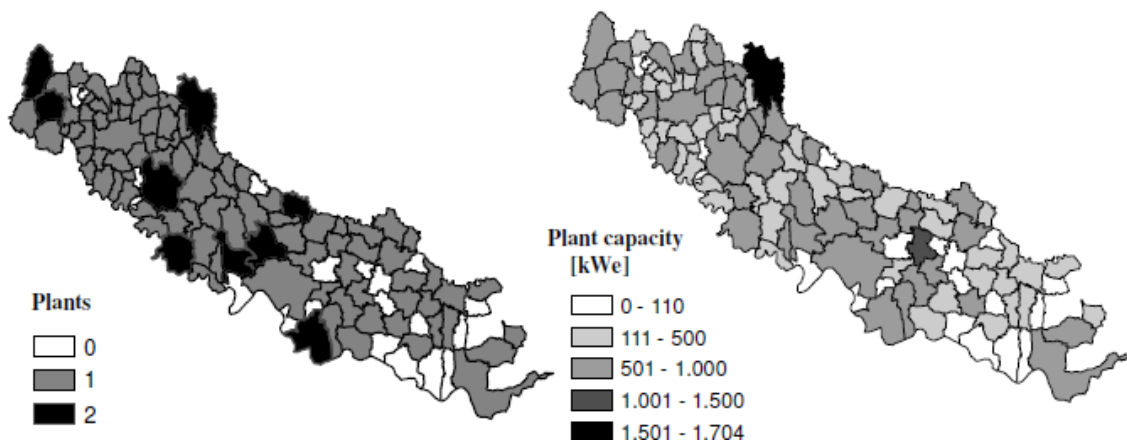


Figura 2.18 Risultato dell'applicazione del modello di Fiorese et al. (2008) alla provincia di Cremona

Presentiamo, infine, il lavoro di Asinari e Bergamasco (2010), i quali si occupano di stimare il potenziale di energia elettrica da solare fotovoltaico per ogni comune della regione Piemonte, andando a stimare la superficie dei tetti di edifici residenziali ed industriali disponibile per l'installazione dei pannelli. Viene quindi proposta una metodologia per il calcolo della superficie di tetti disponibile, a partire dalla superficie a terra del singolo edificio (presa da dati GIS), la quale viene moltiplicata per una serie di coefficienti a seconda della tipologia dell'edificio stesso (residenziale o industriale), che trasformano tale superficie a terra in superficie di tetto da dedicare ai pannelli. Da tale superficie si passa quindi alla stima dell'energia che è possibile ricavarvi, inserendo in input i dati di irraggiamento del database del Joint Research Center (*PVGis*). Nella seguente tabella vengono riportati i coefficienti per la stima della superficie di tetti disponibile, utilizzati poi all'interno del nostra stima nel capitolo relativo al caso di studio.

Tabella 2.2 Valori dei coefficienti utilizzati da Asinari e Bergamasco per la stima della superficie di tetti disponibile

Termine	Ed Residenziali	Ed Industriali	Motivazione coefficiente
C_{AZ}	0,90	0,90	orientamento diverso dall'ottimale
C_{RT}	0,50	0,75	tipologia di tetto
C_F	0,70	0,90	altre strutture presenti sul tetto
C_{ST}	0,90	1,00	presenza di collettori solari termici
θ	20°	30°	Angolo di inclinazione del tetto
$\frac{1}{\cos \theta}$	1,06	1,15	proiezione della superficie in pianta proiettata su un piano inclinato di $(\theta)^\circ$ sul terreno
S_{edif}	Superficie dell'edificio in pianta		
$\frac{S_{edif}}{\cos \theta}$	Superficie del tetto		
$S_{tetto disp}$	$S_{tetto disp} = C_{AZ} * C_{RT} * C_F * C_{ST} * \frac{S_{edif}}{\cos \theta}$		Superficie disponibile per l'installazione di pannelli

Nelle tabelle seguenti si sono riassunti gli studi analizzati, cercando di far emergere i principali punti di forza e di debolezza per ognuno di essi (vedi Tabella 2.3 e Tabella 2.4).

Tabella 2.3 Tabella riassuntiva degli studi riguardanti stime di consumi energetici considerate come riferimento

<i>Autori</i>	<i>Classificazione</i>	<i>Caso di studio</i>	<i>Punti di forza</i>	<i>Punti di debolezza</i>
Modi et al. (2012)	Bottom-up statistico	New York City (USA)	<ul style="list-style-type: none"> • Considera tutte le principali tipologie di consumi • Considera tutte le funzioni (residenziale, commerciale, ...) • Si basa su consumi medi al mq derivanti da campagne di misura 	<ul style="list-style-type: none"> • Non considera la dipendenza tra consumi ed età e tipologie degli edifici • Non considera scenari di efficientamento edilizio, quindi valuta solo lo stato di fatto
Reiter e Marique (2012)	Bottom-up ingegneristico	Liegi (Belgium)	<ul style="list-style-type: none"> • Considera anche i trasporti oltre al settore residenziale • Considera anche eventuali riqualificazioni degli edifici • Valuta i consumi anche in 6 scenari di rinnovamento/riqualificazione 	<ul style="list-style-type: none"> • Considera solo edifici residenziali
Jones et al. (2001)	Bottom-up ingegneristico	Cardiff (UK)	<ul style="list-style-type: none"> • Elevato grado di dettaglio dei vari cluster • Implementazione di sub-model aggiuntivi per la stima di altri fenomeni (traffico, consumo di energia non-domestico, ...) • Vengono formulate e valutate anche proposte di riduzione dei consumi 	<ul style="list-style-type: none"> • Il modello di base considera solo edifici residenziali
Yamaguchi et al (2007)	Bottom-up statistico	Osaka (Japan)	<ul style="list-style-type: none"> • Considera anche scenari di riduzione dei consumi 	<ul style="list-style-type: none"> • Stima del solo settore dei servizi (inteso come complessivo di uffici, hotel, ospedali e negozi)
Dall'O' (2012)	Bottom-up statistico + ingegneristico	Carugate (MI)	<ul style="list-style-type: none"> • Modello di stima semplice ed economico, adatto alla PA 	<ul style="list-style-type: none"> • Considera solamente consumi per riscaldamento (EPh) • Considera solo edifici di tipo residenziale
Troglio et al. (2011)	Bottom-up ingegneristico	Gorgonzola (MI)	<ul style="list-style-type: none"> • Non considera solamente edifici residenziali 	<ul style="list-style-type: none"> • Considera solamente consumi per riscaldamento
Doni e Keim (2010)	Bottom-up ingegneristico	Milano	<ul style="list-style-type: none"> • Analisi più specifica per tipologie di tessuti urbani • Considera anche l'irraggiamento solare degli edifici • Stima e analizza anche scenari di efficientamento dell'involucro edilizio 	<ul style="list-style-type: none"> • Considera solamente consumi per riscaldamento • Considera solamente edifici residenziali
Fabbri et al. (2012)	Bottom-up statistico	Ferrara	<ul style="list-style-type: none"> • Analisi centrata sui consumi del patrimonio di edifici storici 	<ul style="list-style-type: none"> • Considera solamente consumi per riscaldamento (EPh) • Considera solamente edifici residenziali • Attribuzione della stessa classe energetica all'intero edificio anziché al singolo appartamento • Non viene fatta una vera e propria stima, ma ci si basa sui consumi di edifici già classificati dal punto di vista energetico
Caputo et al. (2013)	Bottom-up ingegneristico	Milano	<ul style="list-style-type: none"> • Considera sia edifici residenziali che commerciali, anche come percentuali di uno stesso edificio • Considera tutte le principali tipologie di consumi 	<ul style="list-style-type: none"> • Non considera edifici che non siano residenziali o commerciali

Tabella 2.4 Tabella riassuntiva degli studi riguardanti stime del potenziale di energia da FER considerate come riferimento

<i>Autori</i>	<i>Classificazione</i>	<i>Caso di studio</i>	<i>Punti di forza</i>	<i>Punti di debolezza</i>
Vettorato et al. (2011)	Top-down	Comune di Roncegno Terme (Trento)	<ul style="list-style-type: none"> • Analisi della congruenza spaziale tra domanda di energia e energia fornita da FER per ogni <i>pixel</i> • Più FER considerate 	<ul style="list-style-type: none"> • Grande quantità di database necessari
Mourmouris e Potolias (2013)	Top-down	Isola di Thassos (Grecia)	<ul style="list-style-type: none"> • Valuta il mix di FER ottimale mediante multi-criteria • Più FER considerate 	<ul style="list-style-type: none"> • Criteri e rispettivi pesi definiti empiricamente sulla base dell'esperienza • Procedimento piuttosto complesso
Fiorese e Guariso (2010)	Top-down	Regione Emilia-Romagna	<ul style="list-style-type: none"> • Localizzazione degli impianti a cogenerazione sul territorio regionale definita mediante un problema di ottimizzazione 	<ul style="list-style-type: none"> • Lavoro concentrato su un'unica FER (biomassa per impianti a cogenerazione) • Grande quantità di database necessari
Fiorese et al. (2008)	Top-down	Provincia di Cremona (a scala comunale)	<ul style="list-style-type: none"> • Localizzazione degli impianti a biogas sul territorio provinciale definita mediante un problema di ottimizzazione 	<ul style="list-style-type: none"> • Lavoro concentrato su un'unica FER (biomassa per digestione anaerobica)
Asinari e Bergamasco (2010)	Top-down	Regione Piemonte (a scala comunale)	<ul style="list-style-type: none"> • Procedura di stima semplice e veloce ma efficace 	<ul style="list-style-type: none"> • Lavoro concentrato su un'unica FER (solare fotovoltaico) • Non considera eventuali impianti già presenti

In conclusione a questo capitolo è possibile dire che sono sicuramente molteplici i lavori riguardanti sia la stima dei consumi energetici a varie scale che la stima di energia da FER.

In particolare possiamo riassumere sinteticamente quanto di più importante è emerso nei seguenti punti:

- necessità di numerosi database, non sempre disponibili
- grande variabilità quanto a disponibilità di dati di partenza (e quindi nel grado di precisione conseguibile) di paese in paese
- molti modelli sono fortemente site-dependent, cioè realizzati appositamente per il caso di studio e replicabili solo dopo consistenti modifiche
- modelli di stima del potenziale di energia da FER focalizzati maggiormente su larga scala (provinciale e regionale), e quindi una maggiore carenza a scala, per esempio, comunale
- stime in output potenzialmente molto utili alle amministrazioni locali

3 IL MODELLO

Quello realizzato in questo lavoro di tesi è un modello di stima della domanda energetica applicabile ad una data area di studio, e di valutazione del potenziale di energia rinnovabile dell'area stessa. In questo capitolo viene presentato il modello, e cioè tutte quelle procedure metodologiche e di calcolo su cui si basa la stima oggetto di questo lavoro di tesi. Si parlerà come prima cosa della parte riguardante la stima della domanda di energia, prima termica e poi elettrica, degli edifici residenziali, per poi passare alla parte relativa alla stima del potenziale di energia da FER, in cui vengono presentate le tipologie impiantistiche considerate e le relative procedure di calcolo.

3.1 Introduzione

Obiettivo del presente modello è la stima delle performance energetiche dello stock di edifici residenziali di un dato caso di studio, che sia in grado integrare e supportare politiche energetiche alla scala urbana. Grazie all'implementazione della metodologia in ambiente GIS (Geographic Information System) è possibile la georeferenziazione dei consumi stessi, avendo a disposizione poi un'ampia gamma database di integrazione oltre ad informazioni di base di tipo geometrico e morfologico del territorio e degli edifici in questione. Inoltre, in presenza di dati di partenza sufficienti, è possibile replicare il modello di stima per qualsiasi comune o città.

3.1.1 Struttura del modello

Il modello si struttura in tre fasi distinte (vedi anche Figura 3.1):

- in una prima fase vengono definiti, sulla base di stime e valutazioni presentate in seguito, i consumi energetici attuali del parco di edifici dell'area in questione
- una seconda fase in cui vengono definiti gli stessi consumi del punto precedente, ma in scenari in cui si ipotizza vengano implementate una serie di misure volte a ridurre il fabbisogno di energia
- nell'ultima fase, si cerca di definire la quota di tale fabbisogno che si è in grado di soddisfare mediante energia prodotta da fonti energetiche rinnovabili reperite localmente

In realtà, le ultime due fasi possono confluire in un unico step, per cui si ipotizza di ridurre la domanda di energia *attuale* stimata, soddisfatta solitamente da energia prodotta da fonti fossili ed "*importata*" dall'esterno dell'area di studio, attraverso, da un lato, la riduzione del fabbisogno stesso, incrementando cioè l'efficienza dell'involucro edilizio e dell'impiantistica, e dall'altro riducendo l'energia da "*importare*" producendola in loco da fonti rinnovabili.

È quest'ultimo, come si vedrà in seguito, il filo logico seguito per la stima dei consumi *futuri* per quanto riguarda l'energia termica degli edifici, in quanto si è fatto riferimento ad un database che considera in un unico passaggio sia l'efficientamento impiantistico che la produzione di energia da rinnovabili locali.

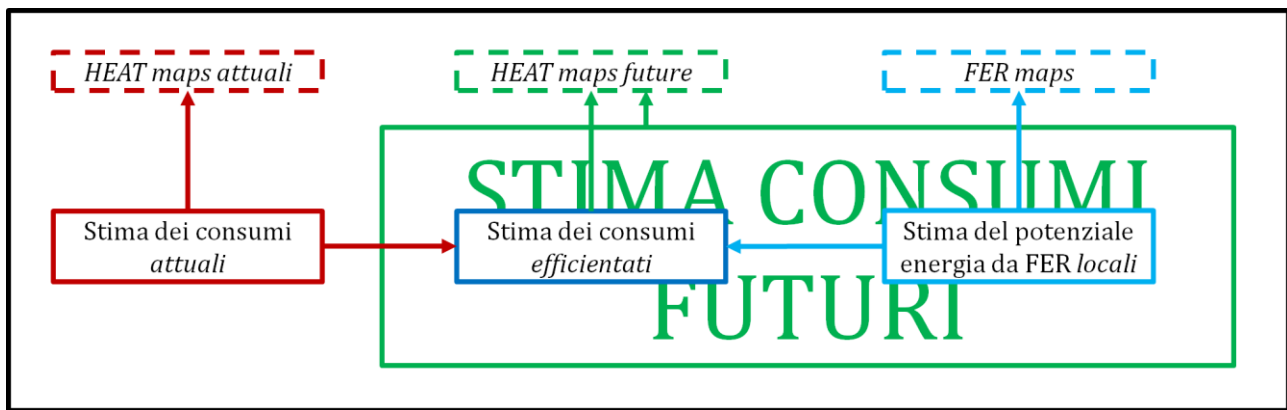


Figura 3.1 Schema concettuale della struttura del modello

Questo lavoro si presenta quindi non semplicemente come un modello di stima dei consumi energetici allo stato attuale, bensì vuole valutare le possibilità e i benefici, in termini di energia risparmiata, di un duplice passaggio: prima una riduzione complessiva dei consumi, e successivamente il soddisfacimento degli stessi mediante fonti di energia rinnovabili.

È bene, infine, precisare come questo modello vada “ad agire” su uno stato attuale che si presume non siano già state apportate misure importanti dal punto di vista della riqualificazione energetica degli edifici, né sul quale siano già state implementate tipologie impiantistiche volte alla produzione di energia da fonti energetiche rinnovabili, ponendosi quindi come strumento di valutazione da uno stato attuale maggiormente svantaggioso ad uno futuro in cui viene sfruttato tutto il potenziale massimo di riduzione della domanda energetica.

3.1.2 Definizione degli edifici considerati

La stima oggetto di questo lavoro di tesi si concentra esclusivamente sugli edifici del settore residenziale, in quanto, come detto nel capitolo introduttivo, essi costituiscono una quota estremamente importante all'interno dei consumi totali, ed infine sono più facilmente generalizzabili, in quanto maggiormente omogenei. Originariamente si era presa in considerazione l'ipotesi di inglobare nella stima non solo edifici di tipo residenziale, ma ci si è purtroppo scontrati con una generale mancanza di dati sufficientemente rappresentativi delle diverse categorie da cui partire, in quanto per i consumi residenziali la varietà di dati a disposizione e il livello di dettaglio sono risultati essere sicuramente maggiori rispetto ad edifici di tipo commerciale o industriale, caratterizzati da consumi molto diversi, viste anche le attività che li caratterizzano, che possono essere le più disparate, rendendo estremamente ardua e difficoltosa la definizione di valori univoci e rappresentativi delle intere categorie. Per questo verranno qui considerati edifici ad uso solamente residenziale, lasciando a possibili sviluppi futuri del modello un upgrade verso altre tipologie di destinazioni d'uso.

3.1.3 Definizione dei consumi considerati

Tra le varie tipologie di consumi che caratterizzano gli edifici residenziali, si sono considerati i consumi elettrici, intesi come consumi per illuminazione, elettrodomestici e climatizzazione estiva, i consumi di energia termica per riscaldamento ed infine i consumi di energia termica per acqua calda sanitaria. Si è deciso, perciò, di considerare quei consumi che costituiscono la quota maggiormente importante dei consumi energetici complessivi, trascurando i consumi relativi ad usi culinari ed inglobando i consumi per la climatizzazione estiva all'interno di quelli elettrici.

3.2 Definizione del modello di stima dei consumi

In questo capitolo verranno presentate le diverse parti del modello sopra elencate, in modo da offrirne separatamente una panoramica completa ed esaustiva.

Il punto di partenza di tutto il modello sta proprio nella stima dei consumi attuali, dalla quale parte appunto tutta la successiva analisi di efficientamento e di risparmio energetico. Di seguito la metodologia seguita per effettuare la stima dei consumi presi in considerazione, suddivisa nel modo seguente: verrà prima definita la metodologia per la stima dei consumi di energia termica (per riscaldamento ed acqua calda sanitaria), quindi dei consumi di energia elettrica per gli edifici.

3.2.1 Stima dei consumi attuali di energia termica

Per quanto riguarda i consumi di energia termica per soddisfare i fabbisogni di riscaldamento degli ambienti ed acqua calda sanitaria, dopo una approfondita analisi della letteratura del settore, si è deciso di fare riferimento al lavoro TABULA (Typology Approach for BUiLding stock energy Assessment), un progetto del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, facente capo al programma europeo *Intelligent Energy Europe* (Tabula, 2011), che mira a creare una struttura armonizzata delle tipologie edilizie europee, con un'attenzione particolare proprio verso gli edifici residenziali. Si sono, quindi, definiti degli edifici tipo (4 tipologie: *Casa monofamiliare*, *Casa a schiera*, *Edifici Multifamiliari* e *Blocco di appartamenti*) utilizzando come discriminante il rapporto di forma (S/V) e il numero di piani, ed in base all'età dell'edificio, si sono definiti 28 *cluster* di edifici (dati dalle 4 tipologie per le 7 classi d'età), ed ad ognuna di esse sono stati assegnati i rispettivi consumi di energia primaria per riscaldamento degli ambienti ed acqua calda sanitaria. Seguendo la classificazione definita nel capitolo 2, TABULA segue un approccio di tipo *bottom-up ingegneristico*. Di seguito il procedimento che ci ha portato alla definizione di questo tipo di consumi, incrociando i dati di tabula con i dati degli edifici a nostra disposizione.

Per maggiori informazioni su TABULA si rimanda all'apposita sezione in appendice.

Per quanto riguarda gli edifici, i dati in input necessari alla definizione dei consumi all'interno del modello sono di due tipi: dati provenienti dal *Censimento ISTAT*, che forniscano le informazioni necessarie sull'età degli edifici, e dati provenienti dal *database topografico regionale*, contenenti, tra le altre, informazioni su destinazione d'uso (residenziale, commerciale, ...) e dati geometrici (altezza, superficie, ...) degli edifici. Incrociando questi due database, si è stati in grado di definire per ogni edificio residenziale del caso di studio la rispettiva classe d'età, il rapporto S/V ed il numero di piani, questi ultimi mediante elaborazioni attraverso software GIS.

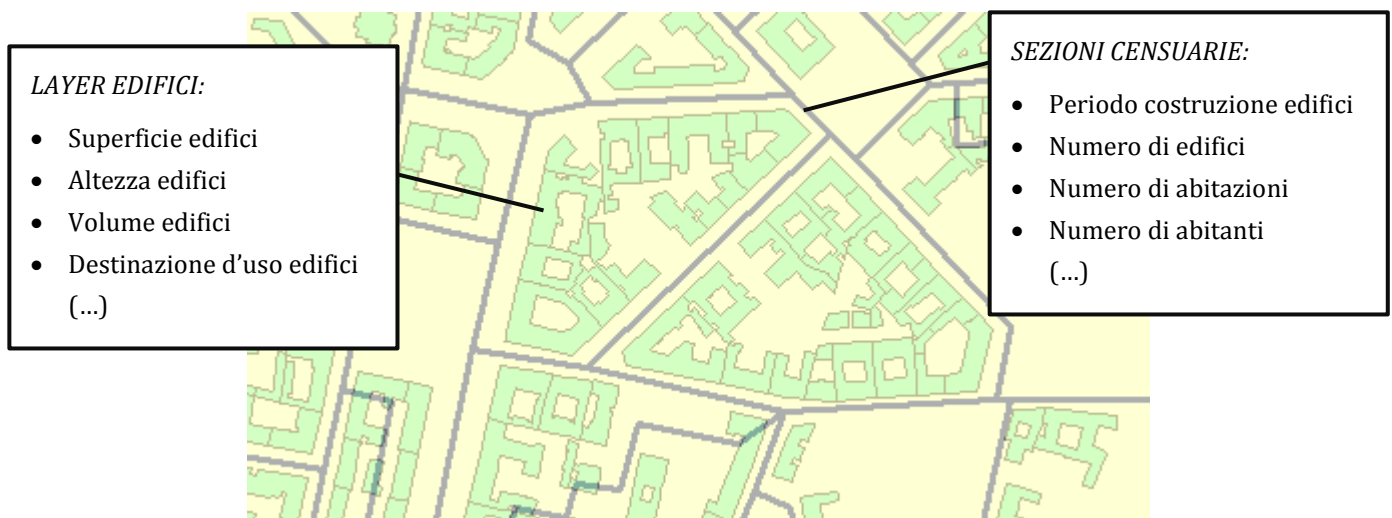


Figura 3.2 Schermata da sw GIS dei layer di edifici (dal DBT) e delle sezioni censuarie (da ISTAT) con le principali informazioni utilizzate

		CLASSE DI DIMENSIONE EDILIZIA			
Area climatica media		CASE MONOFAMILIARI	CASE A SCHIERA	EDIFICI MULTIFAMILIARI	BLOCCHI DI APPARTAMENTI
CLASSE DI EPOCA DI COSTRUZIONE	1 Fino al 1900				
	2 1901-1920				
	3 1921-1945				
	4 1946-1960				
	5 1961-1975				
	6 1976-1990				
	7 1991-2005				
	8 Dopo il 2005				

Figura 3.3 "Matrice della tipologia edilizia" con l'illustrazione degli edifici tipo (TABULA, 2011)

Definizione dei cluster di edifici

Definizione dei database in input

Database topografico

Un Database Topografico (di seguito DBT) è definibile brevemente come una base informativa territoriale che mira a semplificare la complessità del mondo reale, composta da una parte grafica ed una alfanumerica, costituita da elementi autoconsistenti, interrogabili in ogni loro elemento, georeferenziati, multiscala, aggiornati e sempre aggiornabili; in altre parole è una struttura di dati spaziali, costituita da un insieme di oggetti, ciascuno dei quali è caratterizzato da tre elementi fondamentali (vedi Figura 3.4), ovvero:

- Codice identificativo univoco
- Geometria 2D/3D (punto, polilinea ed area) appositamente georeferenziata nel sistema di riferimento cartografico WGS84
- Attributi alfanumerici (tabelle di dati)

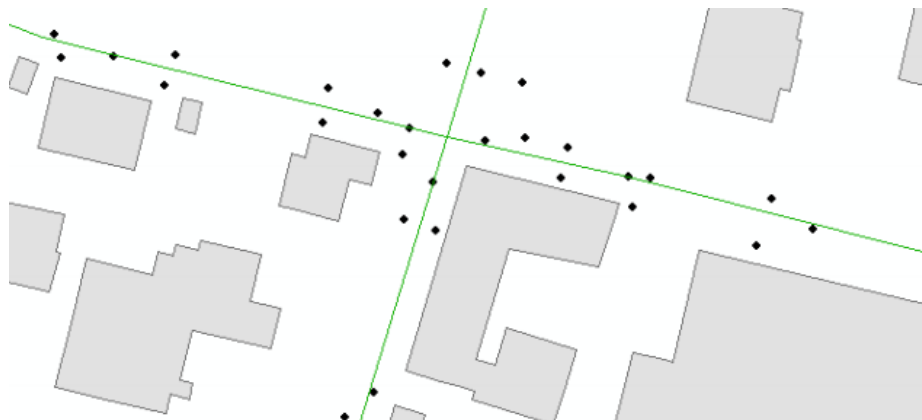


Figura 3.4 Elementi costituenti di un DBT: punti, linee e poligoni

Tra i molteplici strati informativi che compongono il DBT, ai nostri fini si sono utilizzati quelli riferiti agli edifici (Strato 02: Immobili e antropizzazioni – Tema 01: Edificato), ed in particolare si sono sfruttati i seguenti elementi:

- **A020101** – *Unità volumetriche*, rappresentano la porzione elementare di un edificio avente pianta e quota omogenei;
- **A020102** – *Edificio*, ovvero l'insieme delle unità volumetriche che formano un corpo costruito da un'unica tipologia edilizia; può avere più categorie d'uso, ha un dato stato di conservazione, può avere unità volumetriche in sotterraneo, la sua geometria può non essere continua.

Gli attributi contenuti nei suddetti strati informativi sono servite per la successiva analisi e classificazione del tessuto urbano milanese; in particolare dallo shapefile delle unità volumetriche (A010201) si sono estrapolati dati di tipo geometrico, mentre dallo shapefile degli edifici (A010202) si è considerato l'attributo della destinazione d'uso (campo EDIFC_USO), avendo cura di selezionare unicamente gli edifici a destinazione residenziale. Incrociando quindi tali dati mediante successive operazioni di Join tabellare in ambiente Geographical Information System (di seguito GIS), è stato quindi possibile definire gli elementi necessari, come si vedrà nel seguito, per l'attribuzione della tipologia edilizia.

Censimento della popolazione e delle abitazioni ISTAT 2001

Il Censimento della popolazione e delle abitazioni ISTAT, come è noto, raccoglie una grandissima quantità di dati a livello comunale per tutta l'Italia. Ai fini di questo lavoro di tesi si è fatto riferimento ai dati delle Sezione Censuarie (aggiornate all'anno 2001), le quali rappresentano l'unità minima di riferimento per la raccolta e l'organizzazione dei dati ISTAT e contengono tutta una serie di informazioni riguardanti: *i*) la popolazione residente; *ii*) il numero di abitazioni, *iii*) la superficie delle stesse, *iv*) il numero di edifici; *v*) il numero di edifici ad uso abitativo *vi*) il numero di edifici ad uso abitativo per ogni classe d'età. Quest'ultimo dato in particolare ha consentito, mediante il comando *Intersect* in ambiente GIS, l'associazione della classe d'età allo strato informativo degli edifici, e quindi la generazione dei cluster degli edifici definiti in seguito.

Problematiche di tali database

Pur essendo il DBT riproposto secondo le specifiche tecniche di Regione Lombardia, è stata riscontrata l'assenza di alcuni strati informativi necessari alla completa copertura del territorio, ed inoltre diverse carenze informative negli shapefile, tra cui ricordiamo: (a) assenza o incompletezza di alcune informazioni; (b) sovrapposizione di strati informativi (c) errori grossolani in alcuni dati geometrici.

Tali mancanze fanno pensare ad una base di dati non completamente attinente alle specifiche regionali, trattandosi in via ipotetica di un DBT non ancora completamente collaudato. Si pensa che interventi di correzione di tali errori possano rendere maggiormente affidabili e complete tutte le analisi, comprese quelle oggetto del presente lavoro di tesi, che partono dai dati del DBT stesso.

Per quanto riguarda il censimento ISTAT, il principale limite riscontrato è la mancanza di dati puntuali sugli edifici, per cui, ad esempio, l'età degli edifici è definita al livello delle sezioni censuarie e non del singolo edificio; inoltre, spesso, alcuni edifici vengono "tagliati" in 2 o addirittura più sezioni censuarie diverse, rendendo quantomeno difficoltosa l'assegnazione alla sezione reale.

Definizione delle tipologie edilizie

Incrociando questi due database, si è stati in grado di definire per ogni edificio residenziale la rispettiva classe d'età, il rapporto S/V ed il numero di piani, questi ultimi mediante elaborazioni attraverso software GIS.

Le tipologie edilizie considerate sono quattro (vedi anche Tabella 3.1):

- *casa monofamiliare*, caratterizzata da un'unica unità immobiliare, su uno o due piani, di tipo isolato o confinante con un altro edificio;
- *casa a schiera*, costituita da un'unica unità immobiliare, solitamente su due piani, confinante con altre unità abitative (complesso a schiera);
- *edificio multifamiliare*, edificio di ridotte dimensioni caratterizzato da un numero limitato di unità immobiliari (da 2 a 5 piani e fino a 20 appartamenti);
- *blocco di appartamenti*, edificio di grandi dimensioni caratterizzato da un numero elevato di unità immobiliari (più di 4 piani e più di 15 appartamenti).

Tabella 3.1 Valori medi riassuntivi per le 4 tipologie edilizie tipo secondo TABULA (2011)

	Volume climatizzato lordo (m ³)	Superficie Lorda di Pavimento (m ²)	Rapporto di forma (m ⁻¹)	Numero di piani	Numero di appartamenti
Casa monofamiliare	579	154	0,76	2	1
Casa a schiera	445	114	0,57	2	1
Edificio multifamiliare	3.495	1.021	0,52	3,2	13
Blocco di appartamenti	8.519	2.542	0,42	5,6	33

Per quanto concerne la correlazione tra il database topografico degli edifici e gli edifici archetipo di TABULA per la definizione delle tipologie edilizie, si sono usati come discriminanti i valori del rapporto di forma S/V e del numero di piani, adottando cioè lo schema concettuale di Figura 3.5. Da esso si nota come la correlazione rapporto di forma - tipologia edilizia non sia esattamente univoca, secondo le analisi di TABULA, e non direttamente determinabile. Si è usato, perciò, come primo discriminante il numero di piani (calcolato come 'altezza dell'edificio/3'), e quindi, in caso di tipologie edilizie con lo stesso numero di piani, si è andati a calcolare il rapporto di forma:

- edifici con un solo piano sono stati classificati come '*casa monofamiliare*'
- edifici con 2 piani sono stati classificati come '*casa monofamiliare*' per valori di S/V maggiori di 0,7, come '*edificio multifamiliare*' in caso di S/V compreso tra 0,56 e 0,53 (è il caso di edifici realizzati prima del 1919, che nonostante i 2 piani vengono classificati da TABULA non come case a schiera, bensì come multifamiliari), ed infine come '*casa a schiera*' per i rimanenti valori di S/V
- tutti gli edifici con 3 piani sono compresi nella categoria '*edifici multifamiliari*', indipendentemente dal rispettivo rapporto di forma
- gli edifici con 4 o 5 piani sono stati classificati ancora come '*edifici multifamiliari*' in caso di S/V compreso tra 0,56 e 0,48, mentre come '*blocchi di appartamenti*' per i restanti valori di S/V
- infine, gli edifici con un numero di piani maggiore o uguale a 6 si definiscono come '*Blocchi di appartamenti*', indipendentemente dal rapporto S/V che risulta comunque in ogni caso essere inferiore a circa 0,45.

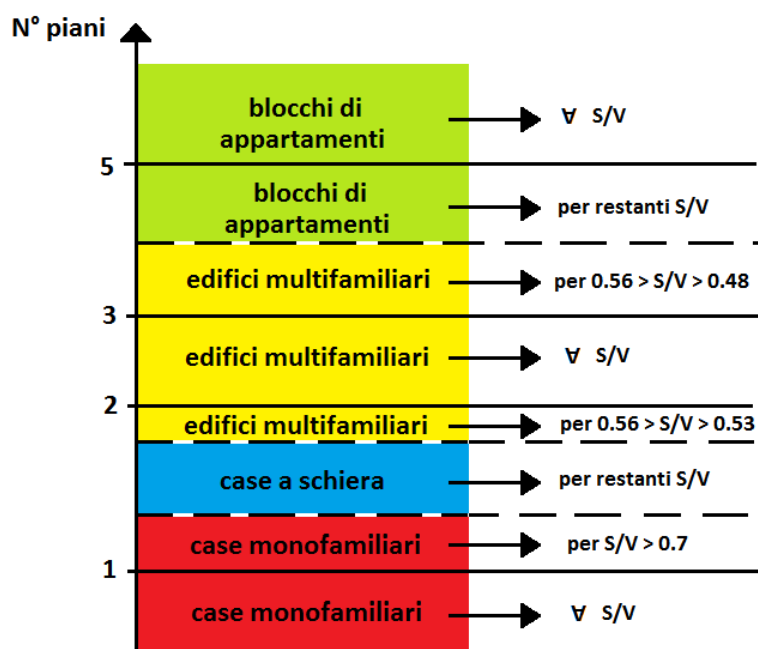


Figura 3.5 Schema concettuale della classificazione degli edifici nelle rispettive tipologie edilizie in base a numero di piani e rapporto S/V

Per completezza in Figura 3.6 viene presentata la classificazione delle tipologie edilizie seguita, in base al solo rapporto S/V, e quindi non al numero di piani. Si è deciso di non usare questa classificazione, in quanto il rapporto di forma si è calcolato direttamente dal database topografico, ed in tale calcolo si sono notate alcune imprecisioni all'interno degli edifici rappresentati, e per questo come primo discriminante si è considerato il numero di piani, e solamente in secondo luogo l'S/V.

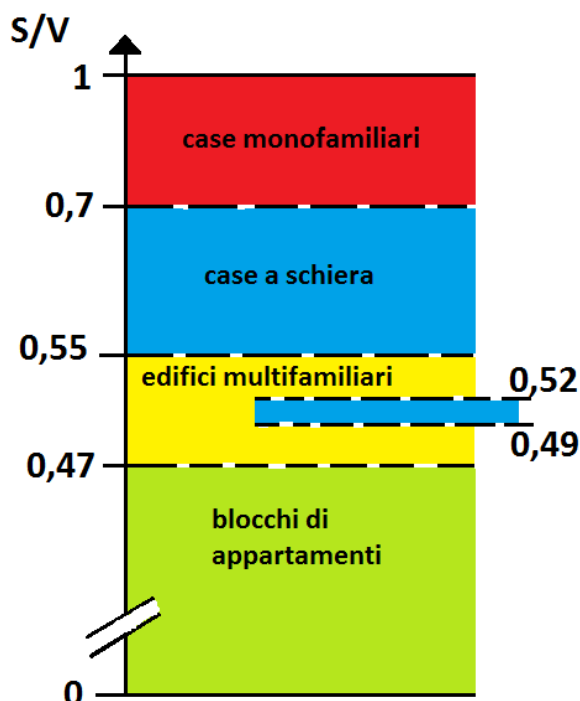


Figura 3.6 Classificazione delle tipologie edilizie in base al solo rapporto di forma S/V, indipendentemente dal numero di piani

Calcolo del numero di piani e del rapporto S/V

Per quanto riguarda la determinazione del numero di piani, si è dovuto ricorrere ad un semplice calcolo per determinare tale dato, in quanto non presente all'interno di alcun database disponibile. Il calcolo è tuttavia

estremamente banale, in quanto, conoscendo dal database topografico l'altezza del singolo edificio, la si è divisa per l'altezza interpiano standard, pari a 3 m:

$$n^{\circ} \text{ piani} = \frac{\text{altezza edificio [m]}}{3 \text{ [m]}}$$

Passando al rapporto S/V , definito anche *fattore di forma*, esso è in grado di esprimere l'attitudine di un corpo, nel nostro caso il singolo edificio, a disperdere il calore contenuto al suo interno. Esso si calcola come il rapporto tra la superficie disperdente (S) dell'edificio e il suo volume riscaldato (V), dove per superficie disperdente si intende quella superficie che risulta essere a contatto con l'esterno o comunque che delimita l'edificio verso ambienti privi di riscaldamento (vedi Figura 3.7).

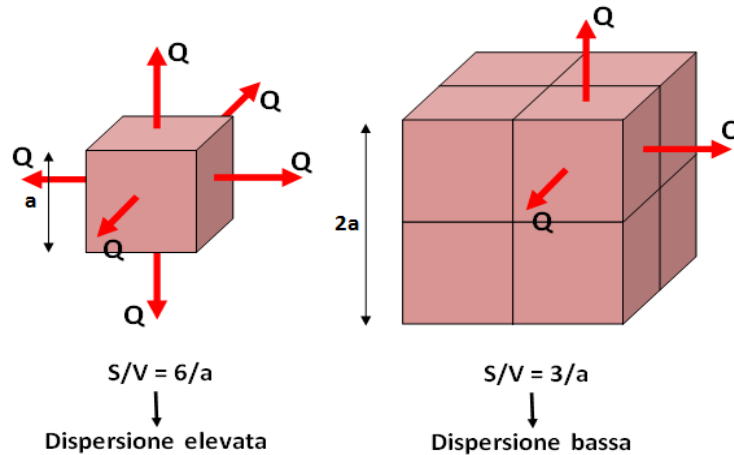


Figura 3.7 Confronto tra il fattore di forma di un cubo isolato (casa singola) e di uno inglobato in una struttura più grande (appartamento in blocco di appartamenti)

Per un edificio isolato S si ottiene sommando la superficie laterale dell'edificio, la superficie inferiore a contatto con il terreno e quella superiore oltre il tetto (a contatto con il "cielo"):

$$S = \text{perimetro} * \text{altezza} + 2 * \text{area}$$

$$V = \text{area} * \text{altezza}$$

La cosa si complica leggermente quando l'edificio non è più isolato ma risulta essere a contatto con uno o più edifici, che oltretutto possono avere altezze differenti; in tal caso è necessario sottrarre alla superficie laterali le eventuali superfici di contatto tra gli edifici (la superficie in rosso in Figura 3.8):

$$S = \text{perimetro} * \text{altezza} + 2 * \text{area} - S_{\text{contatto}}$$

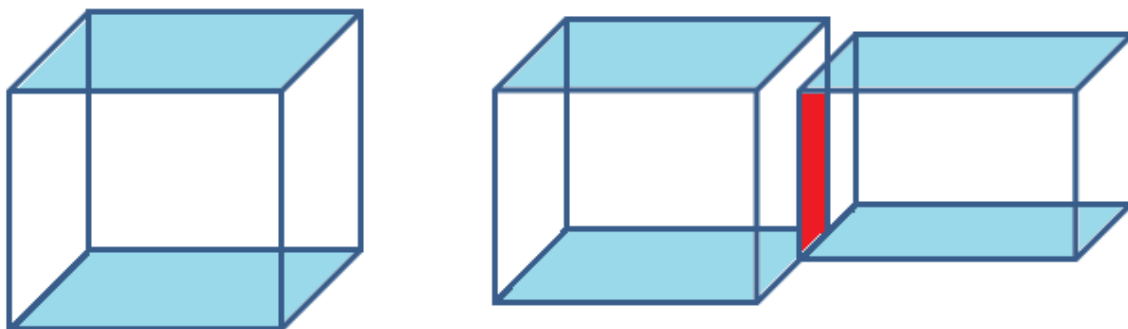


Figura 3.8 Schematizzazione di un edificio con l'intera superficie laterale disperdente (a sinistra), e di uno confinante con un secondo edificio (a destra)

Per questo calcolo si è implementato un procedimento piuttosto complesso in GIS, ma che alla fine ha permesso di trovare per ogni edificio, indipendentemente dalla forma o dai confini, il rispettivo rapporto di forma.

Definizione delle classi d'età

Come detto, le tipologie edilizie si sono determinate utilizzando come discriminanti il numero di piani ed il rapporto S/V, mentre per quanto riguarda le classi d'età bisogna precisare che quelle definite da TABULA non coincidono esattamente con quelle fornite da ISTAT nel *Censimento generale della popolazione e delle abitazioni* (ISTAT, 2001), e si è quindi dovuto ricorrere ad un'aggregazione per alcune di esse, presentata in Figura 3.9, che implica quindi un'ulteriore approssimazione della stima del modello. I valori delle prime due classi di TABULA (<1900 e 1901-1920) vanno a confluire, in valor medio, nella classe ISTAT '<1919', la classe TABULA '1921-1945' va nella '1920-1945' di ISTAT, la classe TABULA '1946-1960' va nella ISTAT '1946-1961', la '1961-1975' di TABULA va nella '1962-1971' di ISTAT, la classe '1972-1981' di ISTAT viene ricostruita mediante una media pesata tra le classi '1961-1975' e '1976-1990' di TABULA (rispettivamente con coefficienti pari a 0,4 e 0,6, proporzionati al numero di anni "presi" da ogni classe), la '1976-1990' di TABULA viene attribuita alla classe '1982-1991' di ISTAT, ed infine le ultime due classi di TABULA ('1991-2005' e '>2005') vanno in valor medio nella classe '>1991' di ISTAT.

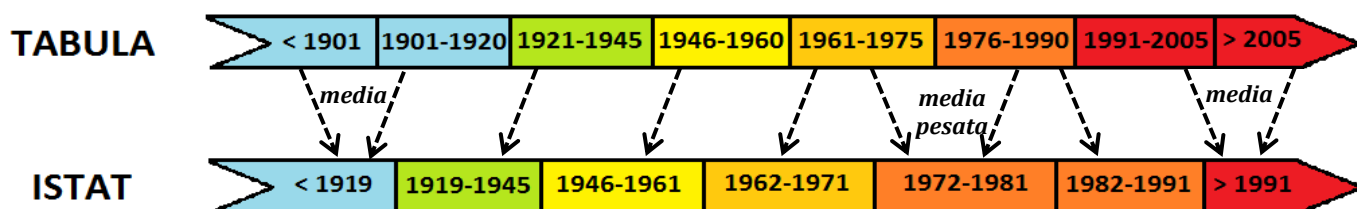


Figura 3.9 Schematizzazione dell'attribuzione delle classi d'età degli edifici da TABULA ad ISTAT

Bisogna però far emergere un non trascurabile limite del modello, derivante direttamente dalla mancanza di dati puntuali per gli edifici italiani, e cioè il fatto che il censimento ISTAT tenga come unità di riferimento l'unità censuaria, che è solitamente costituita da una superficie di dimensioni variabili, il cui criterio di definizione si basa sul numero di famiglie contenute, che è indicativamente pari a 250. Per questo la classe d'età dell'edificio non è riferita all'edificio stesso, ma è derivata da quella media degli edifici appartenenti all'unità censuaria, facendo quindi un'inevitabile approssimazione.

Attribuzione alle sezioni censuarie della rispettiva classe d'età

In questo paragrafo si va a definire la procedura di attribuzione della classe d'età ai singoli edifici, la quale, come detto, non è possibile definire direttamente, ma si è dovuto, appunto, ricorrere ai dati forniti dal censimento ISTAT, definiti alla scala delle sezioni censuarie. ISTAT determina per ogni sezione il numero di edifici per ogni classe d'età. Per attribuire alla sezione la rispettiva classe d'età si è optato per una media pesata tra gli edifici appartenenti ad ogni classe, ottenendo quindi le sezioni censuarie classificate per classe d'età (prevalente). Quindi si è attribuita la classe della sezione censuaria di riferimento agli edifici contenuti nella sezione stessa.

Operativamente, il procedimento di pesatura è il seguente:

- calcolo del numero di edifici totali per sezione
- calcolo della frequenza relativa di ogni classe d'età (come rapporto tra edifici della classe *i* ed edifici totali)
- determinazione per ogni classe d'età di una sorta di *anno medio* della classe, calcolato come la media tra gli anni estremi di ogni classe (definiti *pesi*)
- definizione del *discriminante* della classe d'età, calcolato come la sommatoria per le 7 classi del prodotto tra la frequenza relativa determinata al secondo punto e l'anno medio del punto precedente
- a seconda del valore assunto da tale discriminante si è determinata la classe d'età della sezione censuaria rispettiva.

Per definire la sezione di appartenenza ad ogni edificio (visto che molti edifici vengono “tagliati” da ISTAT in due o più sezioni censuarie) si è usato il baricentro: se il baricentro dell’edificio ricade all’interno della sezione *i*, tale edificio sarà classificato come appartenente a tale sezione censuaria.

Parte fondamentale per una classificazione il più possibile prossima a quella reale è la determinazione dell’*anno medio*; quest’operazione è assolutamente empirica e non è nemmeno fondata un preciso significato né fisico né matematico, ma ha come unico fine la definizione di una classificazione quanto più vicina a quella reale. Non è possibile definire, quindi, una pesatura univoca dei cosiddetti *pesi*, ma si consiglia di procedere per tentativi, muovendosi nella direzione verso la quale sembra che la classificazione del modello si avvicini a quella reale. Come si vedrà, infatti, nel capitolo riguardante il caso di studio, una diversa pesatura può comportare significative differenze all’interno dei vari cluster di edifici (vedi Figura 4.5).

Definizione dei consumi per ogni cluster di edifici

Definiti i cluster degli edifici, si sono assegnati i consumi corrispondenti per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, ottenendo i valori riassunti in Tabella 3.2; essa rappresenta in un certo senso la chiave per l’attribuzione dei consumi di energia termica al parco edifici di cui si intende stimare le prestazioni energetiche.

Tabella 3.2 Tabella con i valori di consumi di energia termica per tipologia edilizia e classe d’età riclassificati da TABULA secondo i parametri ISTAT

			Tipologie Edilizie			
			Case monofamiliari	Case a schiera	Edifici multifamiliari	Blocchi di appartamenti
Fabbisogno annuo di energia primaria per riscaldamento [kWh/m²]	Classi d’età	< 1919	489,5	359	393,5	255
		1920 - 1945	496	356	293	275
		1946 - 1961	409	261	253	233
		1962 - 1971	481	340	198	224
		1972 - 1981	326,8	234,4	158,4	148,1
		1982 - 1991	224	164	132	97,5
		> 1991	100,7	101	72,05	57,5
Fabbisogno annuo di energia primaria per acqua calda sanitaria [kWh/m²]	Classi d’età	< 1919	45,25	51,3	38,65	41,75
		1920 - 1945	21,6	21,7	46,7	52,2
		1946 - 1961	53,7	55,3	54,3	55,2
		1962 - 1971	41,8	44,4	25,5	52,6
		1972 - 1981	40,7	45,5	23,8	34,6
		1982 - 1991	40	46,3	22,6	22,7
		> 1991	24,5	35,1	22,05	21,85
Fabbisogno annuo di energia primaria per riscaldamento + ACS [kWh/m²]	Classi d’età	< 1919	534,75	410,3	432,15	296,75
		1920 - 1945	517,6	377,7	339,7	327,2
		1946 - 1961	462,7	316,3	307,3	288,2
		1962 - 1971	522,8	384,4	223,5	276,6
		1972 - 1981	367,5	279,9	182,2	182,7
		1982 - 1991	264	210,3	154,6	120,2
		> 1991	125,2	136,1	94,1	79,35

Alcuni commenti ai consumi risultanti

Ovviamente, visti anche i valori numerici, ci si concentrerà maggiormente sui consumi per riscaldamento: per rendere meglio l'idea dei consumi risultanti dall'incrocio dei dati TABULA con le classi d'età ISTAT da cui si è partiti per la stima dei consumi, si riportano in Tabella 3.3 i valori del fabbisogno di energia termica per riscaldamento colorati secondo la classificazione energetica degli edifici della Lombardia (CENED). Si nota come fino agli anni '70 gli edifici siano indistintamente in classe G, e addirittura che gli edifici più datati e con una tipologia edilizia maggiormente svantaggiosa (*case monofamiliari* e *case a schiera*) presentino consumi prossimi quasi ai 500 kWh/m²/anno. È netto, invece, il miglioramento dei consumi con la riduzione dell'età degli edifici, passando, per esempio nel caso dei *blocchi di appartamenti*, dai 255 ai 58 kWh/m² annui, e cioè da un'ampia classe G di un secolo fa ad una classe B dei giorni nostri.

Anche per quanto riguarda i consumi di energia termica per acqua calda sanitaria, dal confronto con la classificazione CENED risulta evidente quanto siano elevati i consumi per gli edifici considerati (vedi Tabella 3.4).

Tabella 3.3 Tabella con i valori di consumi di energia per riscaldamento per tipologia edilizia e classe d'età colorati secondo la classificazione adottata da Regione Lombardia (CENED) (sulla destra)

			Tipologie Edilizie				Classificazione CENED	
			Case monofamiliari	Case a schiera	Edifici multifamiliari	Blocchi di appartamenti	Classe	EPh
Fabbisogno annuo di energia primaria per riscaldamento [kWh/m ²]	Classi d'età	< 1919	489,5	359	393,5	255	A+	<14
		1920 - 1945	496	356	293	275	A	<29
		1946 - 1961	409	261	253	233	B	<58
		1962 - 1971	481	340	198	224	C	<87
		1972 - 1981	326,8	234,4	158,4	148,1	D	<116
		1982 - 1991	224	164	132	98	E	<145
		> 1991	100,7	101	72	57	F	<175
							G	>175

Tabella 3.4 Tabella con i valori di consumi di energia per acqua calda sanitaria per tipologia edilizia e classe d'età colorati secondo la classificazione adottata da Regione Lombardia (CENED) (sulla destra)

			Tipologie Edilizie				Classificazione CENED	
			Case monofamiliari	Case a schiera	Edifici multifamiliari	Blocchi di appartamenti	Classe	EPw
Fabbisogno annuo di energia primaria per acqua calda sanitaria [kWh/m ²]	Classi d'età	< 1919	45,25	51,3	38,65	41,75	A	<9
		1920 - 1945	21,6	21,7	46,7	52,2	B	<12
		1946 - 1961	53,7	55,3	54,3	55,2	C	<18
		1962 - 1971	41,8	44,4	25,5	52,6	D	<21
		1972 - 1981	40,7	45,5	23,8	34,6	E	<24
		1982 - 1991	40	46,3	22,6	22,7	F	<30
		> 1991	24,5	35,1	22,05	21,85	G	>30

Anche da Grafico 3.1 e Grafico 3.3, risulta evidente l'ampio gap tra le 4 tipologie edilizie, così come la riduzione dello stesso nel tempo. Si ha inizialmente una fortissima differenza tra case monofamiliari e i blocchi di edifici per le prime classi d'età: essa è dovuta principalmente al diverso grado di compattezza della tipologia edilizia, per cui edifici più compatti come i blocchi di appartamenti e gli edifici multifamiliari presentano una superficie disperdente molto minore rispetto a costruzioni isolate come le case monofamiliari e le case a schiera, il che comporta una minore dispersione dell'energia termica erogata dagli impianti. All'avvicinarsi ai giorni nostri le tecnologie costruttive migliorano, così come cominciano a nascere (tra la fine degli anni '70 e i primi anni '90) le

prime attenzioni da parte del legislatore verso l'efficienza energetica, per cui i consumi cominciano a subire delle nette riduzioni, fino ad arrivare agli anni '90 - 2000, quando la differenza tra le diverse tipologie edilizie si è decisamente ridotta, rendendo, quindi, i consumi meno dipendenti dalle tipologie stesse.

Per quanto riguarda i consumi per acqua calda sanitaria (vedi Grafico 3.2 e Grafico 3.4), non si hanno, invece, evidenti trend di decrescita, né tuttavia è possibile parlare di uniformità dei consumi all'interno delle stesse tipologie edilizie; in ogni caso, confrontando i valori delle prime classi d'età con quelle più recenti si ha, come nel caso del riscaldamento, una discreta riduzione dei consumi.

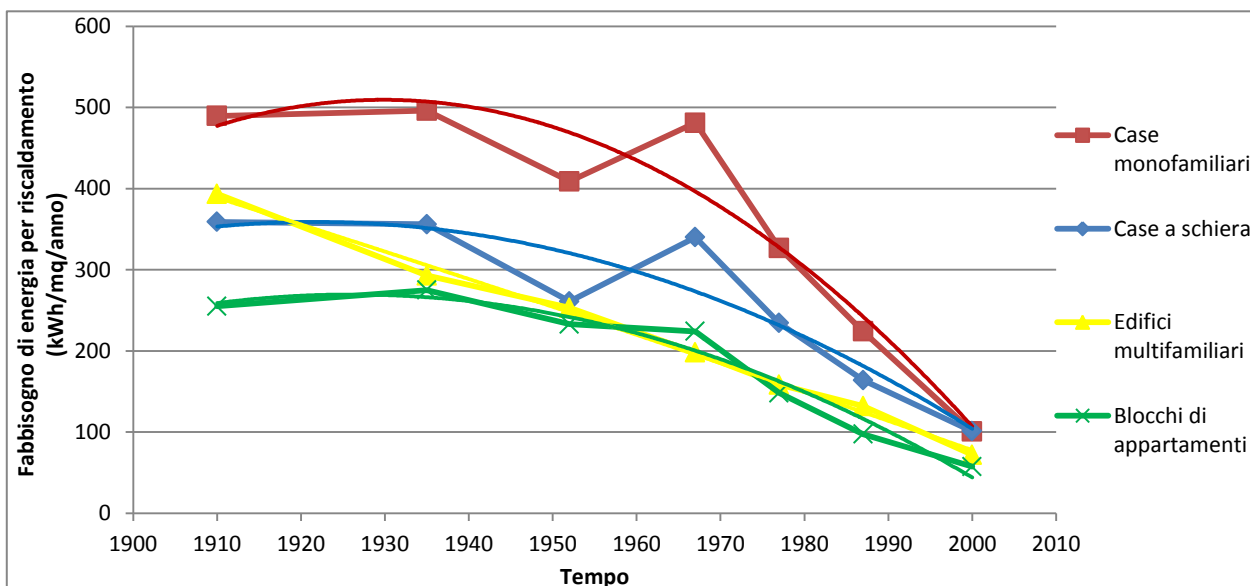


Grafico 3.1 Andamento del fabbisogno di energia termica per riscaldamento, al variare dell'età degli edifici per le 4 quattro tipologie edilizie risultante dall'incrocio da dati TABULA ed ISTAT, utilizzato per il presente lavoro (valori puntuali e linee di tendenza)

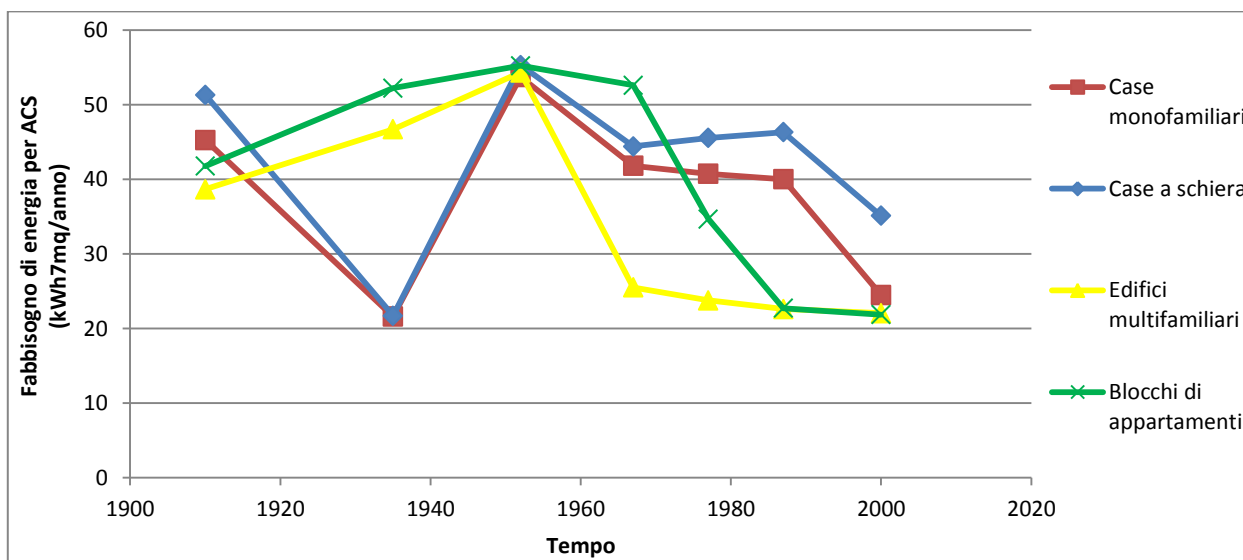


Grafico 3.2 Andamento del fabbisogno di energia termica per acqua calda sanitaria, al variare dell'età degli edifici per le 4 quattro tipologie edilizie risultante dall'incrocio da dati TABULA ed ISTAT, utilizzato per il presente lavoro

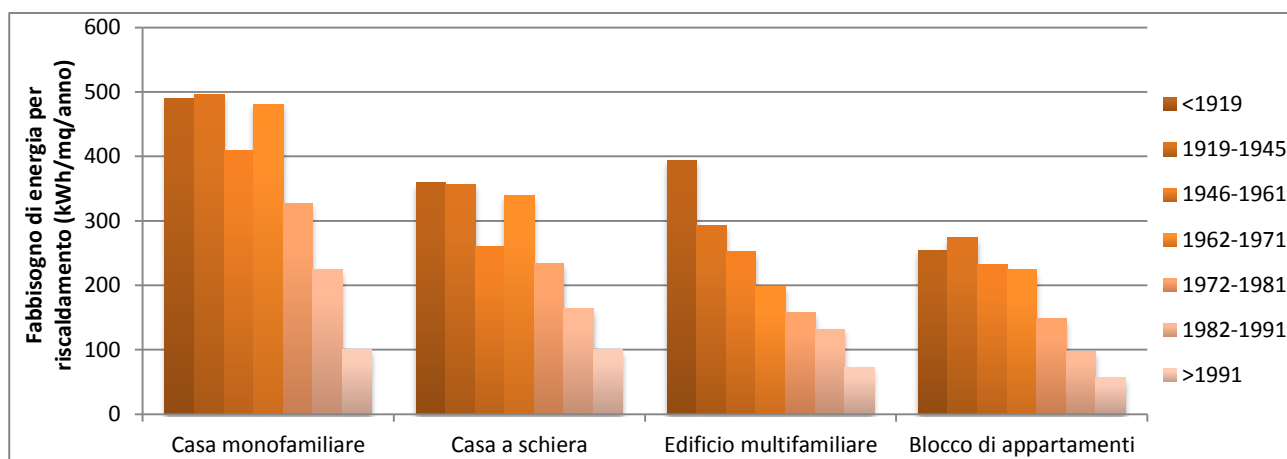


Grafico 3.3 Andamento dei consumi di energia termica per riscaldamento nel tempo per le quattro tipologie edilizie

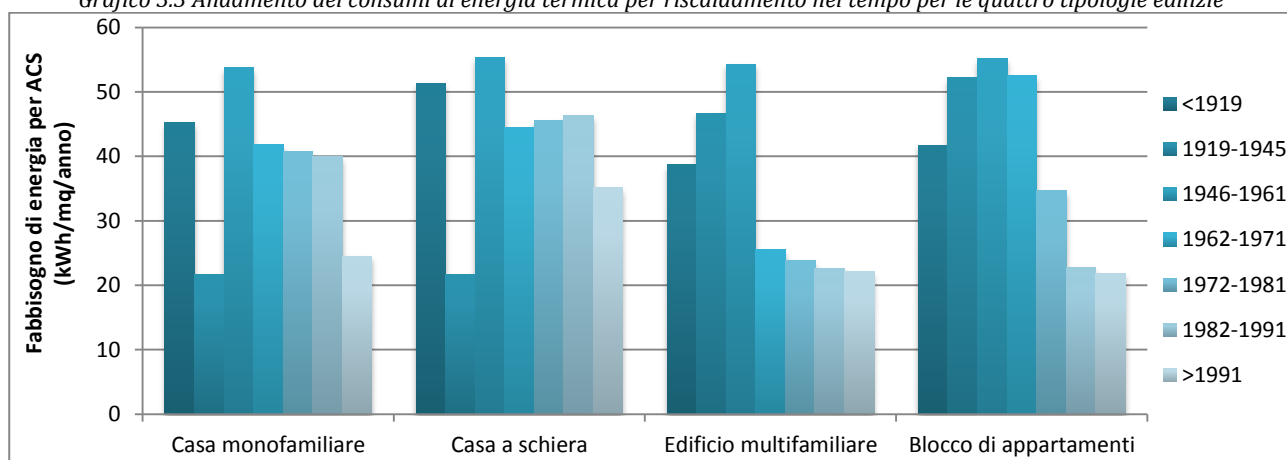


Grafico 3.4 Andamento dei consumi di energia termica per ACS nel tempo per le quattro tipologie edilizie

Per quanto riguarda, invece, l'approccio modellistico, si è seguito un approccio di tipo *bottom-up* – *ingegneristico*, in quanto per definire i consumi totali si è partiti dall'analisi dei comportamenti dei singoli edifici (*dal basso* ...), per poi quindi definire i consumi a scala via via più ampia (... *verso l'alto*).

Passando, invece, ai dati da cui partiranno tutte le successive stime, è importante far emergere i seguenti punti:

- la tipologia edilizia maggiormente efficiente risulta essere quella dei blocchi di appartamenti, mentre la meno efficiente quella delle case monofamiliari, a causa del diverso grado di compattezza, e quindi di dispersione termica, della rispettiva configurazione edilizia;
- la differenza dei consumi tra le diverse tipologie è andata riducendosi col passare del tempo, rendendo quindi i consumi meno dipendenti dalla tipologia edilizia;
- riguardo i consumi relativi ad ACS, i valori sono meno omogenei, così come il trend di riduzione, che in ogni caso è presente.

3.2.2 Stima dei consumi attuali di energia elettrica degli edifici

La stima dei consumi elettrici delle singole utenze è stata condotta innanzitutto tramite ricerca bibliografica sia da fonti accademiche che istituzionali. Di seguito la tabella riassuntiva con i valori considerati e le rispettive fonti.

Le fonti REMODECE (Residential Monitoring to Decrease Energy Use and Carbon Emissions in Europe), MICENE (Misure dei Consumi di Energia Elettrica nel settore domestico) ed EURECO fanno riferimento a un progetto europeo (*Intelligent Energy Europe*), che si pone come obiettivo una miglior comprensione dei consumi elettrici

principalmente del settore residenziale. Il semplice dato del consumo medio per utenza non è sicuramente l'unico target di questi progetti, che hanno prodotto, infatti, un ricco database proveniente da campagne di monitoraggio dei consumi di energia elettrica per i singoli dispositivi di un gran numero di abitazioni in Europa ed in Italia, con l'obiettivo di accrescere le conoscenze in materia di consumi del settore residenziale dei paesi europei e di identificarne il trend di domanda, ponendosi come fine ultimo l'incremento dell'efficienza energetica e la riduzione dei consumi elettrici domestici. Ovviamente, quindi, i dati contenuti nella seguente tabella sono solo una piccola parte di tutti i dati che tali progetti mettono a disposizione: si sono scelti solamente quelli più funzionali al presente lavoro (vedi Tabella 3.5).

Tabella 3.5 Valori di riferimento per la stima dei consumi elettrici del settore residenziale

Unità di riferimento	Valore	Unità di misura	Fonte	
per utenza	2.700	kWh/anno/utenza	REMODECE (2008)	
per utenza	3.250	kWh/anno/utenza	MICENE (2004)	
pro capite	800	kWh/anno/pro capite	MICENE (2004)	
per superficie	30,5	kWh/anno/m ²	MICENE (2004)	
per utenza	3.200	kWh/anno/utenza	EURECO (2000)	
pro capite	875	kWh/anno/pro capite	EURECO (2000)	
per superficie	31	kWh/anno/m ²	EURECO (2000)	
per utenza	Italia	2.400	kWh/anno/utenza	ISTAT (2008)
	Lombardia	2.200	kWh/anno/utenza	ISTAT (2008)
pro capite	Italia	1.200	kWh/anno/pro capite	ISTAT (2008)
	Lombardia	1.200	kWh/anno/pro capite	ISTAT (2008)
per utenza	Italia	2.700	kWh/anno/utenza	Agenzia per l'En Elettrica ed il Gas

Il dato di REMODECE risulta da una media tra i consumi di oltre 100 utenze per ognuno dei 12 paesi europei coinvolti. I valori forniti da MICENE derivano invece dal consumo medio di 62 utenze situate tutte in Lombardia, mentre quello di EURECO raccoglie misurazioni di circa 100 utenze sparse però per tutta Italia.

Il dato dell'ISTAT non si basa su misurazioni effettuate, bensì è il risultato di elaborazioni basate su macroindicatori, quali popolazione media e numero medio di edifici, ed infatti risulta piuttosto differente rispetto ai valori misurati dei progetti di cui sopra.

Il dato dell'Agenzia per l'Energia Elettrica ed il Gas, infine, è un dato più che altro indicativo per il consumo medio italiano, che viene fornito come dato generale, per definire l'ordine di grandezza.

Alla luce delle precedenti considerazioni, si è scelto di utilizzare il dato di MICENE (più recente, ma tuttavia simile, rispetto ad EURECO) come valore di riferimento per la stima del modello in questione, in quanto più rappresentativo dell'area geografica di cui ci si interesserà nel caso di studio, oltre che molto preciso in quanto proveniente da misurazioni dirette e non da stime. Si terrà conto quindi di un consumo medio per utenza pari a 3.250 kWh/anno, un consumo medio pro capite pari a 800 kWh/anno ed un consumo per unità di superficie uguale a 30 kWh/anno. L'unità di riferimento che verrà utilizzata è l'utenza (abitazione singola), in quanto è piuttosto consolidato il fatto che il consumo elettrico dipenda innanzitutto dall'utenza, indipendentemente dalla tipologia (superficie) della stessa e dal numero di abitanti; ovviamente ad utenza più grande corrisponderà un maggiore consumo, ma assumiamo, ripeto, in primis la dipendenza dall'utenza.

L'approccio utilizzato può essere classificabile, quindi, all'interno dei *bottom-up*, in quanto i dati di MICENE ed EURECO partono da misurazioni delle singole utenze (quindi *dal basso*) per poi essere distribuite su tutti gli edifici. Se si fosse partiti, invece, dai dati per esempio dell'ISTAT, si parlerebbe di un approccio di tipo *top-down*, in quanto i dati delle utenze singole sono ottenuti "disaggregando" dati sui consumi complessivi, seguendo così un criterio "dall'alto verso il basso" (vedi Capitolo 2).

Ovviamente all'occorrenza, nel caso per esempio si volesse applicare il modello ad una diversa area geografica, sarebbe comunque possibile e immediato utilizzare un dato diverso da quello qui preimpostato.

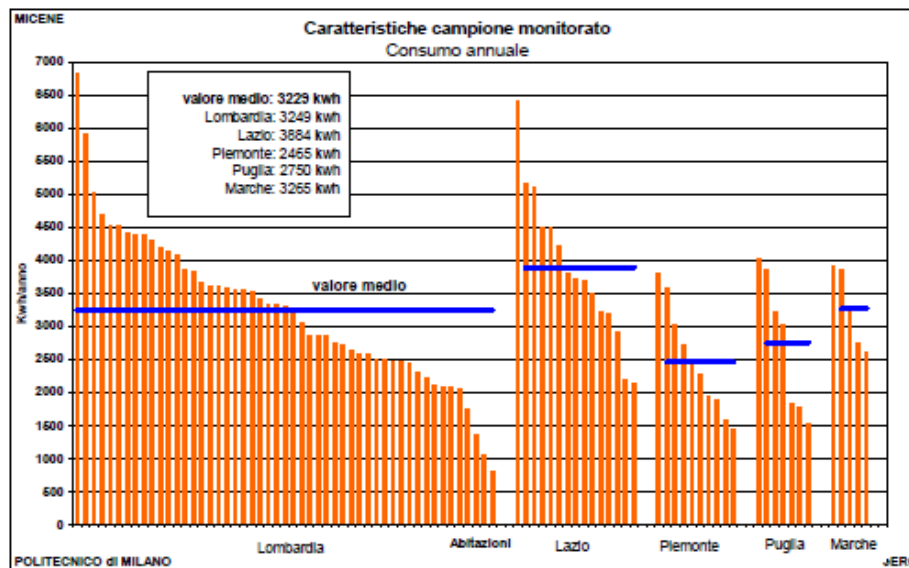


Figura 3.10 Consumi elettrici medi annuali per le utenze (kWh/anno/utenza) monitorate per il progetto MICENE

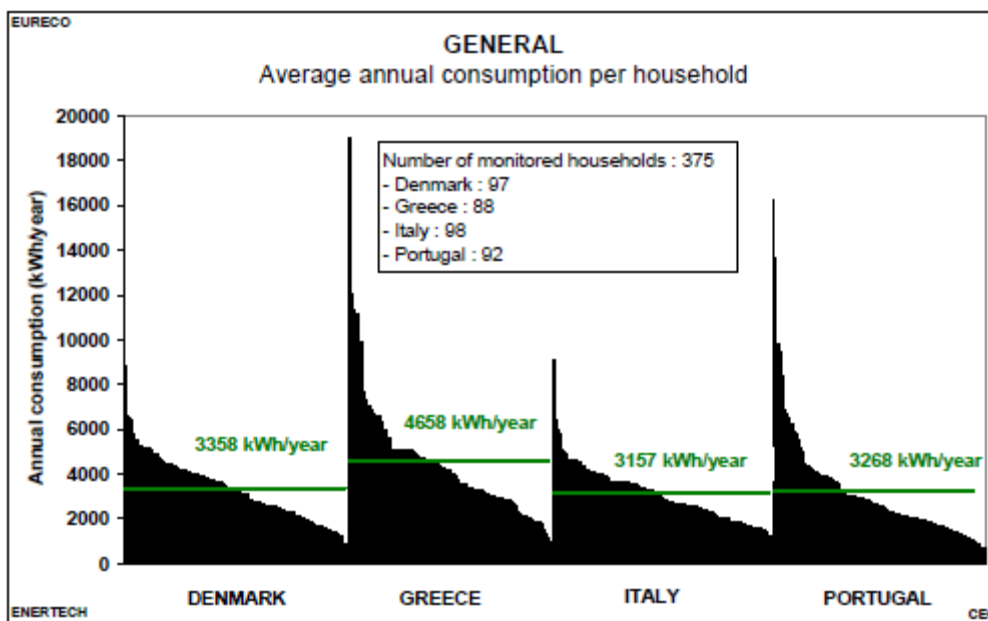


Figura 3.11 Consumi elettrici medi annuali per le utenze (kWh/anno/utenza) monitorate per il progetto EURECO

Anche qui, l'approccio modellistico è di tipo *bottom-up - statistico*, anche se meno dettagliato rispetto alla parte dei consumi termici. Il grado dettagliato dipende anche dalla natura del vettore energetico, che, come detto, non dipende (o meglio, si è ipotizzato non dipendere), a differenza dei consumi termici, da tipologia edilizia o classe d'età dell'edificio.

3.2.3 Stima dei consumi di energia termica in scenari di riduzione della domanda

Come detto, a partire dai consumi attuali si sono stimati dei "nuovi consumi", definiti in uno scenario che prevede diverse misure colte alla riduzione della domanda di energia richiesta dagli edifici verso l'esterno.

Per quanto riguarda i consumi di energia termica per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, si è fatto riferimento, come per lo scenario dei consumi attuali, al progetto TABULA, il quale, oltre a definire i consumi del parco edifici attuale, definisce due ulteriori scenari:

- scenario di *riqualificazione standard*, volta all'applicazione di misure di intervento comunemente utilizzate sul territorio italiano
- scenario di *riqualificazione avanzata*, che prevede l'introduzione di interventi che riflettono le migliori tecnologie disponibili (scenario BAT, *Best Available Technologies*)

In questi due scenari, per ogni tipologia edilizia e per ogni classe d'età, vengono proposte delle misure di riduzione dei consumi di energia termica unite a proposte per l'efficientamento degli impianti di produzione; per questo essi possono definirsi come scenari di riduzione integrata della domanda, che lavora infatti sia a livello di riduzione globale dei consumi, agendo sull'involucro edilizio, sia a livello di incremento dell'efficienza, riducendo il consumo di energia primaria per kWh termico utile, agendo sull'impiantistica. Vengono, inoltre, implementate misure volte alla produzione di energia termica direttamente da fonti rinnovabili, sostituendo così, almeno in parte, la domanda di energia termica (solitamente di origine fossile) da importare dall'esterno con energia da fonti rinnovabili prodotta localmente.

Misure volte all'efficientamento dell'involucro edilizio

Le misure adottate per l'involucro edilizio sono volte all'utilizzo di materiali maggiormente efficienti dal punto di vista dell'isolamento termico, caratterizzati, cioè, da valori di trasmittanza termica, U (W/mq^*K), minori, sia per l'involucro opaco (tetto, pareti, pavimenti) che per l'involucro trasparente (porte e finestre). Si considera di rispettare un valore limite di trasmittanza termica dei componenti d'involucro edilizio, attraverso l'applicazione dei requisiti minimi di prestazione energetica richiesti dalla recente legislazione in materia di efficienza energetica in edilizia. La scelta è rivolta all'applicazione della D.G.R. n. 46-11968 (4 agosto 2009) della Regione Piemonte che individua valori limite di trasmittanza termica più restrittivi rispetto al D. Lgs. n. 311/2006 a livello nazionale.

Considerando un livello *standard* di riqualificazione si ipotizza di conseguire, a seguito dell'intervento di coibentazione termica, i seguenti valori di trasmittanza termica delle strutture edilizie:

- chiusure opache verticali (pareti): $U = 0,33 W/mq^*K$
- chiusure opache orizzontali e inclinate (tetto e pavimenti): $U = 0,30 W/mq^*K$
- chiusure trasparenti (porte e finestre): $U = 2,00 W/mq^*K$

Considerando, invece, un livello *avanzato* di riqualificazione si ipotizza di conseguire, a seguito dell'intervento di coibentazione termica, i seguenti valori di trasmittanza termica delle strutture edilizie:

- chiusure opache verticali: $U = 0,25 W/mq^*K$
- chiusure opache orizzontali e inclinate: $U = 0,23 W/mq^*K$
- chiusure trasparenti: $U = 1,70 W/mq^*K$

Misure volte alla riqualificazione impiantistica

Passando all'efficientamento impiantistico, gli interventi di riqualificazione energetica sono rivolti separatamente all'impianto di riscaldamento e a quello di acqua calda sanitaria. Per quanto riguarda la riqualificazione dell'impianto di riscaldamento, sia *standard* che *avanzata*, si ipotizzano i seguenti interventi:

- sostituzione dei radiatori con pannelli radianti;
- coibentazione della rete di distribuzione del fluido termovettore;
- sostituzione o eventuale nuova installazione di un accumulo termico (alto livello di isolamento);
- intervento di trasformazione dell'impianto di riscaldamento da autonomo a centralizzato.

Per quanto riguarda la riqualificazione dell'impianto di acqua calda sanitaria, sia *standard* che *avanzata*, si ipotizzano i seguenti interventi:

- coibentazione della rete di distribuzione dell'acqua calda;
- sostituzione o eventuale nuova installazione di un accumulo termico (alto livello di isolamento);
- in alcuni casi, intervento di trasformazione dell'impianto di produzione di acqua calda sanitaria da autonomo a centralizzato.

Misure volte alla produzione di energia termica

Per quanto riguarda la riqualificazione *standard* dell'impianto di riscaldamento, si ipotizza il seguente intervento:

- sostituzione del generatore di calore tradizionale con:
 - caldaia a condensazione,
 - collegamento alla rete di teleriscaldamento,
 - pompa di calore aria-acqua.

Per quanto concerne la riqualificazione *avanzata* dell'impianto di riscaldamento, si ipotizza invece il seguente intervento:

- sostituzione del generatore di calore tradizionale con:
 - pompa di calore geotermica,
 - pompa di calore geotermica in associazione all'impianto solare termico,
 - caldaia a condensazione in associazione all'impianto solare termico,
 - pompa di calore ad aria in associazione all'impianto solare termico.

Per la riqualificazione *standard* dell'impianto di acqua calda sanitaria, si ipotizza il seguente intervento:

- sostituzione del generatore di calore tradizionale con:
 - caldaia a condensazione (produzione di ACS individuale per appartamento);
 - caldaia a condensazione (produzione di ACS centralizzata);
 - impianto solare termico e bollitori elettrici ausiliari ad accumulo (individuali);
 - pompa di calore aria-acqua.

Passando alla riqualificazione *avanzata* dell'impianto di acqua calda sanitaria, si ipotizza invece il seguente intervento:

- sostituzione del generatore di calore tradizionale con:
 - pompa di calore geotermica, oppure
 - pompa di calore geotermica in associazione all'impianto solare termico, oppure
 - caldaia a condensazione in associazione all'impianto solare termico.

Utilizzando gli stessi cluster di edifici definiti nei paragrafi precedenti, si sono attribuiti ad essi i consumi rispettivi, che vengono quindi presentati nelle seguenti tabelle.

Tabella 3.6 Tabella con i valori di consumi di energia termica per tipologia edilizia e classe d'età riclassificati da TABULA secondo i parametri ISTAT, per lo scenario di riqualificazione standard

		Tipologie Edilizie				
		Case monofamiliari	Case a schiera	Edifici multifamiliari	Blocchi di appartamenti	
Fabbisogno annuo di en primaria per riscaldamento [kWh/m ²]	Classi d'età	< 1919	84,3	56,1	59,9	41,65
		1920 - 1945	74,7	43,9	47,9	35,8
		1946 - 1961	79,7	42,4	45,1	43,5
		1962 - 1971	71,7	60,4	43,6	41,1
		1972 - 1981	64,14	60,04	39,76	32,58
		1982 - 1991	59,1	59,8	37,2	26,9
		> 1991	64,3	49	44,9	36,4
Fabbisogno annuo di en primaria per acqua calda sanitaria [kWh/m ²]	Classi d'età	< 1919	23,15	24,85	22,9	25,75
		1920 - 1945	18,1	18,2	29,7	24,7
		1946 - 1961	30,6	25,9	20,5	27,2
		1962 - 1971	22,3	29,9	28,6	29
		1972 - 1981	23,38	22,64	24,76	23,72
		1982 - 1991	24,1	17,8	22,2	20,2
		> 1991	16,5	25,9	20,7	19,7
Fabbisogno annuo di en primaria per riscaldamento + ACS [kWh/m ²]	Classi d'età	< 1919	107,45	80,95	82,8	67,4
		1920 - 1945	92,8	62,1	77,6	60,5
		1946 - 1961	110,3	68,3	65,6	70,7
		1962 - 1971	94	90,3	72,2	70,1
		1972 - 1981	87,52	82,68	64,52	56,3
		1982 - 1991	83,2	77,6	59,4	47,1
		> 1991	80,8	74,9	65,6	56,1

Tabella 3.7 Tabella con i valori di consumi di energia per riscaldamento per tipologia edilizia e classe d'età, per lo scenario di riqualificazione standard, colorati secondo la classificazione adottata da Regione Lombardia (CENED) (sulla destra)

		Tipologie Edilizie				Classificazione CENED		
		Case monofamiliari	Case a schiera	Edifici multifamiliari	Blocchi di appartamenti	Classe	EPh	
Fabbisogno annuo di en primaria per riscaldamento [kWh/m ²]	Classi d'età	< 1919	84,3	56,1	59,9	41,65	A+	<14
		1920 - 1945	74,7	43,9	47,9	35,8	A	<29
		1946 - 1961	79,7	42,4	45,1	43,5	B	<58
		1962 - 1971	71,7	60,4	43,6	41,1	C	<87
		1972 - 1981	64,14	60,04	39,76	32,58	D	<116
		1982 - 1991	59,1	59,8	37,2	26,9	E	<145
		> 1991	64,3	49	44,9	36,4	F	<175
						G	>175	

Tabella 3.8 Tabella con i valori di consumi di energia per ACS per tipologia edilizia e classe d'età, per lo scenario di riqualificazione standard, colorati secondo la classificazione adottata da Regione Lombardia (CENED) (sulla destra)

		Tipologie Edilizie				Classificazione CENED		
		Case monofamiliari	Case a schiera	Edifici multifamiliari	Blocchi di appartamenti	Classe	EPw	
Fabbisogno annuo di en primaria per acqua calda sanitaria [kWh/m²]	<i>Classi d'età</i>	< 1919	23,15	24,85	22,9	25,75	A	<9
		1920 - 1945	18,1	18,2	29,7	24,7	B	<12
		1946 - 1961	30,6	25,9	20,5	27,2	C	<18
		1962 - 1971	22,3	29,9	28,6	29	D	<21
		1972 - 1981	23,38	22,64	24,76	23,72	E	<24
		1982 - 1991	24,1	17,8	22,2	20,2	F	<30
		> 1991	16,5	25,9	20,7	19,7	G	>30

Tabella 3.9 Tabella con i valori di consumi di energia termica per tipologia edilizia e classe d'età riclassificati da TABULA secondo i parametri ISTAT, per lo scenario di riqualificazione avanzata

		Tipologie Edilizie				
		Case monofamiliari	Case a schiera	Edifici multifamiliari	Blocchi di appartamenti	
Fabbisogno annuo di en primaria per riscaldamento [kWh/m²]	<i>Classi d'età</i>	< 1919	51,9	36,7	30,05	29,15
		1920 - 1945	41	26,2	32,2	24
		1946 - 1961	54,4	29,5	26,4	19,7
		1962 - 1971	46,4	41,9	29,4	28
		1972 - 1981	42,38	37,52	26,28	22,06
		1982 - 1991	39,7	34,6	24,2	18,1
		> 1991	37,7	32,7	25	21,6
Fabbisogno annuo di en primaria per acqua calda sanitaria [kWh/m²]	<i>Classi d'età</i>	< 1919	19,2	17,25	15,25	14,85
		1920 - 1945	20,5	19,4	11,3	14,5
		1946 - 1961	18,9	19,4	20	11,2
		1962 - 1971	17,8	18,6	14,4	14,6
		1972 - 1981	18,28	20,88	13,98	14,18
		1982 - 1991	18,6	22,4	13,7	13,9
		> 1991	21,6	19,4	20,2	19,2
Fabbisogno annuo di en primaria per riscaldamento + ACS [kWh/m²]	<i>Classi d'età</i>	< 1919	71,1	53,95	45,3	44
		1920 - 1945	61,5	45,6	43,5	38,5
		1946 - 1961	73,3	48,9	46,4	30,9
		1962 - 1971	64,2	60,5	43,8	42,6
		1972 - 1981	60,66	58,4	40,26	36,24
		1982 - 1991	58,3	57	37,9	32
		> 1991	59,3	52,1	45,2	40,8

Tabella 3.10 Tabella con i valori di consumi di energia per riscaldamento per tipologia edilizia e classe d'età, per lo scenario di riqualificazione avanzata, colorati seconda la classificazione adottata da Regione Lombardia (CENED) (sulla destra)

		Tipologie Edilizie				Classificazione CENED		
		Case monofamiliari	Case a schiera	Edifici multifamiliari	Blocchi di appartamenti	Classe	EPh	
Fabbisogno annuo di energia primaria per riscaldamento [kWh/m²]	<i>Classi d'età</i>	< 1919	51,9	36,7	30,05	29,15	A+	<14
		1920 - 1945	41	26,2	32,2	24	A	<29
		1946 - 1961	54,4	29,5	26,4	19,7	B	<58
		1962 - 1971	46,4	41,9	29,4	28	C	<87
		1972 - 1981	42,38	37,52	26,28	22,06	D	<116
		1982 - 1991	39,7	34,6	24,2	18,1	E	<145
		> 1991	37,7	32,7	25	21,6	F	<175
						G	>175	

Tabella 3.11 Tabella con i valori di consumi di energia per ACS per tipologia edilizia e classe d'età, per lo scenario di riqualificazione standard, colorati secondo la classificazione adottata da Regione Lombardia (CENED) (sulla destra)

		Tipologie Edilizie				Classificazione CENED		
		Case monofamiliari	Case a schiera	Edifici multifamiliari	Blocchi di appartamenti	Classe	EPw	
Fabbisogno annuo di energia primaria per acqua calda sanitaria [kWh/m²]	<i>Classi d'età</i>	< 1919	19,2	17,25	15,25	14,85	A	<9
		1920 - 1945	20,5	19,4	11,3	14,5	B	<12
		1946 - 1961	18,9	19,4	20	11,2	C	<18
		1962 - 1971	17,8	18,6	14,4	14,6	D	<21
		1972 - 1981	18,28	20,88	13,98	14,18	E	<24
		1982 - 1991	18,6	22,4	13,7	13,9	F	<30
		> 1991	21,6	19,4	20,2	19,2	G	>30

Dalle tabelle precedenti risultano evidenti le entità del potenziale di riduzione dei consumi di energia termica per riscaldamento ed acqua calda sanitaria che si ottengono da una buona riqualificazione energetica dell'edificio. Con una riqualificazione standard si arriva a consumi massimi sempre inferiori agli 85 kWh/mq/anno per le case monofamiliari più vecchie (per rendere l'idea, sempre entro una classe C CENED), fino ad arrivare a consumi inferiori ai 29 kWh/mq/anno (consumi da classe A CENED) per i blocchi di appartamenti più recenti, mantenendo comunque consumi medi entro i 50-60 kWh/mq/anno (classe B CENED). Le cose migliorano ulteriormente con una riqualificazione di tipo avanzato (che utilizza le migliori tecnologie disponibili), per cui i consumi massimi sono di poco superiori ai 50 kWh/mq/anno, fino a consumi minimi addirittura inferiori (anche se di poco) ai 20 kWh/mq/anno, ponendosi quindi in un range tra classe B e classe A CENED. Riassumendo, il margine di risparmio di energia ottenibile da riqualificazione energetica degli edifici è sicuramente molto ampio: per rendere l'idea si parla di all'incirca un ordine di grandezza tra i consumi *prima* e *dopo* la riqualificazione. Nei successivi Grafico 3.5 e Grafico 3.6, vengono presentati gli andamenti nel tempo dei valori delle tabelle precedenti con le rispettive linee di tendenza.

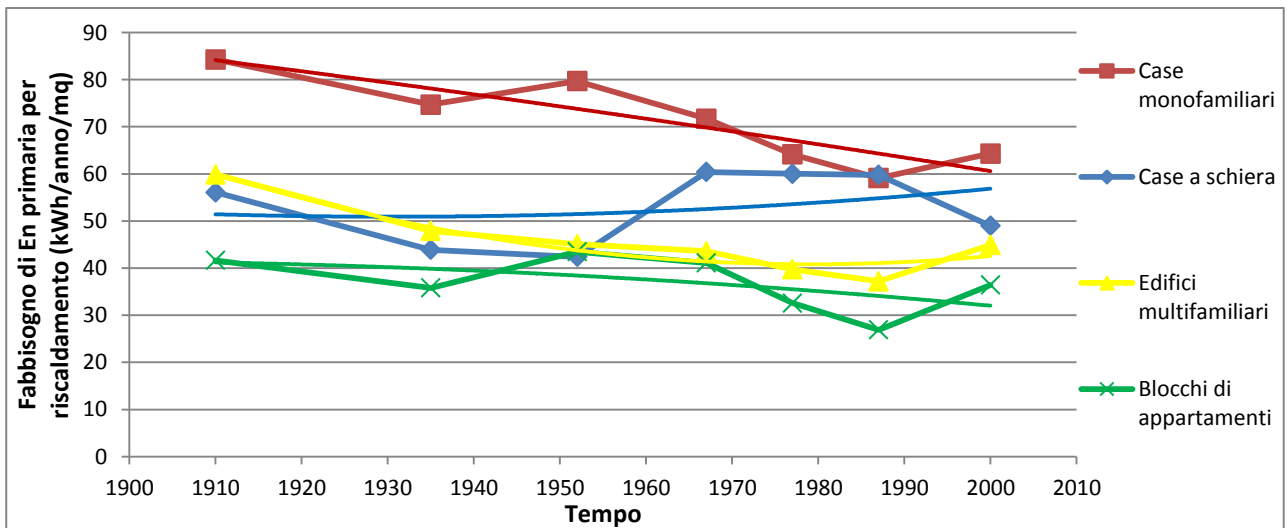


Grafico 3.5 Andamento del fabbisogno di energia termica per riscaldamento, al variare dell'età degli edifici per le 4 quattro tipologie edilizie (valori puntuali e linee di tendenza), nello scenario di riqualificazione standard

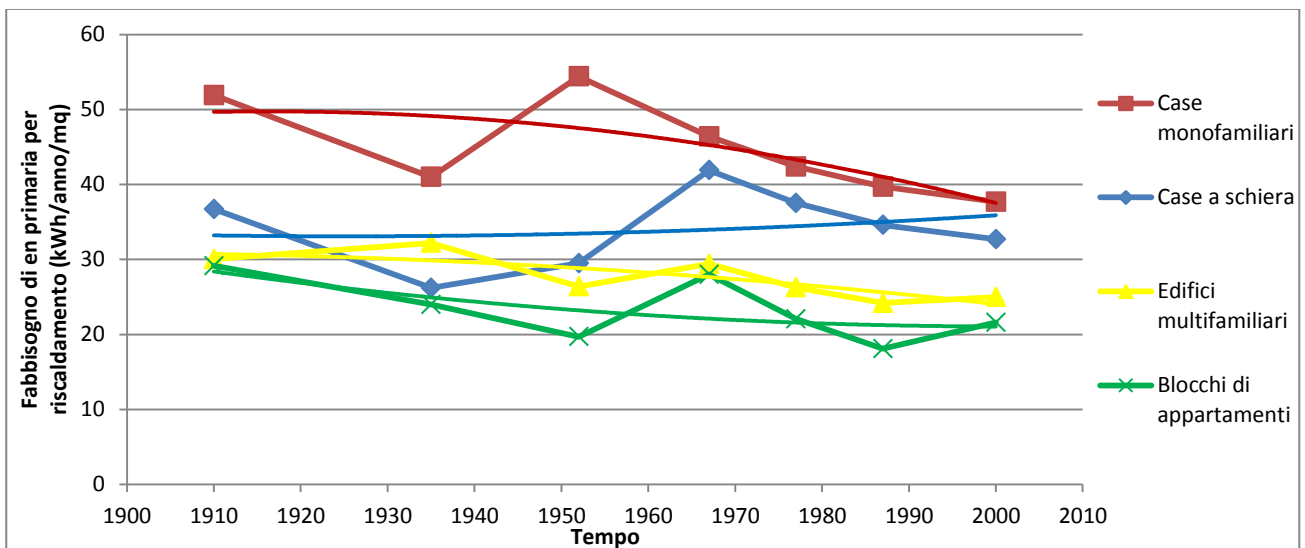


Grafico 3.6 Andamento del fabbisogno di energia termica per riscaldamento, al variare dell'età degli edifici per le 4 quattro tipologie edilizie (valori puntuali e linee di tendenza), nello scenario di riqualificazione avanzata

Bisogna comunque precisare che tali range di consumi degli scenari di riqualificazione sono i massimi teoricamente raggiungibili dalla riqualificazione energetica di un edificio; questo implica anche alcune limitazioni, per cui, da un punto di vista tecnico (escludendo quindi la complessa sfera economica), non tutti gli edifici sono indistintamente riqualificabili e non tutti sono riqualificabili in ogni ambito impiantistico. Per questo, come si vedrà nella parte applicativa del caso di studio, si è cercato di prendere questi dati come riferimento per definire degli opportuni scenari di efficientamento.

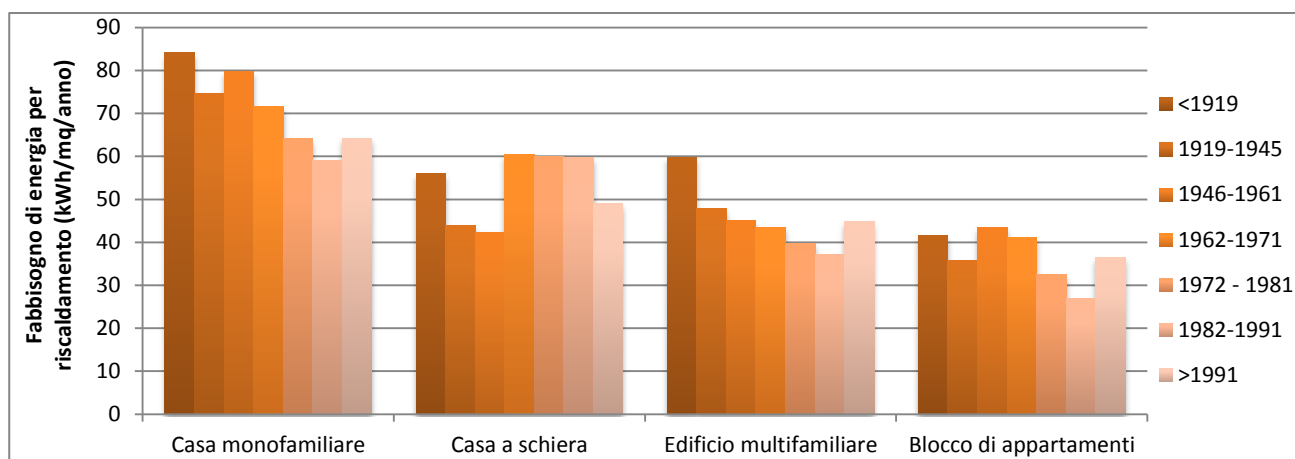


Grafico 3.7 Andamento dei consumi di energia termica per riscaldamento nel tempo per le quattro tipologie edilizie nello scenario di riqualificazione standard

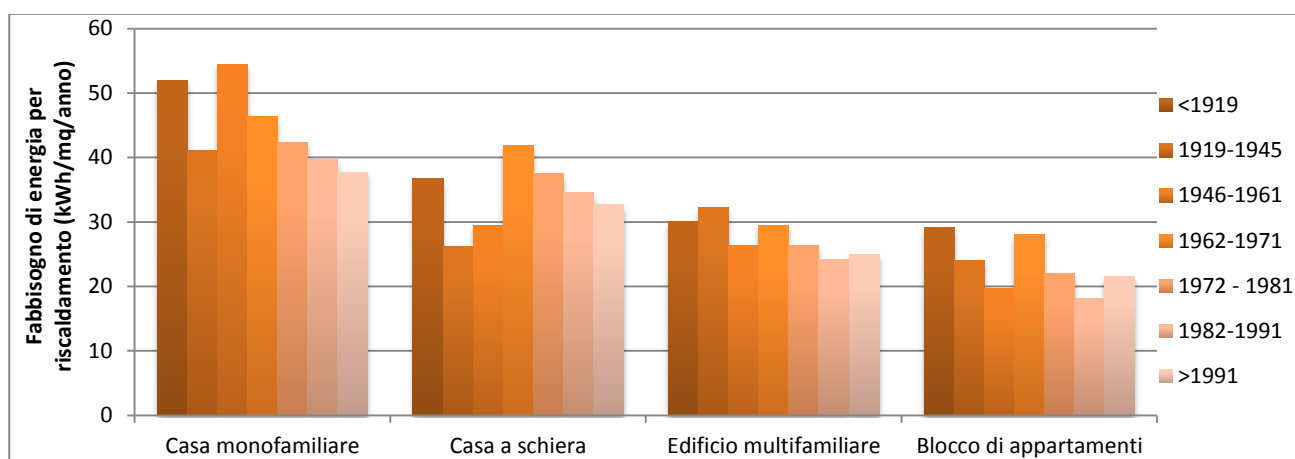


Grafico 3.8 Andamento dei consumi di energia termica per riscaldamento nel tempo per le quattro tipologie edilizie nello scenario di riqualificazione avanzata

3.2.4 Stima dei consumi elettrici degli edifici in scenari di efficientamento energetico

Per questa parte del modello ci si è rivolti ancora ai progetti dell'Intelligent Energy Europe. REMODECE ed EURECO quantificano infatti con percentuali intorno al 40% il potenziale di risparmio massimo ottenibile dall'efficientamento dei consumi elettrici (vedi Tabella 3.12).

Dal monitoraggio dei consumi elettrici di tutte le applicazioni elettriche delle utenze considerate, è possibile dire che il parco degli elettrodomestici (in particolare quelli più energivori, come frigoriferi, frigocongelatori, lavastoviglie, lavabiancheria, ...) risulta ormai obsoleto, e una sostituzione di tali elettrodomestici può portare sicuramente a forti risparmi energetici (oltre che economici, ovviamente). Per esempio la sostituzione di un frigocongelatore di almeno 10 anni con uno nuovo in classe A++ comporta una riduzione di circa 400 kWh/anno.

Per quanto riguarda l'illuminazione, il consumo medio annuo risulta pari a quasi 400 kWh, dato solitamente (per l'80% delle utenze considerate da MICENE) dalle inefficienti lampade ad incandescenza; sostituendo per esempio nei 3 punti luce principali tali lampade ad incandescenza con modelli a fluorescenza, si otterrebbero risparmi prossimi al 50%, mentre se si volessero sostituire tutte le lampade presenti il risparmio arriverebbe al 71%.

Importante e sorprendente al tempo stesso la questione degli stand-by, per cui per le abitazioni italiane i consumi da stand-by sono stimati essere nell'ordine dei 470 kWh/anno (il 15% circa della bolletta); ipotizzando

di eliminare gli stand-by per gli apparecchi audiovisivi ed una riduzione del tempo di stand-by del 75% per gli altri apparecchi si arriverebbe ad una riduzione di tali consumi dell'85% (il 12% della bolletta media).

Considerando nel loro complesso questi singoli interventi di efficientamento, REMODECE ed EURECO definiscono rispettivamente in 1.300 e 1.200 kWh/anno il massimo potenziale di risparmio energetico per utenza (vedi tabella e grafici successivi); tali valori sono quelli che sono stati considerati nella definizione degli scenari di consumo elettrico futuri.

Tabella 3.12 Valori del massimo potenziale di risparmio energetico considerati nel modello

	Max risparmio energetico potenziale	Fonte
per utenza	1.300 kWh/anno	REMODECE
per utenza	1.200 kWh/anno	EURECO

Ovviamente non è possibile definire, su una scala come quella urbana e in un modello come questo che valuta in un solo passaggio tutti gli edifici, le singole pratiche per incrementare l'efficienza e ridurre i consumi elettrici. Per questo, dato il valore del consumo attuale, si ipotizza un risparmio di energia elettrica che può essere fatto variare entro i 1.300 kWh/anno, o, in termini percentuali, entro il 40% del consumo elettrico attuale, ottenendo quindi il consumo elettrico dello scenario futuro.

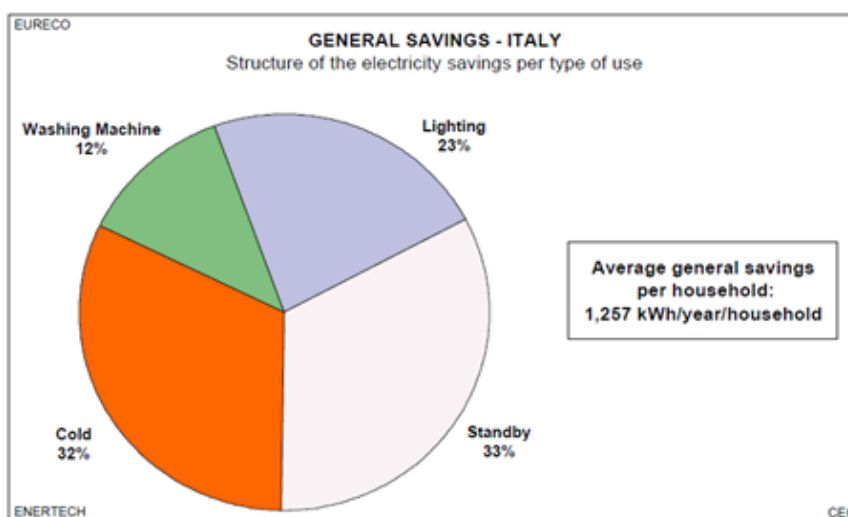


Figura 3.12 Suddivisione percentuale delle principali fonti di risparmio di energia elettrica per le utenze italiane monitorate (EURECO, 2000)

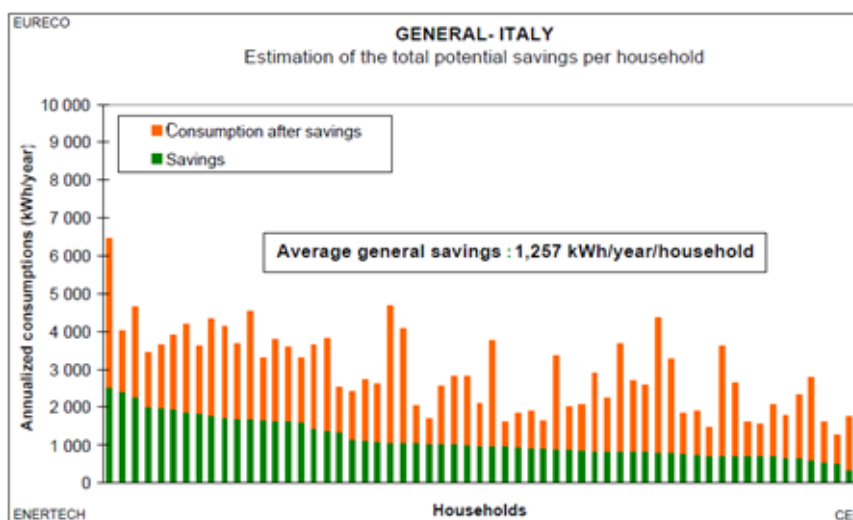


Figura 3.13 Confronto pre/post risparmio dei consumi delle abitazioni monitorate nel progetto EURECO, 2000

3.3 Definizione del modello per la stima del potenziale di energia da fonti rinnovabili

In questo paragrafo vengono presentate le tipologie impiantistiche per la produzione di energia da fonti rinnovabili considerate nel modello per ogni fonte (biomassa, sole, vento e pompe di calore). Per ogni impianto viene fornito un quadro generale, alcuni dati di base e le procedure di calcolo seguite per definire l'energia in output. Dopo ogni procedura viene illustrato in un grafico lo schema concettuale della procedura stessa, con *INPUT*, *CALCOLO* e *OUTPUT*, e con, su sfondo grigio, i parametri energetici e, su sfondo rosso, quelli spaziali. In origine le varie tipologie impiantistiche erano accompagnate da un'ampia introduzione a livello teorico, che, per non appesantire oltremodo questa parte, viene lasciata come appendice.

A livello operativo, tali procedure di calcolo sono state definite in un foglio di calcolo Excel, insieme a tutti i dati necessari alla stima dell'energia prodotta.

Nonostante all'interno della stima dei consumi di energia termica per gli scenari di riduzione della domanda siano già considerate misure di produzione di energia da rinnovabili, in questo paragrafo si riportano ugualmente anche tipologie impiantistiche in grado di fornire energia termica, nel caso in cui, in sviluppi futuri del modello, si vorrà considerare database differenti a cui riferirsi per la definizione dei consumi.

3.3.1 Produzione di energia da biomasse

Tra le varie tipologie di impianti di produzione di energia da biomasse si sono considerati impianti a combustione di biomassa (in forma di pellet o cippato) ed impianti a digestione anaerobica, sia da reflui zootecnici che da colture dedicate.

Impianti a combustione di biomassa

In questo lavoro di tesi sono stati considerati sia impianti di combustione per la produzione di energia termica che impianti di cogenerazione, in grado, cioè, di produrre allo stesso tempo energia termica ed elettrica. Questi verranno illustrati qui di seguito seguendo una logica di potenza, e quindi di fabbisogno termico soddisfabile crescente. Di seguito una tabella con le caratteristiche dei combustibili considerati.

Tabella 3.13 Confronto tra le specifiche tecniche di pellet e cippato considerate nei calcoli (fonte: Brunori, Legno ed energia)

	Pellet di legno	Chip di legno
<i>Potere calorifico netto</i>	17,0 GJ/t	13,4 GJ/t
	4,7 kWh/kg	3,7 kWh/kg
	3080 kWh/mc	750 kWh/mc
<i>Contenuto d'acqua (%peso t.q.)</i>	8%	25%
<i>Densità</i>	650 kg/mc	200 kg/mc
<i>Contenuto ceneri (%peso t.q.)</i>	0,5%	1%

Stufa a pellet

Una stufa pellet è un impianto per la produzione di energia termica in grado di soddisfare il fabbisogno di riscaldamento invernale sia di un singolo locale, che di un'intera abitazione, se ben isolata termicamente e non eccessivamente ampia, mediante semplici sistemi di ventilazione del calore. Funziona in un range di potenze di 3-11 kW, e può raggiungere rendimenti che sfiorano il 90%.

Caldia a pellet

Impianto in grado di soddisfare la domanda di calore ed acqua calda sanitaria di case monofamiliari, bifamiliari o di piccoli condomini, fino ad edifici di dimensioni maggiori, sempre se ben isolati termicamente. Esattamente come le classiche caldaie a combustibili fossili, il calore viene distribuito per via idraulica. I rendimenti sono simili a quelli delle stufe a pellet, mentre la potenza varia tra 5 e 35 kW. Questo tipo di impianti necessita di un locale appositamente dedicato, e possono essere alimentati in automatico.

Caldia a cippato

Sono generatori di piccola e media potenza, in grado di fornire sia calore che acqua calda sanitaria, impiegabili sia per l'uso domestico (anche a livello condominiale) che per piccole reti di teleriscaldamento, con potenze che variano quindi dai 35 kW fino anche ai 2-3 MW. Le caldaie a cippato presentano diverse caratteristiche analoghe a quelle a pellet, ma essendo alimentate con un combustibile meno denso e meno omogeneo, sono generalmente più robuste e più grandi, necessitando quindi di locali appositamente dedicati, anche per il deposito del combustibile.

Nella seguente tabella vengono riassunti i principali parametri di queste tre tecnologie impiantistiche.

Tabella 3.14 Tabella riassuntiva delle caratteristiche degli impianti a piccola e media taglia qui considerati
(fonte: Caputo, Impianti a biomassa)

	Stufa a pellet	Caldia a pellet	Caldia a cippato
<i>Applicazione principale</i>	Riscaldamento ambienti	Riscaldamento ambienti e produzione di ACS	Riscaldamento ambienti e produzione di ACS
<i>Luogo di installazione</i>	Luoghi maggiormente vissuti	Locale caldaia	Locale caldaia
<i>Area riscaldata</i>	Locale in cui è collocata e/o locali adiacenti	Edificio	Edificio, rete di teleriscaldamento
<i>Modalità di scambio termico</i>	Irraggiamento e/o convezione	Scambio termico con fluido vettore (acqua)	Scambio termico con fluido vettore (acqua)
<i>Range di potenza</i>	3 – 11 kW	3 – 35 kW	35 – 500 kW (edificio) 0.5 – 5 MW (teleriscald.)
<i>Rendimento</i>	80 – 90 %	80 – 85 %	75 – 85 %

Impianto di cogenerazione a biomassa

La cogenerazione unisce in un unico impianto la produzione di energia elettrica e calore, sfruttando in maniera ottimale l'energia primaria del combustibile: dopo che l'energia a temperatura più alta viene convertita in energia pregiata (elettrica), la parte residuale di energia a temperatura più bassa, anziché essere dissipata nell'ambiente, viene resa disponibile per le tipiche applicazioni termiche. La cogenerazione trova applicazione sia in ambito civile che industriale. Per quanto concerne il calore, esso può essere utilizzato sotto forma di vapore o acqua calda. Per quanto riguarda, invece, l'energia elettrica, grazie all'ampia diffusione delle reti di distribuzione non sussistono particolari problematiche. È invece opportuno sottolineare che per poter utilizzare l'energia termica prodotta è necessario che gli impianti di cogenerazione siano posti nelle vicinanze delle utenze termiche, cui il calore viene veicolato tramite teleriscaldamento. Per gli scopi di questo lavoro, si sono considerati impianti con potenze al massimo di pochi MW, con rendimenti complessivi tra il 70% e l'85% (fino a superare il 90% con alcuni impianti a ciclo Rankine organico - ORC)(vedi Tabella 3.15).

Tabella 3.15 Tabella riassuntiva delle caratteristiche generali degli impianti a cogenerazione (fonte: Caputo, Impianti a biomassa)

	Motori a combustione interna	Turbina a gas	Turbina a vapore	Turbina ORC
Range di potenza (MWel)	0,03 - 5	1 - 500 (0,01 - 2 microturbine)	0,2 - 250	0,4 - 3
Rendimento elettrico (%)	25 - 50	20 - 35	20 - 40	17 - 19
Rendimento termico (%)	30 - 45	60 - 75	35 - 50	78 - 80
Rendimento complessivo (%)	60 - 80	70 - 80	60 - 80	85 - 95
Rapporto tipico elettricità/calore	0,5 - 1	0,5 - 1	0,1 - 0,3	0,1 - 0,2

Procedure di calcolo per la produzione di energia da combustione di biomassa

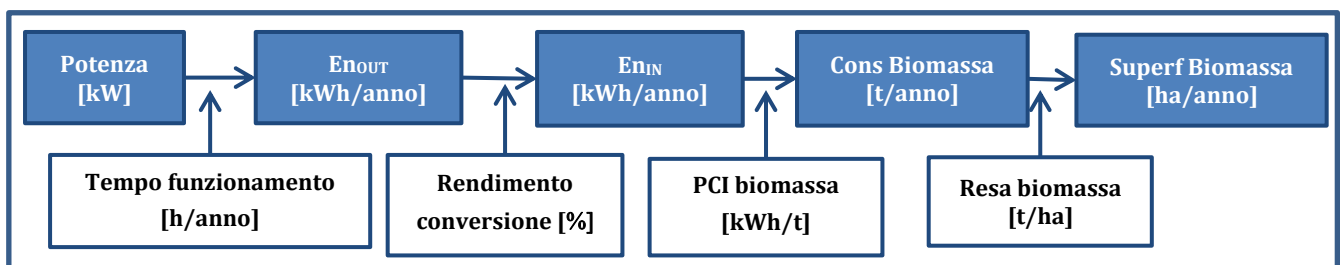


Figura 3.14 Schema concettuale seguito per il calcolo dell'energia prodotta da impianti di combustione a biomassa

Calcolo di energia termica prodotta e fabbisogno di biomassa per un impianto di potenza data

Mediante il seguente procedimento è possibile calcolare l'energia prodotta dall'impianto ($En_{OUT,anno}$) ed il relativo fabbisogno di combustibile nel corso dell'anno ($Cons_{biomassa,anno}$), data la potenza dell'impianto (P_{imp}), il rendimento (η_{conv}), il potere calorifico del combustibile ($PCI_{biomassa}$) ed il tempo annuo di funzionamento (t_{funz}):

Energia termica fornita dall'impianto all'utenza/e [kWh/anno]:

$$En_{OUT,anno} = P_{imp} [kW] * t_{funz} [h/anno]$$

Energia fornita dal combustibile all'impianto [kWh/anno]:

$$En_{IN,anno} = En_{OUT} [kWh/anno] / \eta_{conv} [\%]$$

Consumo annuo di combustibile [t/anno]:

$$Cons_{biomassa,anno} = En_{IN,anno} [kWh/anno] / PCI_{biomassa} [kWh/t]$$

Superficie per coltivazione biomassa [ha/anno]:

$$S_{biomassa,anno} [ha/anno] = Cons_{biomassa,anno} [t/anno] / Resa_{biomassa} [t/ha]$$

Inoltre, per gli impianti più potenti si è anche calcolato il numero di utenze soddisfabili dall'impianto di potenza data:

$$\#utenze = En_{OUT,anno} [kWh/anno] / En_{fabb,anno} [kWh/(anno * utenza)]$$

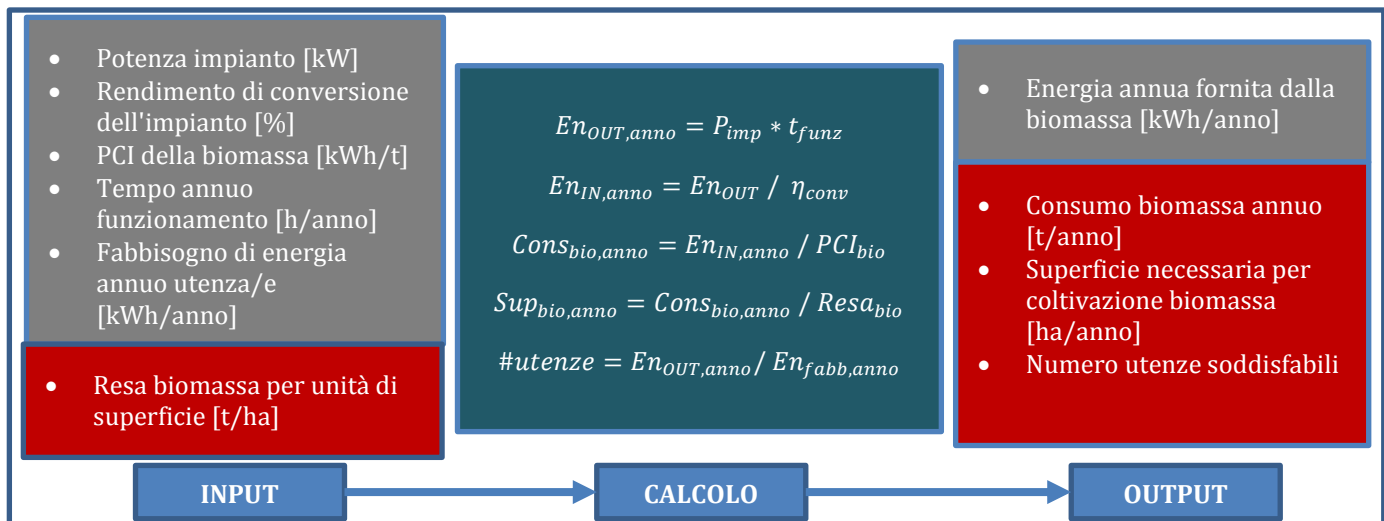


Figura 3.15 Schema riassuntivo del calcolo di energia termica e fabbisogno di biomassa per un impianto di potenza data

Calcolo della biomassa necessaria a soddisfare un dato fabbisogno di energia termica

Dato il fabbisogno annuo ($En_{fabb,anno}$) di energia termica (calore) necessario all'utenza/e in questione, si calcola, con un procedimento inverso rispetto al precedente, la quantità annua di combustibile necessaria per soddisfarlo, conoscendo il rendimento della macchina utilizzata (η_{conv}) e il potere calorifico del combustibile (PCI_{comb}).

Energia necessaria fornita dal combustibile [kWh/anno]:

$$En_{biomassa,anno} = En_{fabb,anno} [kWh/(anno * utenza/e)] / \eta_{conv} [%]$$

Consumo annuo di combustibile [t/anno]:

$$Cons_{biomassa,anno} = En_{biomassa,anno} [kWh/anno] / PCI_{biomassa} [kWh/t]$$

È poi eventualmente possibile calcolare la superficie ($S_{biomassa,anno}$) necessaria alla coltivazione della biomassa appena calcolata, conoscendone la resa ($Resa_{biomassa}$):

$$S_{biomassa,anno} [ha/anno] = Cons_{biomassa,anno} [t/anno] / Resa_{biomassa} [t/ha]$$

In questo modo è quindi possibile calcolare il fabbisogno di biomassa necessario a soddisfare un dato fabbisogno posto in partenza, e quindi dimensionare un impianto adatto a soddisfarlo:

$$P_{imp} = En_{fabb,anno} [kWh/(anno * utenza/e)] / t_{funz}[h/anno]$$

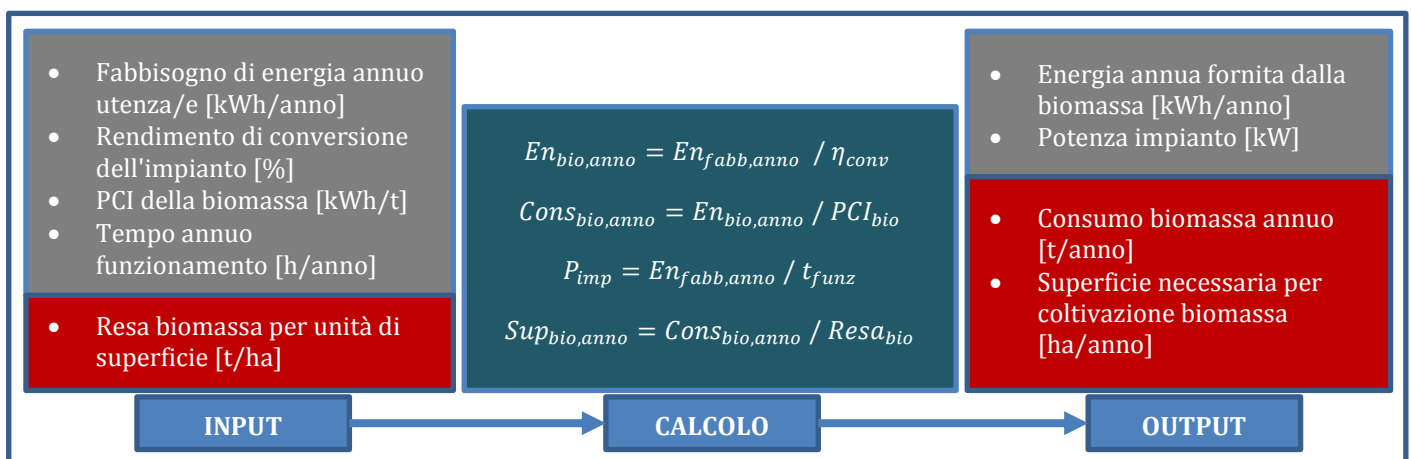


Figura 3.16 Schema riassuntivo del calcolo della biomassa necessaria a soddisfare un dato fabbisogno di energia

Calcolo di energia termica ed elettrica prodotte e fabbisogno di biomassa per un impianto a cogenerazione a biomassa di potenza data

Mediante il seguente procedimento è possibile calcolare l'energia prodotta dall'impianto ($En_{i,OUT,anno}$) ed il relativo fabbisogno di combustibile nel corso dell'anno ($Cons_{biomassa,anno}$), data la potenza complessiva dell'impianto (P_{imp}), il rendimento ($\eta_{i,conv}$), il potere calorifico del combustibile ($PCI_{biomassa}$) ed il tempo annuo di funzionamento (t_{funz} , dato dal numero di ore in un anno, moltiplicato per un fattore di disponibilità FD [%]); siccome da un impianto di cogenerazione è possibile ricavare sia energia elettrica che termica, il pedice i sta per questa distinzione:

Energia termica fornita dall'impianto alle utenze [$kWh/anno$]:

$$En_{th,OUT,anno} = P_{imp} [kW] * t_{funz} [h/anno] * FD [%] * \eta_{th,conv} [%]$$

Energia termica fornita dall'impianto alle utenze [$kWh/anno$]:

$$En_{el,OUT,anno} = P_{imp} [kW] * t_{funz} [h/anno] * FD [%] * \eta_{el,conv} [%]$$

Consumo annuo di combustibile [$t/anno$]:

$$Cons_{biomassa,anno} = \frac{P_{imp} [kW] * t_{funz} [h/anno] * FD [%]}{(\eta_{el,conv} [%] + \eta_{th,conv} [%]) * PCI_{biomassa} [kWh/t]}$$

Superficie per coltivazione biomassa [$ha/anno$]:

$$S_{biomassa,anno} [ha/anno] = Cons_{biomassa,anno} [t/anno] / Resa_{biomassa} [t/ha]$$

Inoltre, si è anche calcolato il numero di utenze soddisfabili dall'impianto a cogenerazione di potenza data, sia quanto ad energia elettrica che termica:

$$\#utenze = En_{i,OUT,anno} [kWh/anno] / En_{fabb\ i,anno} [kWh/(anno * utenza)]$$

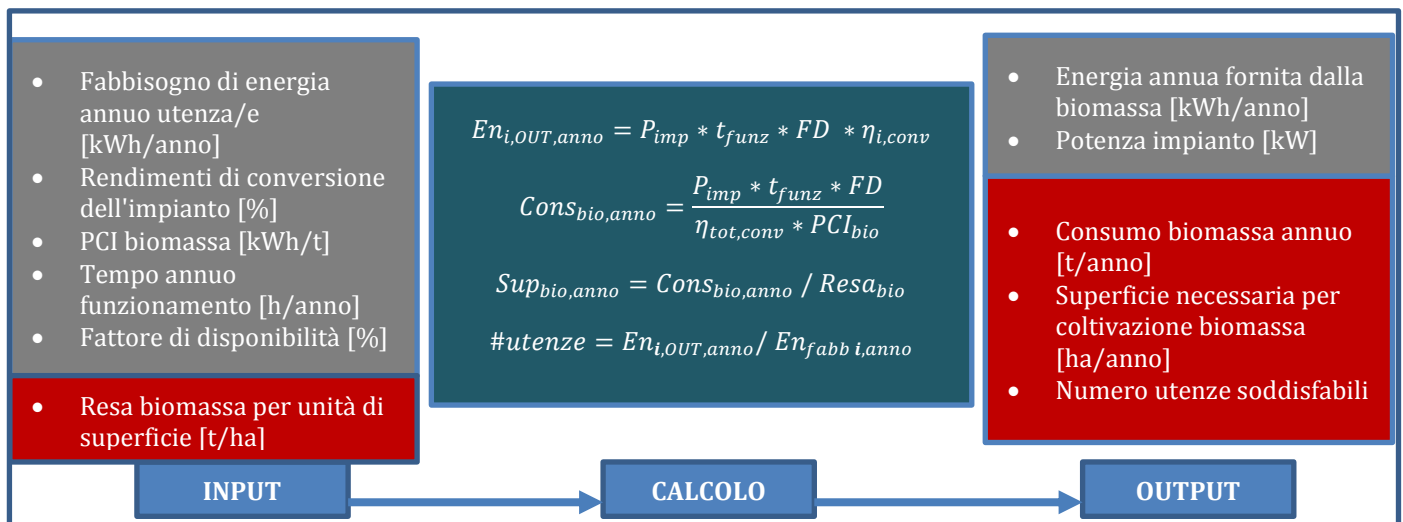


Figura 3.17 Schema riassuntivo del calcolo di energia prodotta e del fabbisogno di biomassa per un dato impianto a cogenerazione

Limiti e assunzioni fatte

Per quanto riguarda i consumi di suolo relativi alla produzione di biomassa come combustibili:

- si è ipotizzato per semplicità che il pellet non incida, assumendo che venga prodotto interamente da biomassa di scarto;

- per il cippato, invece, si hanno talvolta percentuali più consistenti di biomasse provenienti da colture appositamente dedicate (e.g. SRF) e da residui agroindustriali locali; per questo motivo la superficie dedicata verrà valutata caso per caso, facendo variare tali percentuali.

Impianti di digestione anaerobica

La digestione anaerobica è un processo biochimico che, in assenza di ossigeno (condizioni anaerobiche), porta alla degradazione della sostanza organica per mezzo di microrganismi batterici, che la trasformano in una miscela di gas, composta principalmente da anidride carbonica e metano, denominata *biogas*. Una volta prodotto all'interno del digestore, il biogas, dopo alcuni pretrattamenti, viene condotto al cogeneratore, che ha il compito di bruciare il biogas in input generando in modo combinato energia elettrica e termica. Solitamente l'energia elettrica viene messa in rete, mentre il calore viene utilizzato per l'autoconsumo dell'impianto, fornendo l'energia necessaria per il riscaldamento dei digestori.

Un aspetto fondamentale è quello relativo alla biomassa utilizzata nell'impianto per produrre biogas. Le biomasse considerate in questo modello sono le seguenti (vedi anche Tabella 3.16):

- *Reflui zootecnici*: tutti i reflui zootecnici sono adatti all'utilizzo come biomassa per impianti di biogas, anche se la resa non è molto elevata, mentre la loro reperibilità è sicuramente alta in paesi, come l'Italia, che sviluppano in particolar modo l'allevamento zootecnico. I reflui più utilizzati sono *liquame suino, liquame bovino e deiezioni avicole*, e rispetto a colture dedicate hanno il vantaggio della valorizzazione di un rifiuto e del minimo consumo di suolo agricolo.
- *Colture energetiche*: si tratta delle colture prodotte espressamente per il loro utilizzo in questo tipo di impianti. Tra le più utilizzate troviamo il mais, il sorgo, il triticale, il frumento, la segale, ecc., biomasse caratterizzate ad elevato contenuto di sostanza secca. Questa categoria presenta il grosso svantaggio di essere in diretta competizione con le colture di tipo alimentare.

Tabella 3.16 Produzione potenziale di biogas e metano di varie biomasse agricole (fonte: Ragazzoni A., *Biogas*)

Biomassa	Solidi totali (% su biomassa)	Solidi volatili (% su ST)	Biogas (m ³ /tSV)	Metano (%) (m ³ /tTQ)
<i>Liquami di vacche da latte</i>	10,5	83	325	65 18
<i>Liquami bovini da carne</i>	12	80	280	65 17
<i>Liquame suino</i>	2,5	85	450	67 6
<i>Letame fresco</i>	23	78	290	63 33
<i>Letame maturo</i>	45	60	240	62 40
<i>Lettiera avicola</i>	60	68	350	65 93
<i>Contenuto ruminale</i>	16	85	360	65 32
<i>Silomais</i>	35	95	640	52 111
<i>Insilato di triticale</i>	30	92	550	52 79
<i>Insilato di frumento</i>	30	92	520	52 75
<i>Insilato di segale</i>	30	92	535	54 80
<i>Insilato di sorgo zuccherino</i>	20	95	510	52 50

Quanto alla potenza, un impianto a biogas può andare dai 100 kW, tipici di un impianto a soli reflui, fino ad 1 MW, tipico di grossi impianti a colture dedicate scarti agroindustriali. La taglia tipica di un medio impianto a colture dedicate e reflui zootecnici varia tra 300 e 500 kW.

Procedure di calcolo per la produzione di energia da biogas

In Figura 3.18 lo schema concettuale seguito. Con *Portata biomassa annua* si intende genericamente la biomassa che entra nell'impianto, che va, come detto nei precedenti paragrafi, dai reflui zootecnici alle colture dedicate, passando per residui di vario tipo.

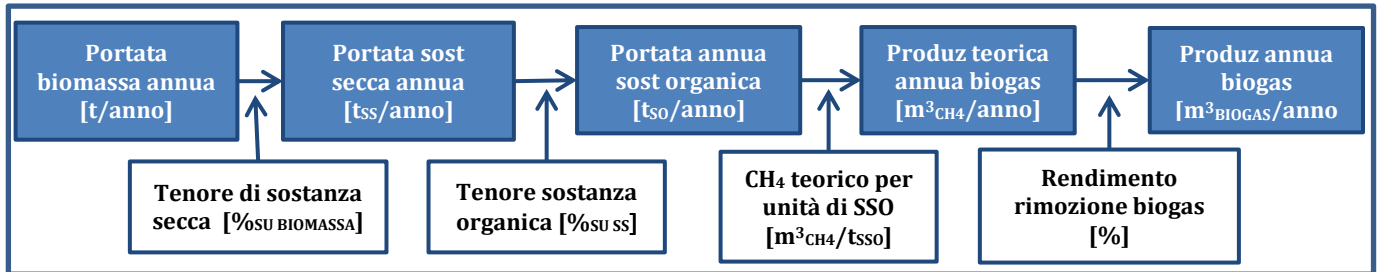


Figura 3.18 Schema concettuale seguito per il calcolo del biogas prodotto data una certa quantità di biomassa in ingresso

Calcolo del biogas prodotto da reflui zootecnici

Calcolo del biogas ottenibile da reflui zootecnici, dato il numero di capi ($n^{\circ}capi$) della specie i , la relativa quantità di reflui prodotti giornalmente ($Ref_{day,i}$), la percentuale di sostanza secca dei reflui ($\%SS_i$) e la percentuale di sostanza organica ($\%SO_i$) sulla sostanza secca totale. Inoltre, è necessario conoscere il numero di giorni di funzionamento dell'impianto (e di produzione dei reflui), il metano teoricamente producibile per unità di massa di sostanza organica ($CH_{4,teorico,i}$) ed il rendimento di rimozione del metano da essa ($\eta_{rimozione,i}$). Nel caso in cui si avessero più specie, si va semplicemente a sommare il volume finale di biogas prodotto di ogni specie i .

Portata giornaliera di reflui [$m^3/giorno$] o [$t/giorno$]:

$$Q_{giorno} = n^{\circ}capi [capo] * Ref_{giorno} [m^3 (o t)/giorno * capo]$$

Portata annuale di reflui [$m^3/anno$] o [$t/giorno$]:

$$Q_{anno,i} = Q_{giorno,i} [m^3 (o t)/giorno] * t_{funz} [giorni]$$

Portata di sostanza secca [$m^3/anno$] o [$t/giorno$]:

$$SS_{anno,i} = Q_{anno,i} [m^3 (o t)/giorno] * \%SS_i [\%]$$

Portata di sostanza secca organica [$m^3/anno$] o [$t/giorno$]:

$$SSO_{anno,i} = SS_{anno,i} [m^3 (o t)/giorno] * \%SO_i [\%]$$

Produzione teorica di metano [$Nm^3_{CH_4}/anno$]:

$$CH_{4,ref,i} = SSO_{anno,i} * CH_{4,teorico,i} [Nm^3_{CH_4}/t_{SSO}]$$

Produzione di biogas da reflui [$Nm^3_{biogas}/anno$]:

$$biogas_{ref,i} = CH_{4,ref,i} [Nm^3_{CH_4}/anno] * \eta_{rimozione,i} [\%]$$

Calcolo biogas prodotto da colture dedicate

Si illustra la procedura per il calcolo del biogas ottenibile da coltivazioni agricole, data la biomassa secca raccolta nell'anno ($t_{SS,j}/anno$) (suddivisa nelle eventuali più specie (o eventualmente la percentuale di sostanza secca se si ha a disposizione solamente il dato relativo alla biomassa totale raccolta e la percentuale di sostanza organica ($\%SO_j$) sulla sostanza secca totale).

Inoltre, è necessario conoscere il metano teoricamente producibile per unità di massa di sostanza organica ($CH_{4,teorico,j}$) ed il rendimento di rimozione del metano da essa ($\eta_{rimozione,j}$).

Anche qui, nel caso in cui si avessero più specie, si va a sommare il volume finale di biogas prodotto da ogni specie j .

Portata di sostanza secca organica [t/anno]:

$$SSO_{anno,j} = SS_{anno,j} [t/anno] * \%SO_j [\%]$$

Produzione di biogas dall'insilato j [$Nm^3_{CH_4}/anno$]:

$$CH_{4,ins,j} = SSO_{anno,j} * CH_{4,teorico,j} [Nm^3_{CH_4}/t_{SS,j}] * \eta_{rimozione,j} [\%]$$

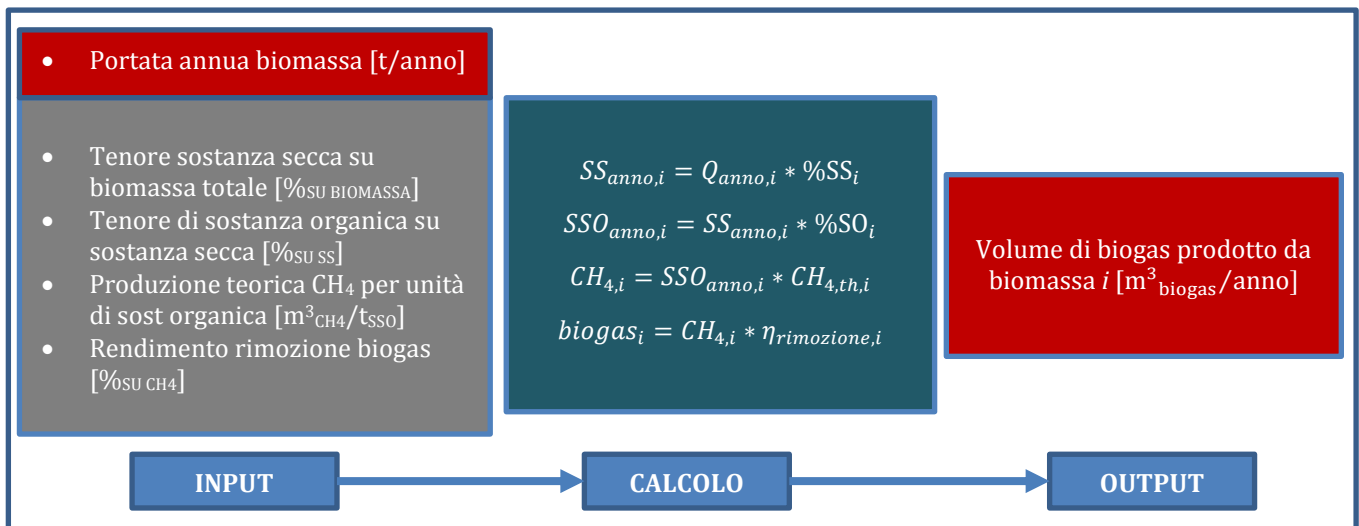


Figura 3.19 Schema riassuntivo per il calcolo della produzione di biogas, valido per le due procedure di calcolo precedenti (biogas da reflui e biogas da insilati)

Calcolo energia prodotta da biogas

Il calcolo dell'energia totale prodotta parte considerando il volume di biogas ottenuto dalla somma di tutti i contributi dalle diverse fonti (liquami e colture), considerando poi il potere calorifico inferiore (PCI) del metano ed il rendimento di conversione elettrico della macchina ($\eta_{conv\ macchina}$):

Biogas prodotto [$Nm^3_{biogas}/anno$]:

$$biogas_{tot} = \sum_i biogas_{ref,i} + \sum_j biogas_{ins,j}$$

Energia in ingresso [MWh/anno]:

$$En_{IN} = CH_{4,tot} [Nm^3_{CH_4}/anno] * PCI_{CH_4} [MWh/m^3_{CH_4}]$$

Energia in uscita [MWh/anno]:

$$En_{OUT} = En_{IN} * \eta_{conv\ macchina}$$

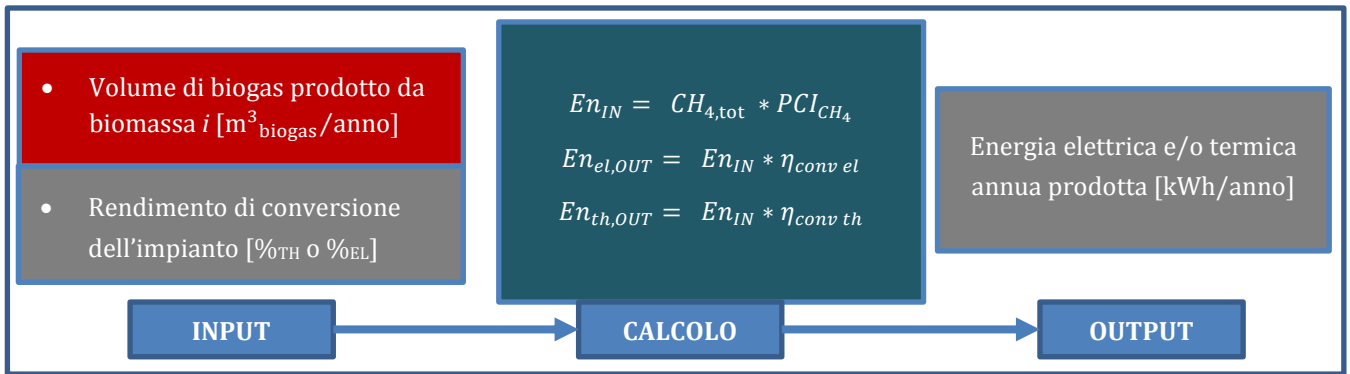


Figura 3.20 Schema riassuntivo per il calcolo della produzione di energia da biogas

Limiti e assunzioni fatte

Per la produzione di energia da digestione anaerobica, si sono considerati solamente impianti di stampo agricolo, escludendo quindi impianti a fanghi di depurazione, impianti industriali, considerando cioè come substrati solo reflui zootecnici e colture dedicate.

3.3.2 Energia dal sole

Le tecnologie di trasformazione della radiazione solare in energia sfruttabile considerate all'interno della metodologia di calcolo si riconducono alle due seguenti tipologie impiantistiche:

- *Impianti fotovoltaici*, che producono energia elettrica sfruttando le proprietà fotoelettriche di particolari elementi semiconduttori, costituenti i pannelli fotovoltaici, in grado di generare elettricità se colpiti dalla radiazione solare;
- *Impianti a solare termico*, che forniscono energia termica mediante un liquido termovettore, contenuto all'interno dei pannelli, che cede calore tramite uno scambiatore all'acqua contenuta in un serbatoio d'accumulo.

Procedure di calcolo per la produzione di energia da impianti a solare fotovoltaico

Calcolo della produzione di energia elettrica da solare fotovoltaico

La quantità di energia elettrica che è possibile produrre da un impianto solare fotovoltaico dipende dalla superficie di pannelli necessaria per un kW di picco (S_{kWp}), funzione principalmente dei materiali utilizzati, e dalla produzione annuale di energia elettrica per ogni kW di picco (En_{kWp}), funzione dell'area geografica e di alcune condizioni di funzionamento.

Tali grandezze sono ormai note e tabulate, quindi i calcoli si rivolgono semplicemente alla valutazione della superficie (S_{tot}) necessaria a soddisfare un certo fabbisogno di energia elettrica ($En_{da\ soddisfare}$) (vedi Figura 3.21):

Superficie necessaria a soddisfare un certo fabbisogno di energia elettrica [m^2]:

$$S_{tot} = \#kW_p [kW_p] * S_{kW_p} [m^2/kW_p]$$

dove

$$\#kW_p = \frac{En_{da\ soddisfare} [kWh/anno]}{En_{kW_p} [kWh/kW_p]}$$

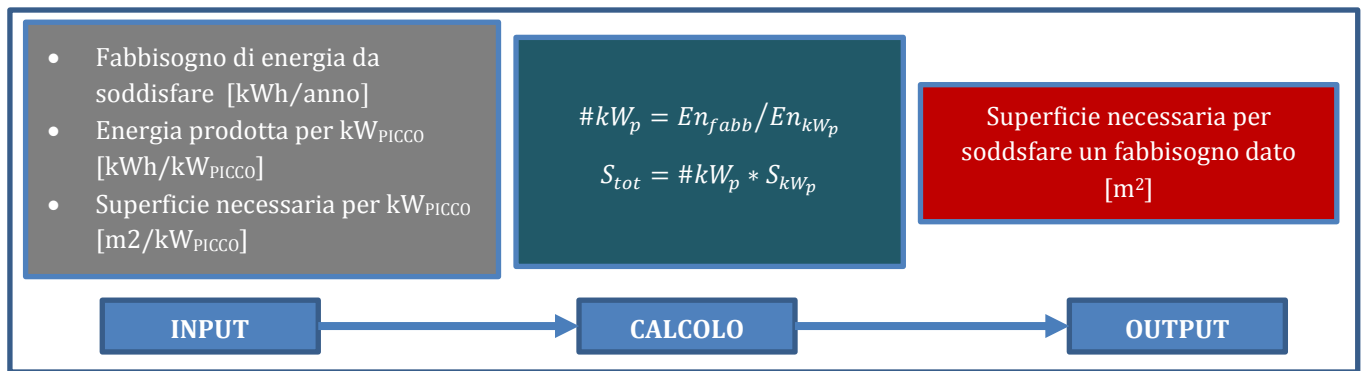


Figura 3.21 Schema per il calcolo della superficie di un impianto fotovoltaico per un dato fabbisogno di energia elettrica

o, viceversa, alla valutazione della quantità di energia elettrica che è possibile produrre nota la superficie disponibile (S_{disp}) da destinarsi ai pannelli fotovoltaici (vedi Figura 3.22):

Energia elettrica che è possibile produrre da una data superficie di pannelli FV [kWh_{anno}]:

$$En_{prod} = \#kW_p [kW_p] * En_{kW_p} [kWh/kW_p]$$

dove

$$\#kW_p = \frac{S_{disp} [m^2]}{S_{kW_p} [m^2/kW_p]}$$

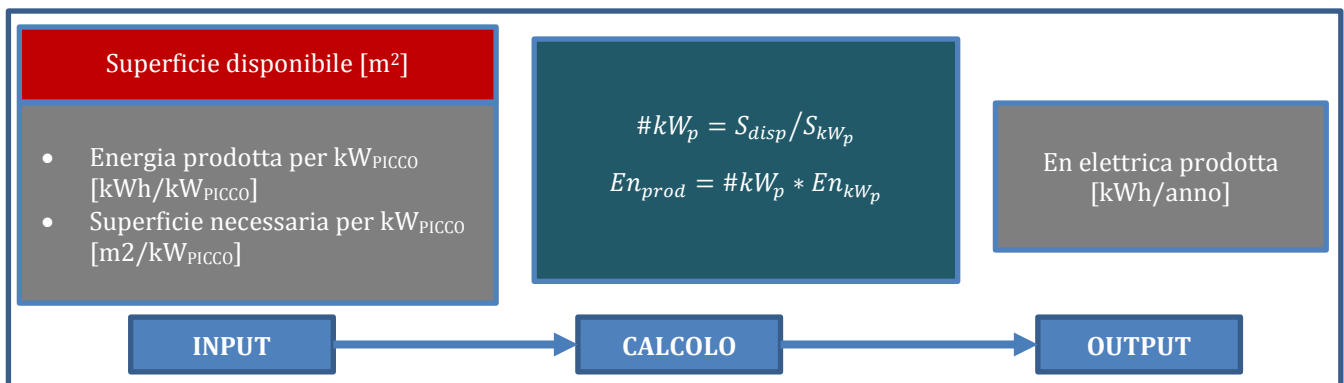


Figura 3.22 Schema per il calcolo della produzione di energia elettrica da un dato impianto fotovoltaico

Limiti e assunzioni

Per quanto riguarda la stima dell'energia elettrica da impianto fotovoltaico, in Tabella 3.17 vengono presentati i valori di superficie di pannello FV per kWp considerati, esprimendo perciò in tale dato anche il rendimento dei materiali stessi, e quindi l'efficienza globale del pannello.

Tabella 3.17 Valori di superficie per ogni kWp delle principali tecnologie di pannelli FV (Sconamiglio, Fotovoltaico negli edifici, 2012)

Spazio per kWp [m^2/kWp]	
Si Monocristallino	8
Si Policristallino	10
Si Amorfo	16
CdTe	11
CIS	9

Per quanto riguarda la radiazione solare incidente utile, si è utilizzato il database del Joint Research Center, riguardante i kWh ottenibili per ogni kW di picco per pannelli orientati in modo ottimale (vedi Figura 3.23); nel

caso in cui l'inclinazione e l'orientamento non siano ottimali, si sono sfruttati i fattori di conversione di Tabella 3.18.

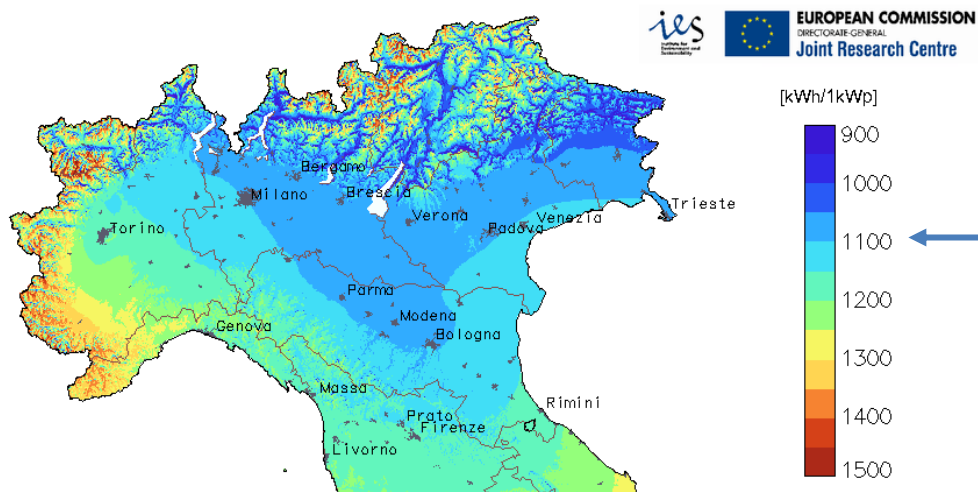


Figura 3.23 Mappa dell'energia elettrica generata per kWp di un impianto fotovoltaico con inclinazione ottima (30°) (jRC, PVGIS)

Tabella 3.18 Fattori di correzione da applicare ai valori di irraggiamento su superficie ottimale (Sconamiglio, Fotovoltaico negli edifici, 2012)

		Inclinazione			
		0°	30°	60°	90°
Orientamento	Est	0,93	0,90	0,78	0,55
	Sud-Est	0,93	0,96	0,88	0,66
	Sud	0,93	1,00	0,91	0,68
	Sud-Ovest	0,93	0,96	0,88	0,66
	Ovest	0,93	0,90	0,78	0,55

Procedura calcolo per la produzione di energia da impianti a solare termico

Calcolo superficie di pannelli solari termici per soddisfare un dato fabbisogno di ACS

La superficie dei collettori solari si calcola come rapporto tra calore necessario a scaldare la quantità di acqua calda sanitaria corrispondente al fabbisogno termico ($Q_{ACS,anno}$) e l'energia captabile dai collettori a disposizione ($En_{mq,anno}$) (vedi Figura 3.24):

Fabbisogno termico annuo [$kWh/anno$]:

$$Q_{ACS,anno} = c_{s,H_2O} [Kwh/kg * °C] * m_{ACS} \left[\frac{kg}{giorno} \right] * \Delta T [°C] * 365 \left[\frac{giorni}{anno} \right] * C_{copertura} [\%]$$

Dove:

- c_{s,H_2O} è il calore specifico dell'acqua, che vale $0.00116 Kwh/kg * °C$
- ΔT è la differenza di temperatura tra l'acqua in ingresso all'impianto (solitamente pari a $15 °C$) e l'acqua in uscita da esso (pari a $50 °C$)
- m_{ACS} è la massa di acqua calda sanitaria necessaria giornalmente per persona moltiplicata per il numero di persone da servire
- $C_{copertura}$ è un coefficiente che indica la percentuale di fabbisogno di ACS che si vuole coprire.

Energia captabile per unità di superficie [$kWh/mq * anno$]:

$$En_{mq,anno} = En_{mq,giorno} [kWh/mq * giorno] * 365 \left[\frac{giorni}{anno} \right] * \eta_{conv}$$

Dove:

- $En_{mq,giorno}$ è l'irradiazione solare media giornaliera sulla superficie terrestre, variabile a seconda dell'inclinazione dei pannelli stessi
- η_{conv} è il rendimento di conversione dei collettori solari, che varia solitamente tra 0.5 e 0.8.

Quindi, la superficie $[mq]$ necessaria a soddisfare il fabbisogno di acqua calda sanitaria dato si calcola come:

$$S_{tot} = \frac{Q_{ACS,anno}}{En_{mq,anno}}$$

È possibile poi calcolare il numero di collettori solari necessari a soddisfare il suddetto fabbisogno di ACS data la superficie del singolo collettore solare:

$$\#collettori = \frac{S_{tot}}{S_{collettore}}$$

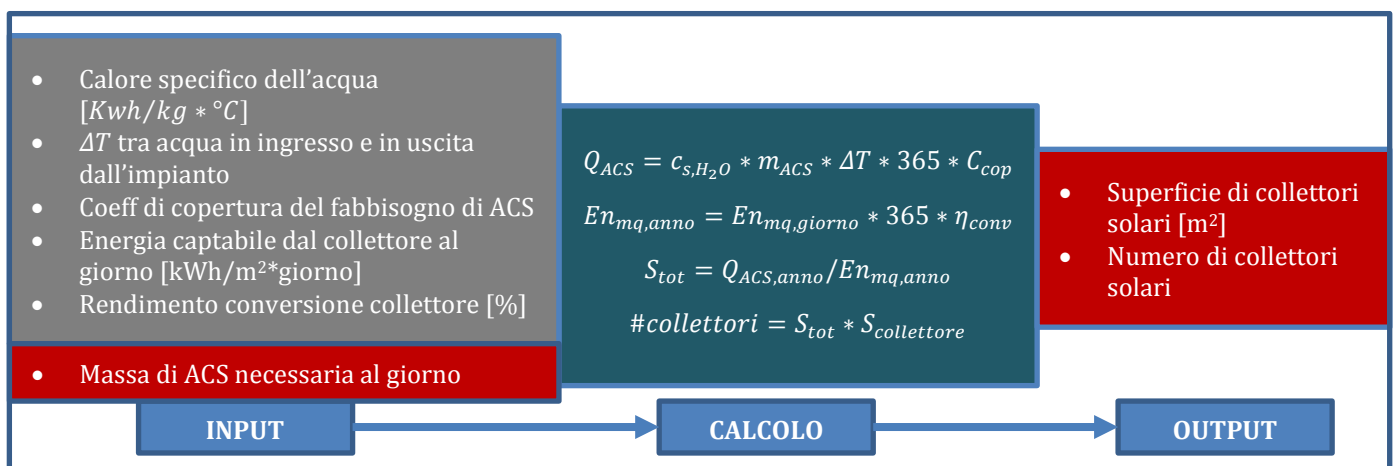


Figura 3.24 Schema riassuntivo per il calcolo della superficie di collettori solari necessaria per soddisfare un dato fabbisogno di ACS

Calcolo superficie di pannelli solari termici per soddisfare una quota di un dato fabbisogno di energia termica per riscaldamento

Come detto nei precedenti paragrafi, un impianto solare termico può essere anche in grado di coprire una quota parte (15-25%) del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento degli edifici. La superficie dei collettori solari si calcola come rapporto tra energia termica ($Q_{th, anno}$) necessaria a soddisfare la quota prefissata di fabbisogno termico ($Q_{fabb, anno}$) e l'energia captabile dai collettori a disposizione ($En_{mq,anno}$) (vedi Figura 3.25):

Energia termica necessaria a soddisfare la quota di fabbisogno termico annuo $[kWh/anno]$:

$$Q_{th, anno} = C_{copertura} [\%] * Q_{fabb, anno} [kWh/anno]$$

Dove:

- $C_{copertura}$ è il coefficiente che indica la percentuale di fabbisogno di energia termica per il riscaldamento che si vuole coprire.

Energia captabile per unità di superficie $[kWh/mq * anno]$:

$$En_{mq,anno} = En_{mq,giorno} [kWh/mq * giorno] * 365 \left[\frac{giorni}{anno} \right] * \eta_{conv}$$

Dove:

- $En_{mq,giorno}$ è l'irradiazione solare media giornaliera sulla superficie terrestre, variabile a seconda dell'inclinazione dei pannelli stessi
- η_{conv} è il rendimento di conversione dei collettori solari, che varia solitamente tra 0.5 e 0.8.

Quindi, la superficie $[mq]$ necessaria a soddisfare il fabbisogno di acqua calda sanitaria dato si calcola come:

$$S_{tot} = \frac{Q_{th, anno}}{En_{mq, anno}}$$

È possibile poi calcolare il numero di collettori solari necessari a soddisfare il suddetto fabbisogno di energia termica data la superficie del singolo collettore solare:

$$\#collettori = \frac{S_{tot}}{S_{collettore}}$$

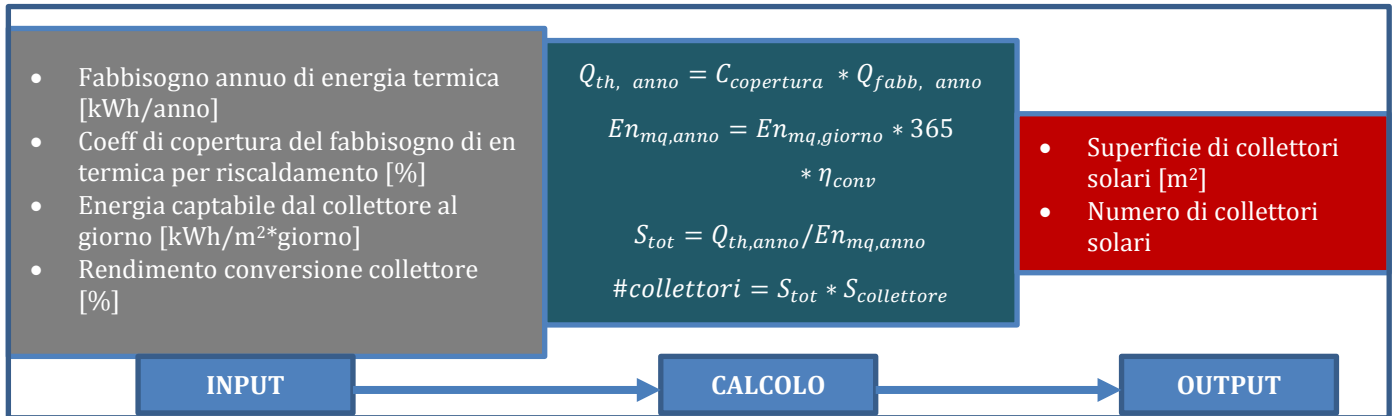


Figura 3.25 Schema riassuntivo per il calcolo della superficie di collettori solari necessaria per soddisfare una quota di un dato fabbisogno di energia termica per riscaldamento ambienti

Calcolo fabbisogno di ACS soddisfabile da un dato impianto solare termico

È possibile calcolare la quantità di acqua calda sanitaria che è possibile fornire da una dato impianto solare termico (noti, cioè, rendimento e superficie totale) semplicemente mediante un procedimento inverso rispetto al precedente:

$$Q_{ACS, anno} = S_{tot} * En_{mq, anno}$$

Conoscendo quindi la quantità di energia producibile, è possibile calcolare la massa (o indifferentemente il volume, essendo per l'acqua 1 kg = 1 l) di acqua calda sanitaria corrispondente, e quindi il numero di persone che l'impianto può soddisfare.

Limiti e assunzioni

Per il calcolo della radiazione solare utile, si è partiti dai dati di radiazione solare incidente su superficie orizzontale (Milano: 1400 kWh/m²), per poi eventualmente correggerla con i valori di Tabella 3.19, che tengono conto di una maggiore efficienza di captazione per configurazioni rivolte a Sud e con un angolo di incidenza di 30° sull'orizzontale.

Tabella 3.19 Fattori di correzione da applicare ai valori di irraggiamento su superficie orizzontale (Ferrari, 2008)

		Inclinazione			
		0°	30°	60°	90°
Orientamento	Est	1	0,97	0,84	0,59
	Sud-Est	1	1,03	0,95	0,71
	Sud	1	1,08	0,98	0,73
	Sud-Ovest	1	1,03	0,95	0,71
	Ovest	1	0,97	0,84	0,59

3.3.3 Pompe di calore ed energia geotermica

La pompa di calore è una macchina in grado di trasferire calore da un ambiente a temperatura più bassa ad un altro a temperatura più alta. Tali sorgenti possono essere diverse; tra esse nel presente modello si sono considerate:

- Pompe di calore ad aria esterna
- Pompe di calore ad acqua
- Pompe di calore geotermiche (a bassa profondità)

Le precedenti tipologie di pompe di calore sono poste in ordine di efficienza solitamente crescente; infatti, il COP (coefficiente di prestazione) delle pompe di calore ad aria è mediamente pari a 2,5-3, mentre il COP delle pompe di calore geotermiche può arrivare anche a 4-4,5 (cioè per ogni kWh elettrico consumato, vengono forniti 4-4,5 kWh termici all'utenza) (Basta e Minchio, 2008).

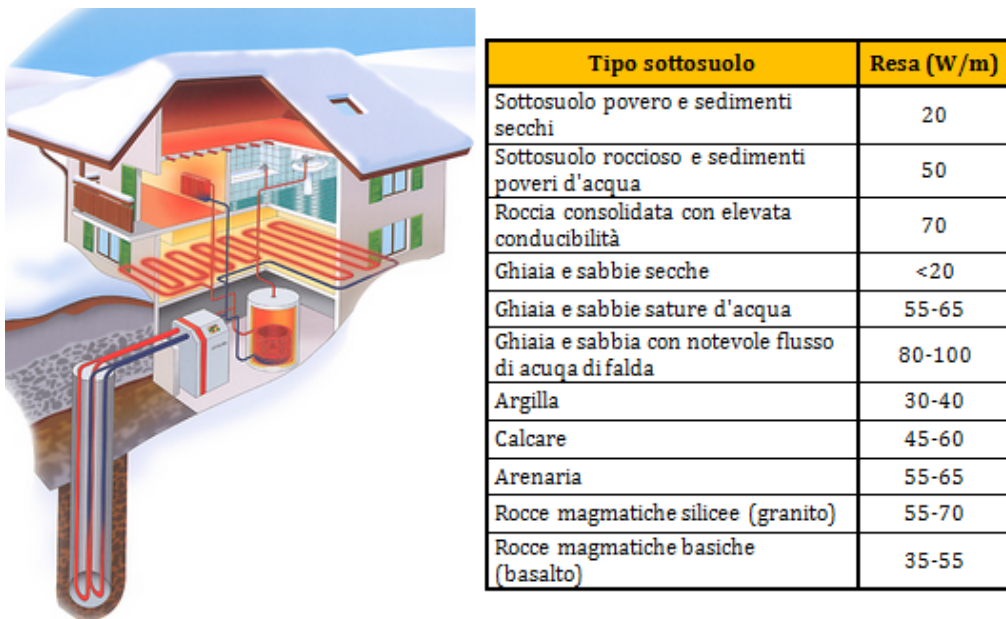


Figura 3.26 Spaccato di un impianto a sonda geotermica e tabella dei valori con le rese delle principali tipologie di sottosuolo per sonde geotermiche verticali (fonte: Caleffi, Idraulica)

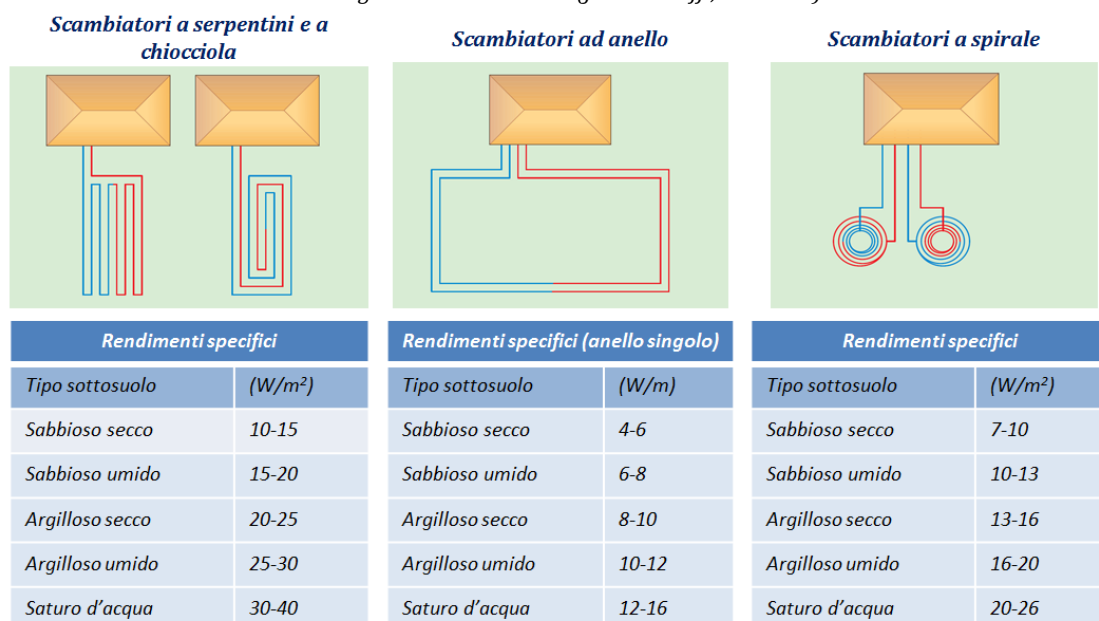


Figura 3.27 Rendimenti per unità di superficie o di lunghezza dei principali scambiatori a bassa profondità (fonte: Caleffi, Idraulica)

Procedure di calcolo seguite

In questo paragrafo sono illustrate le procedure di calcolo utilizzate in questo lavoro di tesi, basandosi sui valori numerici delle tabelle precedenti (vedi Figura 3.26 e Figura 3.27) e sulle assunzioni che seguono la rispettiva procedura.

Calcolo di energia termica prodotta da un dato impianto a PdC e n° utenze soddisfabili

Mediante il seguente (banale) procedimento si è calcolata l'energia termica fornita dall'impianto all'utenza ($En_{th, OUT}$) ed il fabbisogno di potenza elettrica necessario a tale impianto (P_{el}), data la potenza dell'impianto ($P_{th, imp}$), il COP, ed il tempo annuo di funzionamento (t_{funz}):

Energia termica fornita dall'impianto all'utenza/e [kWh/anno]:

$$En_{OUT, anno} = P_{th, imp} [kW] * t_{funz} [h/anno]$$

Potenza elettrica da fornire all'impianto [kW]:

$$P_{el} = \frac{P_{th, imp} [kW]}{COP}$$

Numero di utenze soddisfabili dall'impianto di potenza data:

$$\#utenze = En_{OUT, anno} [kWh/anno] / En_{fabb, anno} [kWh/(anno * utenza)]$$

Questo tipo di procedimento è stato eseguito per diverse tipologie di impianto, e cioè per diversi valori di COP e diverse potenze termiche.

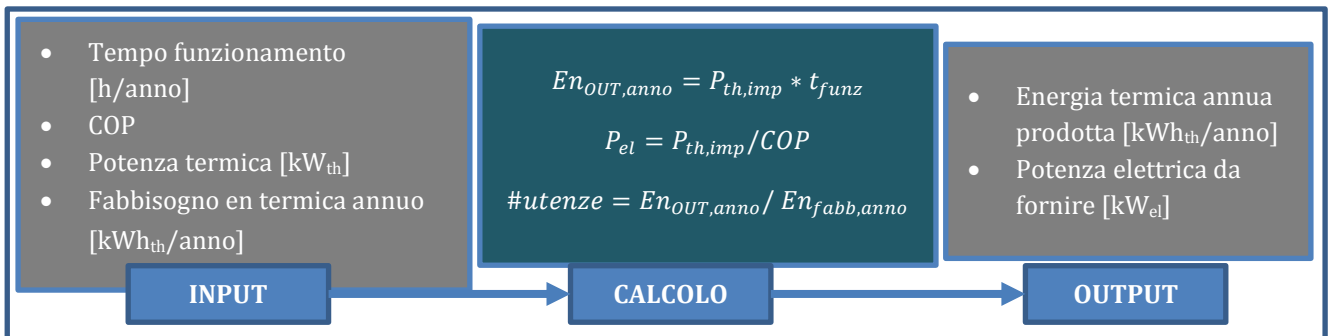


Figura 3.28 Schema riassuntivo per il calcolo della produzione di energia termica da un impianto a pompa di calore

Calcolo della lunghezza delle sonde geotermiche necessarie ad un dato impianto

Mediante il seguente procedimento si è calcolata la lunghezza (in caso di sonde verticali) o la superficie (sonde orizzontali) delle sonde geotermiche necessarie per soddisfare tale domanda termica, dopo avere, secondo il procedimento di calcolo precedente, calcolato l'energia termica fornita dall'impianto all'utenza ($En_{th, OUT}$) ed il fabbisogno di potenza elettrica necessario a tale impianto (P_{el}), data la potenza dell'impianto ($P_{th, imp}$), il COP, ed il tempo annuo di funzionamento (t_{funz}):

Energia termica fornita dall'impianto all'utenza/e [kWh/anno]:

$$En_{th, OUT} = P_{th, imp} [kW] * t_{funz} [h/anno]$$

Potenza elettrica da fornire all'impianto [kW]:

$$P_{el} = \frac{P_{th, imp} [kW]}{COP}$$

Numero di utenze soddisfabili dall'impianto di potenza data:

$$\#utenze = En_{OUT, anno} [kWh/anno] / En_{fabb, anno} [kWh/(anno * utenza)]$$

Per far questo è necessario calcolarsi la potenza termica estratta dall'ambiente circostante (P_{ext}), sfruttando la formula inversa del COP:

$$COP = \frac{P_{th,imp}[kW]}{P_{el}[kW]}$$

ed essendo la potenza termica fornita all'utenza la somma tra la potenza elettrica fornita all'impianto e la potenza termica estratta dall'esterno:

$$P_{th,imp} = P_{el} + P_{ext}$$

La potenza termica da estrarre all'esterno sarà data banalmente da:

$$P_{ext} = P_{th,imp} - P_{el}$$

Nota tale potenza e i valori di rendimento specifico ($resa_{terreno}$) delle varie tipologie di sonde geotermiche a seconda del terreno (vedi Figura 3.26 e Figura 3.27), è immediato il calcolo di lunghezza (l_{sonde} [m]) degli scambiatori:

$$l_{sonde} = \frac{P_{ext}[kW]}{resa_{terreno} [kW/m]}$$

o superficie (S_{sonde} / m^2) degli scambiatori:

$$S_{sonde} = \frac{P_{ext}[kW]}{resa_{terreno}[kW/m^2]}$$

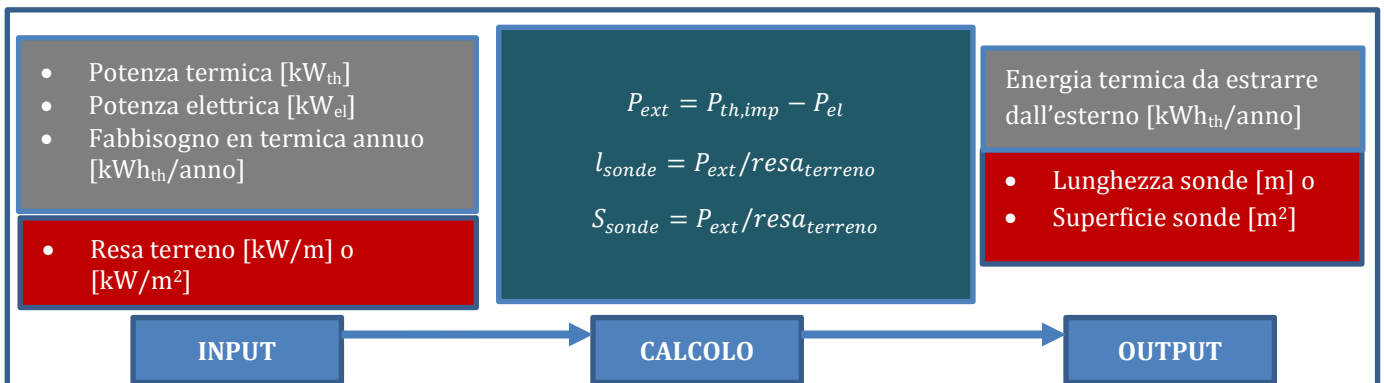


Figura 3.29 Schema concettuale per il calcolo della lunghezza/ampiezza di sonde geotermiche per un impianto a pompa di calore in grado di soddisfare un dato fabbisogno di energia termica

Limiti e assunzioni

Quanto alle procedure di calcolo riguardanti le pompe di calore sono da considerarsi i due seguenti punti:

- Le pompe di calore sono state dimensionate per semplicità sulla base del funzionamento in modalità riscaldamento, ipotizzando che siano così soddisfatti anche i fabbisogni di raffreddamento;
- Si sono però tenuti in considerazione i consumi di energia elettrica da fornire all'impianto necessari al funzionamento estivo.

Passando ai numeri, si sono utilizzati i dati di Figura 3.27 per le sonde a bassa profondità, ed i dati di Figura 3.26 per le sonde a elevata profondità.

3.3.4 Energia eolica

L'energia eolica è, ovviamente, l'energia generata grazie al vento. La più importante forma di impiego dell'energia eolica è quella relativa alla produzione di energia elettrica attraverso i generatori eolici, ovvero aerogeneratori. L'energia elettrica si ottiene sfruttando l'energia cinetica del vento: le masse d'aria in

movimento ad una velocità sufficientemente elevata fanno girare le pale di un'elica; queste a loro volta sono collegate ad un generatore che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica.

Come detto, in questo lavoro si sono considerati esclusivamente quelle tipologie di impianti compatibili con la scala urbana, comunale o sovracomunale, o comunque meno invasive sotto tutti i diversi punti di vista. Per questo, tra gli impianti eolici, considereremo impianti di tipo micro-eolico e piccoli impianti mini-eolici, caratterizzati da potenze entro i 20 kW, e con altezze inferiori a 25 metri e diametri del rotore circa entro 10 metri. Quindi, seguendo la classificazione di Tabella 3.20, considereremo impianti micro-eolici in tutto il loro range di potenze ($P < 20$ kW) mentre tra gli impianti mini-eolici considereremo i meno potenti, cioè quelli entro i 20-25 kW di potenza. In particolare, per il micro-eolico si sono considerate turbine sia ad asse verticale che orizzontale, mentre per il mini-eolico esclusivamente quelle ad asse orizzontale.

Tabella 3.20 Classificazione delle turbine eoliche per potenza seguita in questo lavoro di tesi (Andreolli, 2011)

Taglia		Potenza nominale	Diametro rotore	Altezza palo	Applicazioni tipiche
Piccola taglia	Micro-eolico	< 1 kW	1 - 2 m	2 - 6 m	Imbarcazioni, camper, piccole utenze isolate
		1 - 10 kW	2 - 6 m	6 - 12 m	Abitazioni, strutture commerciali e PMI, installazioni a terra o su tetto anche in ambito urbano, utenze isolate o connesse alla rete
	Mini-eolico	15 - 25 kW	10 - 15 m	18 - 25 m	Agriturismi, camping, strutture commerciali, aziende agricole e PMI, per installazioni a terra e connesse alla rete
		25 - 200 kW	15 - 30 m	25 - 60 m	Aziende agricole e PMI, per installazioni a terra e connesse alla rete
Media taglia	200 - 800 kW	30 - 50 m	60 - 100 m	Installazioni connesse alla rete	
Grande taglia	> 800 kW	> 50 m			

Procedure di calcolo per la stima di energia elettrica da impianti mini e micro-eolici

Con questa procedura di calcolo si è cercato di valutare il potenziale di energia erogabile da un dato impianto mini o micro-eolico. Un primo ostacolo incontrato nel corso di tale stima è sicuramente la scarsità di dati medi generali sulla quantità di energia erogabile da impianti eolici *tipo* in letteratura, dovuta principalmente alla difficoltà nella stima *locale* della ventosità del territorio italiano; per questo si è deciso di definire due distinte procedure di calcolo, a seconda dei dati a disposizione, una per gli impianti mini-eolici e una per i micro-eolici.

Calcolo dell'energia erogata da un impianto mini-eolico di data potenza

Qui, grazie all'atlante eolico italiano (dell'RSE)(vedi), che fornisce, tra le altre cose, la velocità del vento e la producibilità (in kWh/kW/anno, diretta conseguenza della ventosità del sito) di un impianto eolico a 25 m dal terreno per tutti i comuni italiani, si è riusciti a calcolare la producibilità per gli impianti mini-eolici con potenze tra i 20 e i 50 kW, il cui rotore si trova ad operare ad altezze sul terreno prossime proprio ai 25 m.

Mediante il seguente procedimento è quindi possibile calcolare l'energia elettrica prodotta dall'impianto ($En_{OUT,anno}$), data la potenza complessiva dell'impianto (P_{imp}) e la *producibilità del comune* in cui l'impianto è localizzato ($Prod_{i, 25m}$):

Energia elettrica prodotta dall'impianto [kWh/anno]:

$$En_{OUT,anno} = P_{imp} [kW] * Prod_{i, 25m} [kWh/anno/kW]$$

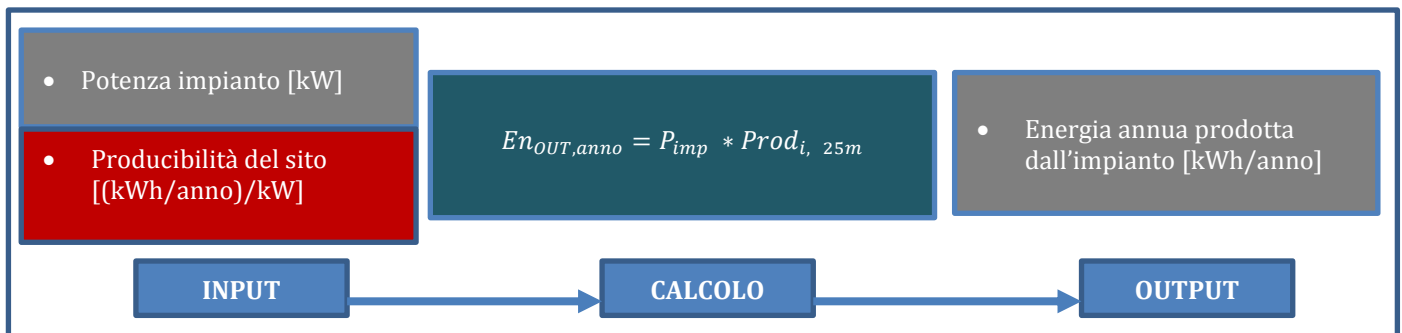


Figura 3.30 Schema riassuntivo del calcolo di energia elettrica prodotta da un dato impianto mini-eolico a circa 25 m dal terreno

Calcolo dell'energia prodotta da impianti micro-eolici

In questa procedura di calcolo si è sfruttato un semplice modello di calcolo della ROPATEC, che permette il calcolo dell'energia elettrica prodotta da alcuni modelli di turbine micro-eoliche ad asse verticale, conoscendo la ventosità media del sito. Si è dovuti a ricorrere a questo modello alla luce della scarsità sia di dati sulla ventosità ad altezze sul terreno inferiori ai 25 metri (e quindi più compatibili con impianti micro-eolici a scala urbana), sia di dati medi riguardanti l'energia che è possibile produrre da impianti micro-eolici, i quali sono, infatti, caratterizzati da un'ampia eterogeneità, che comporta perciò la difficoltà nel reperimento di dati omogenei e validi per l'intera categoria.

Il procedimento di calcolo è piuttosto complesso, e quindi non viene riportato integralmente; nello schema di si riporta invece il processo concettuale, con input e output che stanno dietro a tale modello.

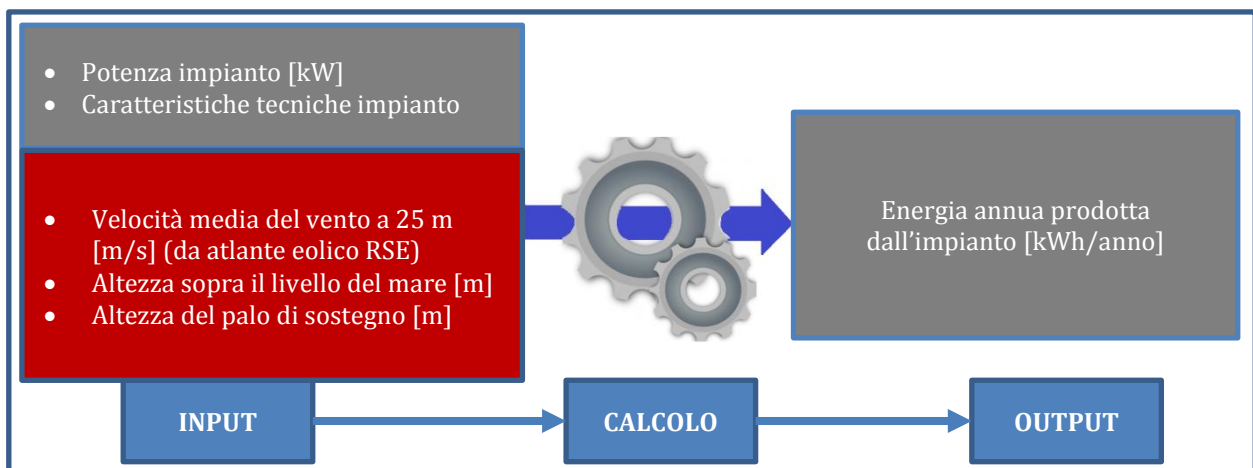


Figura 3.31 Schema riassuntivo del calcolo di energia prodotta da un impianto micro-eolico ad asse verticale secondo il modello di calcolo semplificato della ROPATEC

Limiti e assunzioni

- Per la stima di energia elettrica da mini-eolico si è utilizzata la producibilità media a 25 m dal suolo, ipotizzando che la turbina sia all'incirca a tale altezza (vedi Figura 3.32);
- per la stima di energia elettrica da micro-eolico si fa riferimento alla procedura di calcolo della ROPATEC, ipotizzando che anche altre tipologie impiantistiche possono ritrovarsi in tale stima.

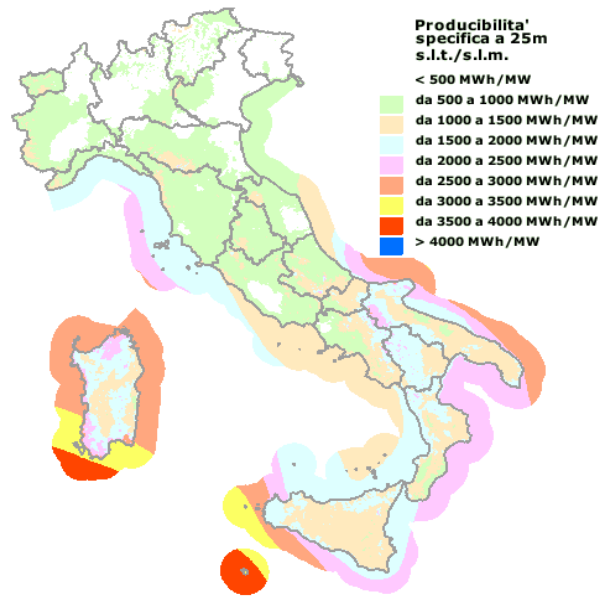


Figura 3.32 Mappa della produttività eolica a 25 dal suolo (Atlante Eolico Interattivo, RSE)

4 IL CASO DI STUDIO

In questo capitolo verrà presentata l'applicazione del modello definito nelle pagine precedenti al caso di studio scelto, e cioè al Comune di Milano. Verranno innanzitutto presentati e commentati i risultati, attraverso i rispettivi step, della stima dei consumi attuali, per energia termica ed elettrica, quindi gli stessi consumi in scenari nei quali si ipotizza di implementare misure per la riduzione integrata del fabbisogno di energia, sia attraverso un generale efficientamento che mediante l'installazione, in particolare per i consumi "termici", di impianti di energia da fonti rinnovabili. Dopo aver commentato questo tipo di risultati si passerà ad una scala di maggior dettaglio, che prevede cioè l'analisi delle prestazioni energetiche dei tessuti urbani che caratterizzano la città di Milano, con lo scopo di individuare aree critiche su cui stabilire azioni prioritarie di intervento. Infine, si implementeranno all'area di studio alcune delle tipologie di FER "elettriche" considerate nel modello, con lo scopo di definire il potenziale di energia elettrica da rinnovabili producibile all'interno del territorio comunale.

Per testare il modello, si è scelto come caso di studio il Comune di Milano. Si è deciso di optare per questa scelta, innanzitutto per motivi pratici, in quanto è un'area di studio caratterizzata da numerosi database, che solitamente in comuni minori è più difficile trovare; inoltre è spesso oggetto di studi, per cui è stato più semplice trovare lavori simili con cui confrontare i risultati delle presenti analisi. Dal punto di vista dei contenuti, poi, Milano è una realtà varia e complessa, data la sua grandezza, interessante perciò da studiare. Inoltre, è noto il fatto che i consumi del comune di Milano siano molto elevati, basti pensare che il consumo in tep di Milano è simile a quello di tutta la regione Sardegna, pur avendo una superficie oltre 130 volte inferiore, per cui risulta di grande interesse dal punto di vista della ricerca del risparmio energetico andare a valutarne una riduzione.

4.1 Stima dei consumi per energia termica

La parte relativa alla stima dei consumi per energia termica è la parte più corposa nella stima. Infatti, i consumi per riscaldamento ed acqua calda sanitaria presentano una variabilità molto ampia al variare degli edifici che si vanno a considerare; per questa ragione, tale stima richiede la definizione di cosiddetti *cluster* di edifici, cioè gruppi di edifici con caratteristiche comuni, tali da poter essere caratterizzati da consumi uniformi.

4.1.1 Definizione dei cluster di edifici

Definizione delle tipologie edilizie

Per classificare gli edifici secondo le quattro tipologie prestabilite, *Casa monofamiliare*, *Casa a schiera*, *Edificio multifamiliare* e *Blocco di appartamenti* (definite nel capitolo 3; vedi Tabella 3.1 per maggiori informazioni), si è lavorato principalmente sul database topografico. Come prima cosa sono stati isolati i soli edifici classificati all'interno di tale database come '*Residenziali*', lavorando quindi esclusivamente su quelli. In origine si pensava che la classificazione potesse essere derivata direttamente da quella preimpostata all'interno del database topografico stesso, in quanto esso presenta una colonna dedicata a tale classificazione, denominata proprio 'TIPOLOGIA EDILIZIA', che prevede, tra le altre, tipologie come '*villa*', '*villetta a schiera*' o '*palazzo a torre*', molto utili ai nostri fini (vedi Figura 4.1). Si è però scoperto poi che tale classificazione contiene solamente un ridotto

numero tra tutti i casi possibili, ed in particolare circa il 75% degli edifici risulta classificato come 'Generica', mentre i restanti edifici si suddividono tra 'Capannone', 'Edificio rurale' e 'Campanile', rendendo quindi una simile classificazione completamente inutile ai nostri fini (ma immaginiamo non solo ai nostri!). Ci si è quindi rivolti nella derivazione di una nuova classificazione ad hoc, partendo solamente dai dati geometrici forniti dal database agli edifici, andando cioè a calcolare, come detto nel capitolo precedente, numero di piani e rapporto S/V, e discriminando quindi le quattro tipologie in base a questi due parametri.

02 IMMOBILI ED ANTROPIZZAZIONI					
01 EDIFICATO					
02 EDIFICIO					
01 EDIFC_TY (02010201)					
0101	Generica	0106	Battistero	0116	Tempio
0102	Palazzo a torre, grattacielo	0107	Campanile	0117	Mulino
0103	Edificio monumentale	0108	Capannone	0118	Osservatorio
010301	Edificio monumentale - castello	0109	Edificio rurale	0119	Palazzetto dello sport
010302	Edificio monumentale - villa	0110	Castello	0120	Rifugio montano
010303	Edificio monumentale - palazzo	0111	Chiesa, basilica	0121	Stadio
010304	Edificio monumentale - masserie	0112	Anfiteatro	0191	Non conosciuto
010305	Edificio monumentale - trullo	0113	Faro	0192	Non assegnato
0104	Villa	0114	Hangar	0193	Non definito
0105	Villetta a schiera	0115	Minareto, moschea	0194	Non applicabile
				0195	Altro

Figura 4.1 Classificazione degli edifici per tipologia edilizia secondo il database topografico della Lombardia

A valle di questo procedimento si sono fatte alcune operazioni di "pulizia" del database risultante; si sono eliminati cioè quegli edifici che non soddisfano i seguenti criteri:

- altezza edificio > 3 m
- superficie edificio > 60 m²
- rapporto S/V < 1 (m⁻¹)

per evitare cioè di avere tra gli edifici analizzati immobili derivanti da errori interni al database, piuttosto che edifici con caratteristiche tali che sia impossibile una loro destinazione di tipo residenziale.

In Figura 4.2 e Figura 4.3 sono riportate le mappe, elaborate in GIS, risultanti da questa classificazione. Risulta evidente la dominanza della tipologia 'Blocchi di appartamenti', in particolare nelle zone centrali della città, dove appunto si ha una morfologia densa, e l'edificio tipo ha un numero di piani solitamente maggiore a 5. Bisogna spostarsi verso la periferia per avere una maggiore varietà in questo campo (vedi Figura 4.4), anche se in ogni caso le tipologie *casa monofamiliare* e *casa a schiera* in una realtà come Milano sono presenti in numero molto ridotto.

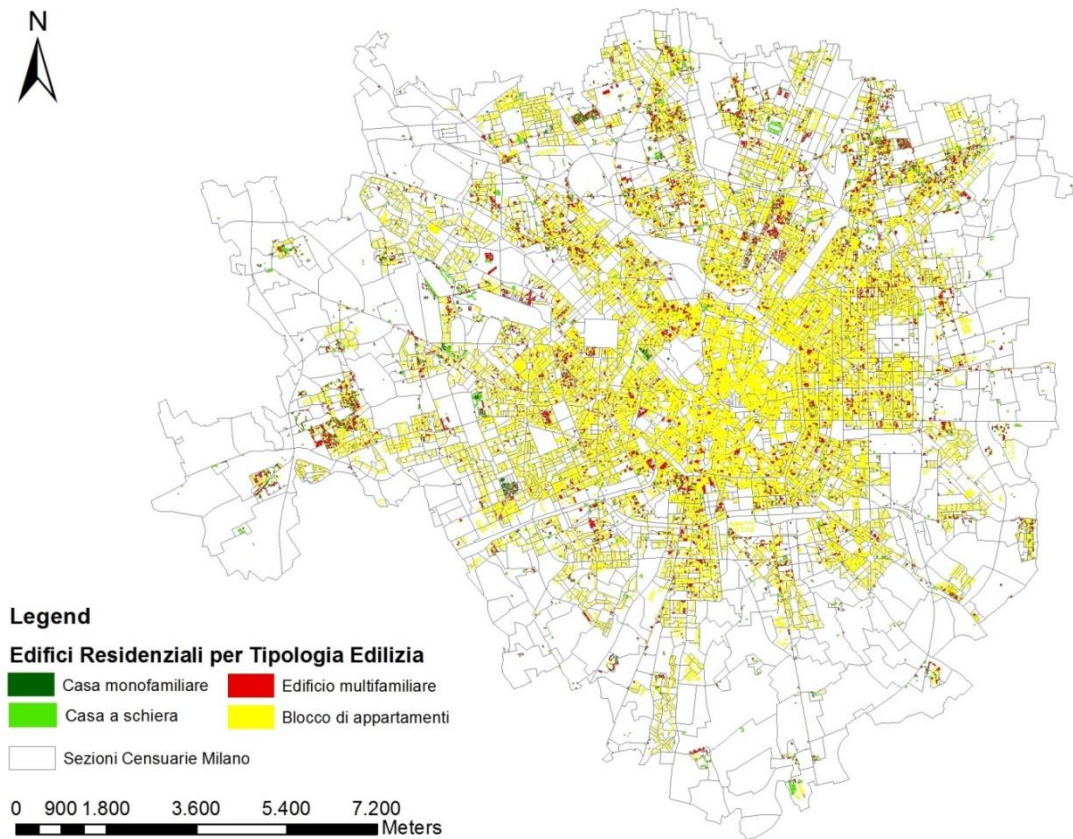


Figura 4.2 Mappa degli edifici residenziali di Milano, classificati per tipologia edilizia

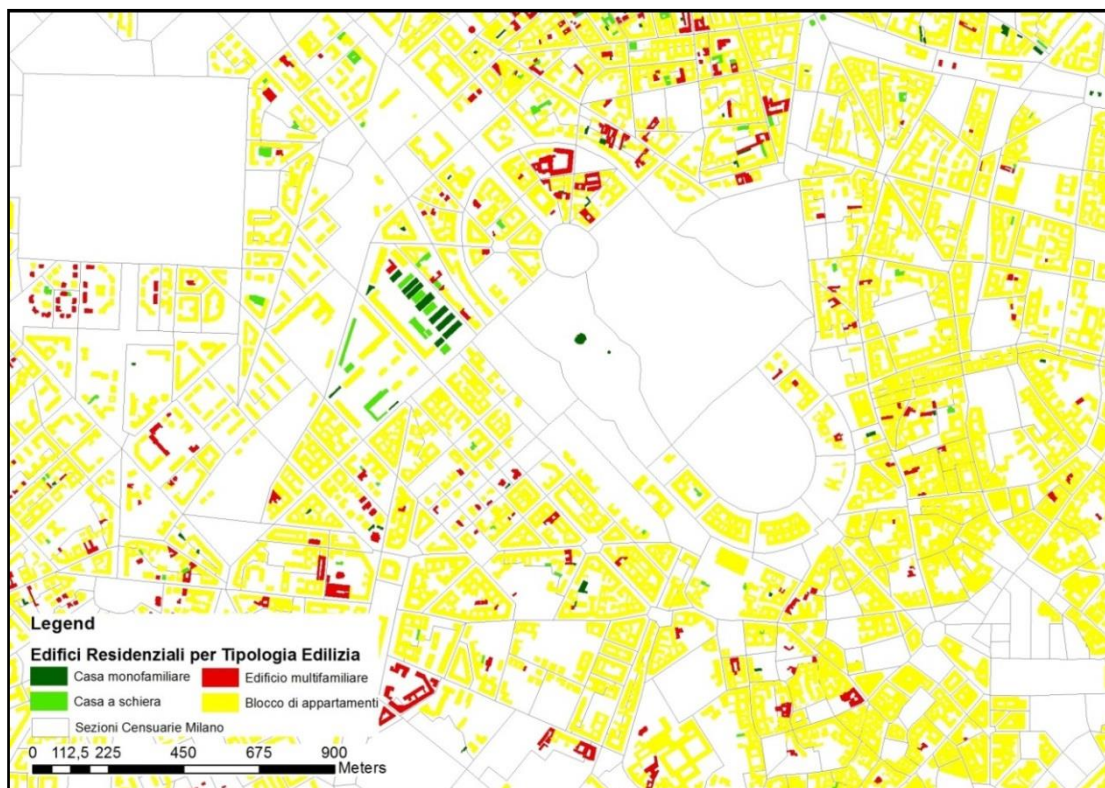


Figura 4.3 Mappa di una parte centrale del comune di Milano con gli edifici classificati per tipologia edilizia

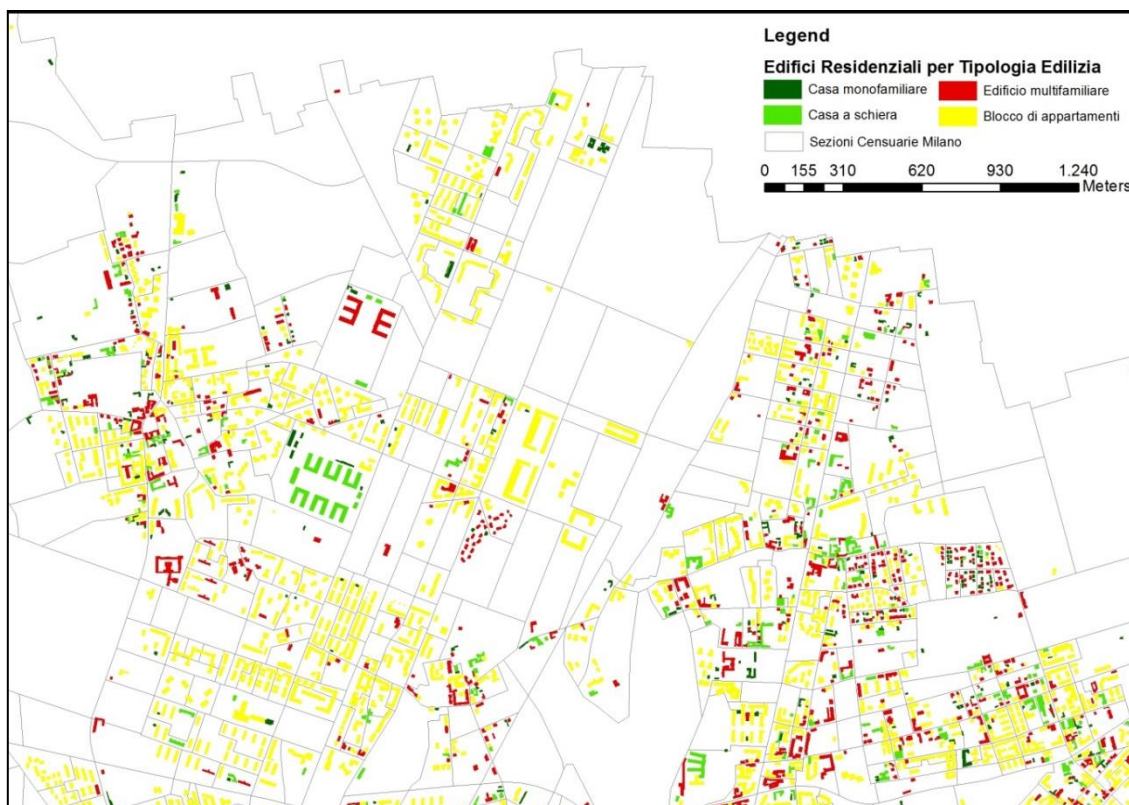


Figura 4.4 Mappa di una parte periferica del comune di Milano, con gli edifici classificati per tipologia edilizia

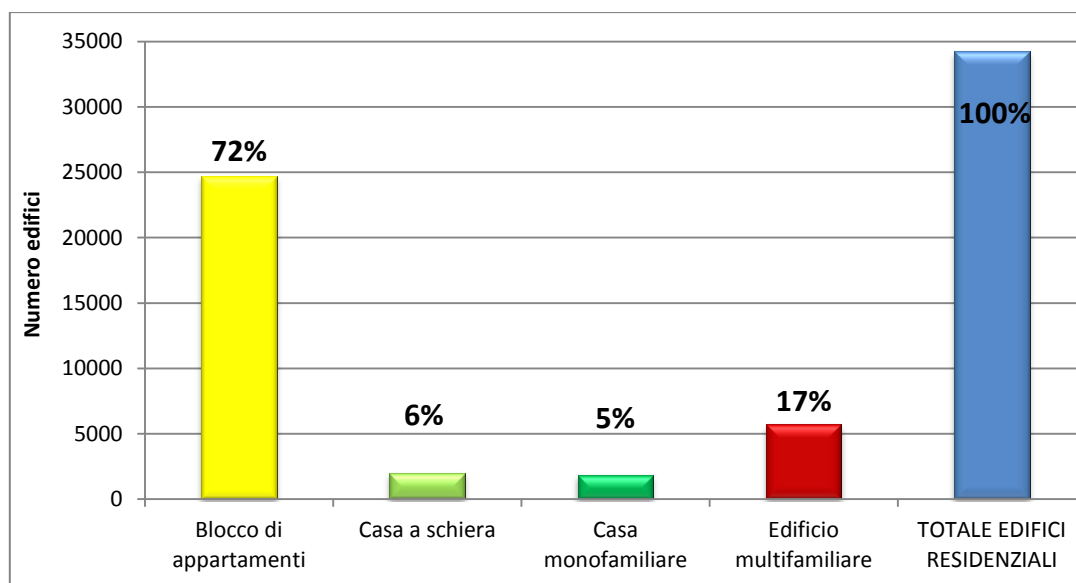


Grafico 4.1 Valori numerici e percentuali degli edifici residenziali del comune di Milano considerati per ogni tipologia edilizia secondo il modello

Definizione delle classi d'età degli edifici

Per quanto riguarda la definizione della classificazione degli edifici secondo la rispettiva classe d'età, ci si è basati sul censimento ISTAT del 2001, che esprime per ogni unità censuaria, tra le altre cose, il numero di edifici appartenenti alle 7 classi (<1919, 1919-1945, 1946-1961, 1962-1971, 1972-1981, 1982-1991, >1991). Come prima cosa si è attribuita ad ogni unità censuaria la classe d'età relativa, mediante una media pesata tra gli edifici appartenenti ad ogni classe, ottenendo quindi le sezioni censuarie classificate per classe d'età (prevalente). Quindi si è attribuita la classe della sezione censuaria agli edifici contenuti nella sezione stessa. Per definire la sezione di appartenenza ad ogni edificio (visto che molti edifici vengono "tagliati" da ISTAT in due o più sezioni

censuarie) si è usato il baricentro: se il baricentro dell'edificio ricade all'interno della sezione *i*, tale edificio sarà classificato come appartenente a tale sezione censuaria.

Anche qui si è rivelata necessaria un'operazione di pulizia del database risultante, in particolare per due ragioni: da un lato ISTAT all'interno del censimento non considera alcuni edifici, che risultano quindi inesistenti e di cui, non è stato possibile determinare la classe d'età, dall'altro alcuni edifici presenti nel database topografico risultano addirittura fuori dai confini comunali, per cui anche per questi non è stato possibile determinare una classe d'età. Si è deciso quindi di non considerare questi edifici, che risultano comunque essere in numero molto ridotto rispetto agli edifici totali considerati.

In questo modo si sono quindi ottenute in output sia le sezioni censuarie con la rispettiva classe d'età prevalente che gli edifici residenziali milanesi, ognuno con la propria classe d'età.

Come detto nel capitolo del modello relativo alla definizione della classe d'età degli edifici, la classificazione può non essere univoca, nel senso che, a seconda dei valori usati nella pesatura, una sezione potrebbe ricadere in una classe piuttosto che in un'altra. Per questa ragione si è proceduto per tentativi, cercando di avvicinarsi il più possibile alla distribuzione reale (cioè quella definita da ISTAT) degli edifici per classe d'età. Di seguito si riporta la pesatura definita inizialmente e quella definitiva, su cui sono basate tutte le analisi successive con i relativi risultati in termini di classificazione confrontati con quelli reali (vedi Tabella 4.1):

Tabella 4.1 Valori dei pesi utilizzati per la definizione dell'anno medio per la definizione delle classi d'età delle sezioni censuarie e quindi degli edifici

	Pesi							
Pesatura iniziale	1910	1919	1946	1961	1971	1981	1991	2000
Pesatura finale	1850	1915	1940	1955	1970	1985	2005	2100

Ovviamente applicando tali pesi ad un altro database, per esempio per un altro comune, il risultato sarà peggiore, in quanto un metodo di questo tipo è valido solo per il database in questione (in termini modellistici, va in *overfitting*) e quindi una possibile miglioria del modello sotto questo aspetto potrebbe essere l'elaborazione di un algoritmo, diverso dalla semplice media pesata, che riesca ad ottimizzare la distribuzione dei pesi sulle diverse classi in modo da avvicinarsi il più possibile alla distribuzione reale.

Dai grafici seguenti risulta evidente come la pesatura finale interpreti meglio la situazione reale rispetto a quella impostata inizialmente, in particolare per le classi di edifici più recenti, che inizialmente non erano quasi per nulla considerate.

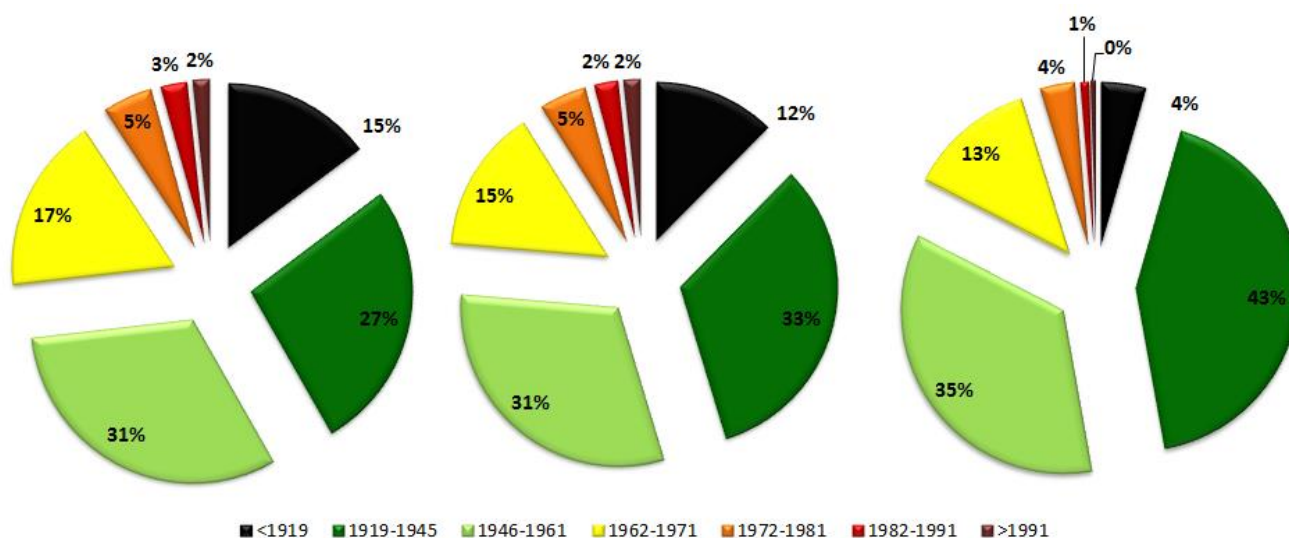


Figura 4.5 Confronto in termini percentuali tra la suddivisione degli edifici per classe d'età tra ISTAT (a sinistra) ed il modello nelle sue due configurazioni (iniziale a destra e finale al centro)

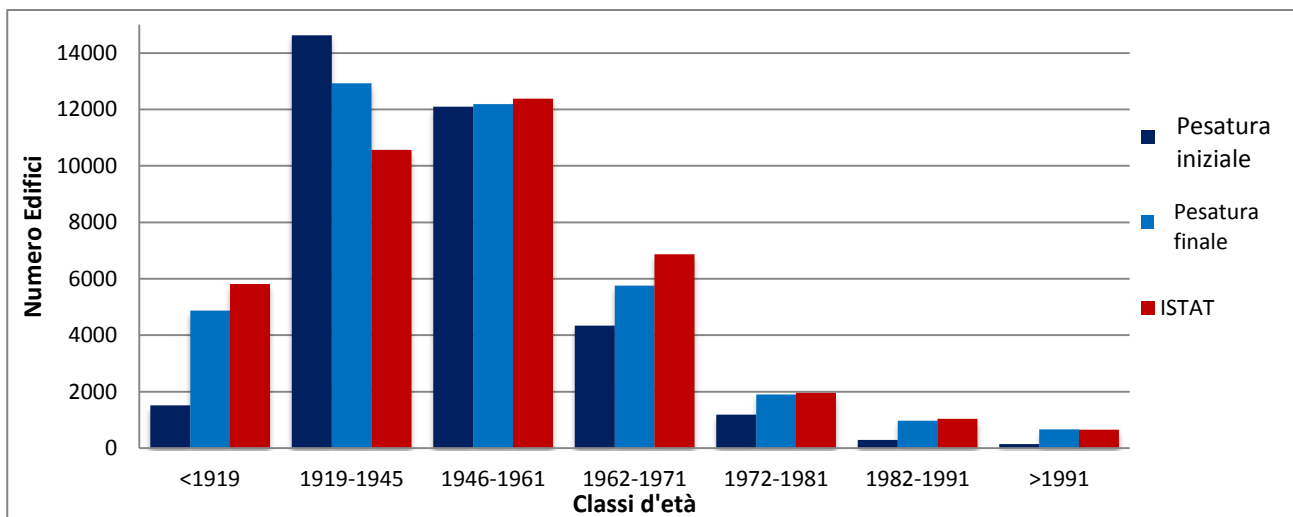


Figura 4.6 Confronto tra la suddivisione degli edifici per classe d'età secondo il modello (pesatura iniziale e finale) e secondo ISTAT

Anche dalle due mappe seguenti (vedi Figura 4.7 e Figura 4.8), si nota come la prima classificazione generi una distribuzione delle classi poco omogenea, concentrata quasi esclusivamente sulle classi 1919-1945 e 1946-1961, mentre la seconda classificazione mostra una mappa più eterogenea, ma, cosa più importante, molto più vicina alla realtà. Detto questo d'ora in poi si seguirà esclusivamente la classificazione finale, realizzata seguendo le indicazioni definite nel modello.

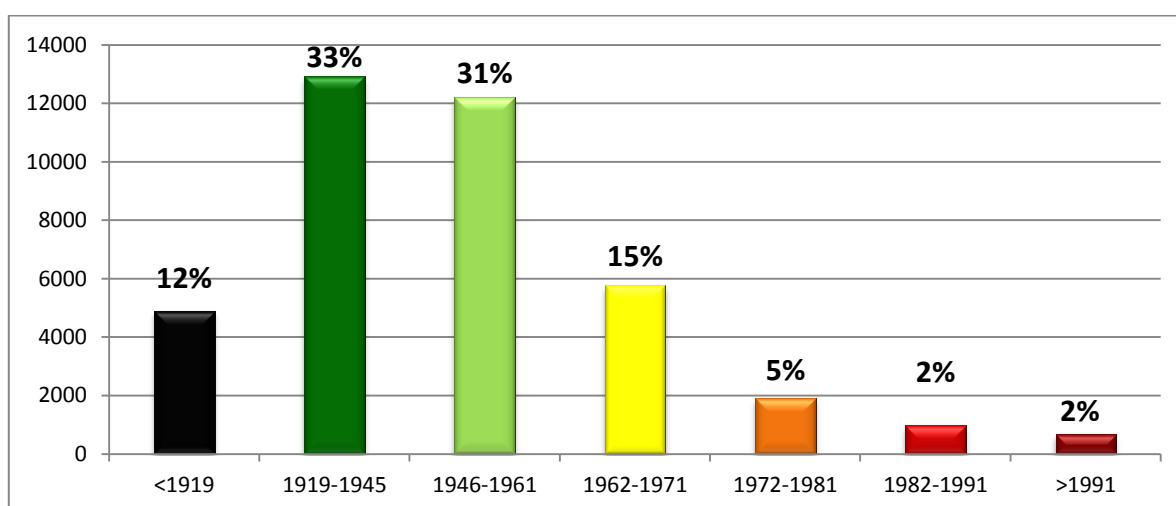


Grafico 4.2 Distribuzione degli edifici del comune di Milano per classe d'età secondo la classificazione finale e definitiva del modello realizzato

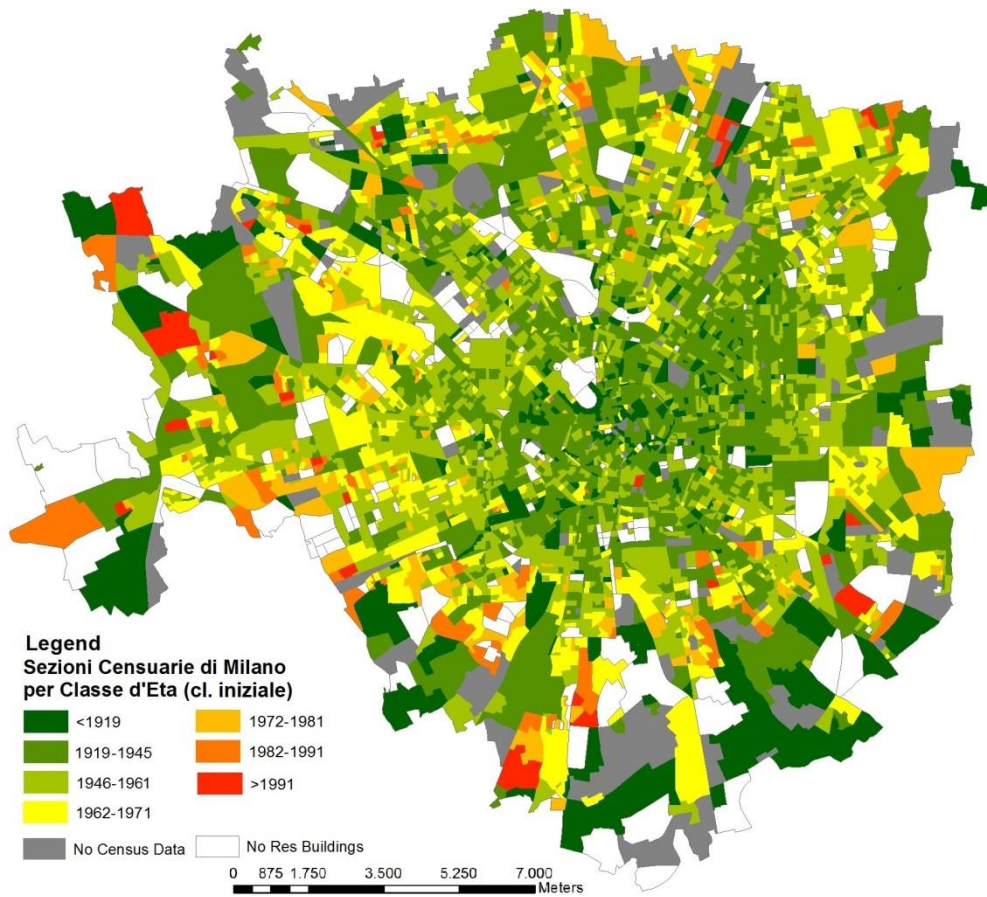


Figura 4.7 Classificazione delle sezioni censuarie di Milano per classe d'età (pesatura iniziale)

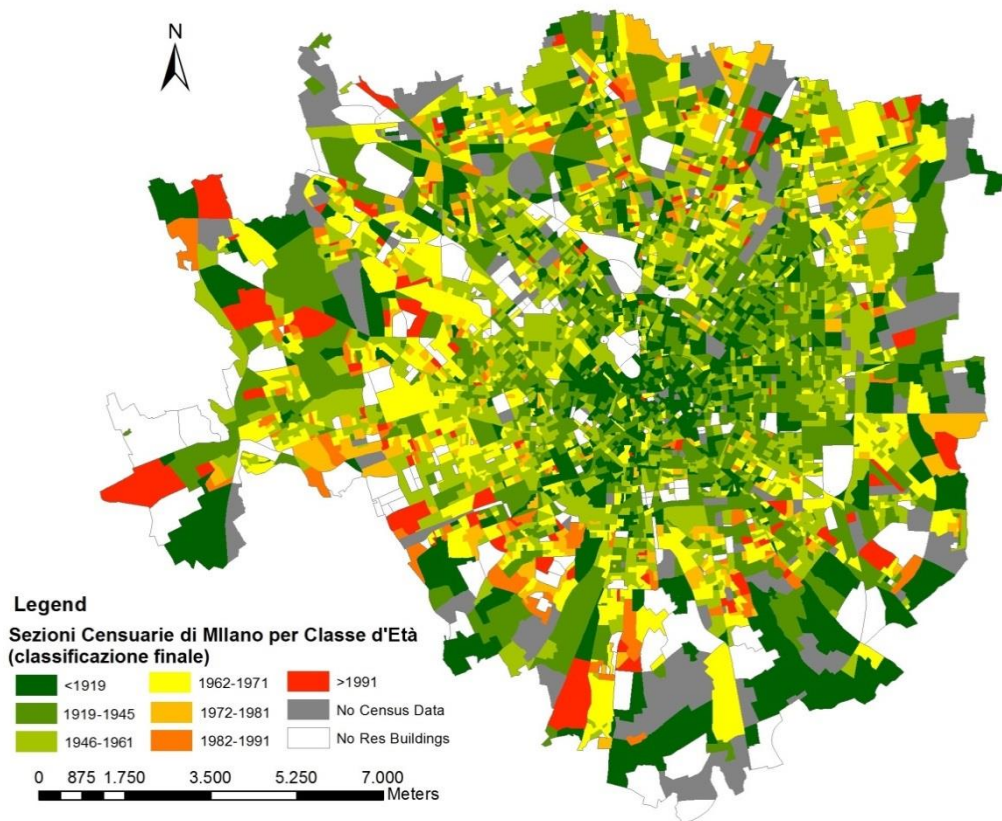


Figura 4.8 Classificazione delle sezioni censuarie di Milano per classe d'età (pesatura finale)

Come si può notare anche dalle mappe (vedi da Figura 4.7 a Figura 4.10), sono ovviamente le zone più centrali ad ospitare edifici con una classe d'età più vecchia, mentre spostandosi verso la periferia si hanno edifici realizzati in periodi più recenti, anche se la gran parte di essi è da ricondursi a periodi antecedenti gli anni '80. La cosa viene confermata in toto dal Grafico 4.2, dove si nota come quasi l'80% degli edifici milanesi sia stato realizzato prima del 1971, mentre solamente il 4% circa è stato costruito dopo il 1981, e addirittura poco più di 650 edifici dopo il 1991.

Detto questo, vanno precisate due cose: innanzitutto il censimento ISTAT utilizzato è datato 2001, quindi gli edifici la cui realizzazione sia stata ultimata dopo tale anno non sono presenti nel censimento e quindi non possono essere stati considerati; inoltre, non avendo dati puntuali circa l'anno di costruzione degli edifici, si è dovuto far riferimento all'età media degli edifici di ogni sezione censuaria. Questo metodo si è rivelato buono nel complesso, in quanto solitamente le sezioni censuarie contengono edifici realizzati nello stesso periodo, mentre risulta impreciso nel momento in cui in una stessa sezione censuaria di edifici piuttosto antichi si sia realizzato un edificio molti anni dopo gli altri (è questo solitamente il caso di sezioni censuarie periferiche, oppure sezioni in cui si è demolito un edificio vecchio per realizzarne uno nuovo), in quanto esso verrà probabilmente datato allo stesso modo degli edifici più antichi, prevalenti in tale sezione censuaria. Per questo il modello in questione tenderà a sottostimare la quantità di edifici recenti, che possono essere talvolta accreditati come più antichi quando, invece, non lo sono.

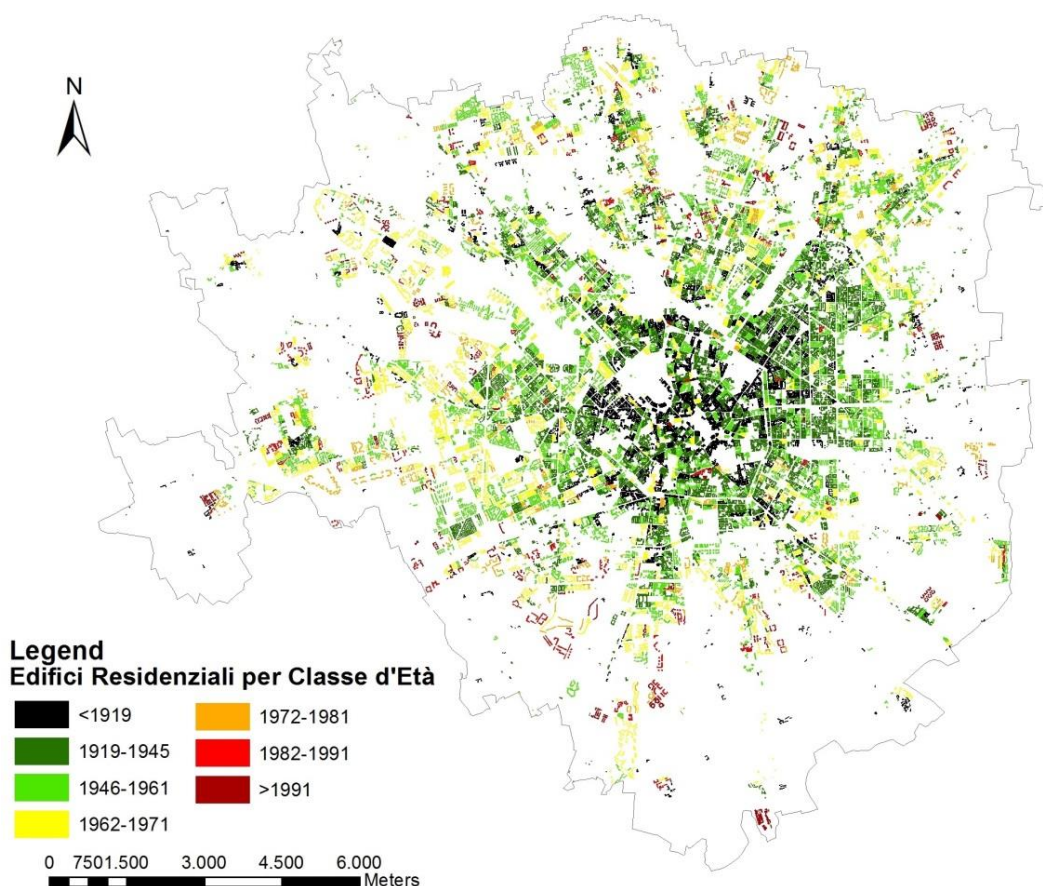


Figura 4.9 Edifici residenziali di Milano classificati per classe d'età, secondo la pesatura finale

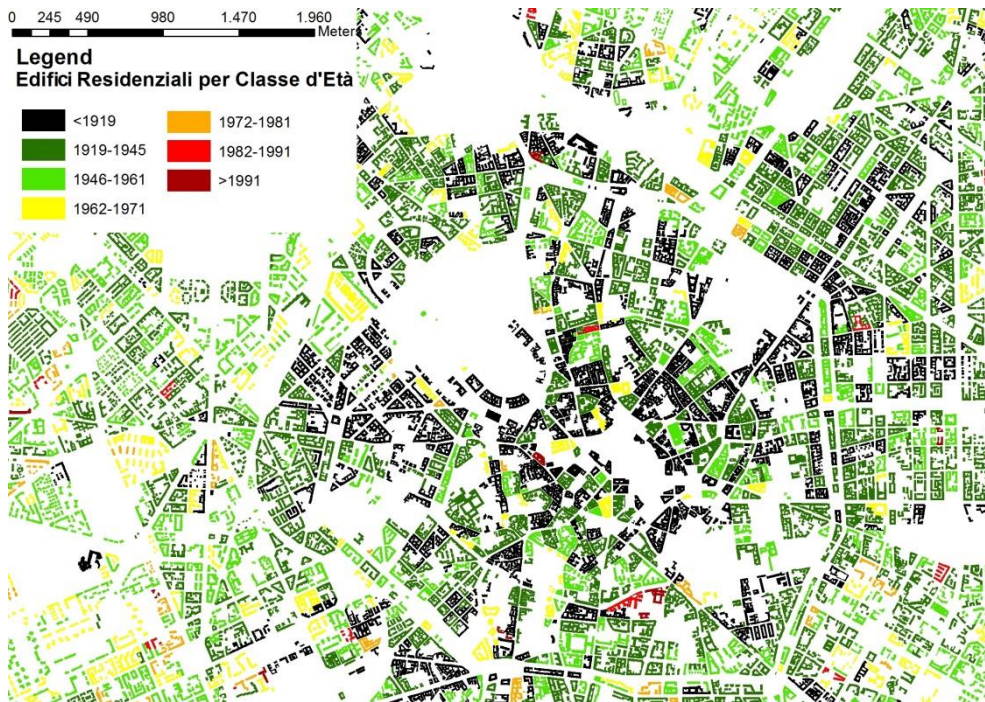


Figura 4.10 Edifici residenziali di una zona centrale di Milano classificati per età, secondo la pesatura finale

Definizione dei passaggi e della relativa perdita di informazioni

Partendo dal database topografico (DBT), gli edifici qui considerati (discriminati utilizzando l'ID dell'edificio, un valore univoco che dovrebbe definire ogni edificio del database) sono in tutto 60.154; di questi si sono esclusi i non-residenziali, arrivando ad ottenere 46.156 edifici residenziali (46.156 ID diversi). Si è però scoperto che una discreta quantità di tali presunti edifici erano in realtà *aggetti* (cioè sostanzialmente balconi e cornicioni, cioè elementi sporgenti rispetto alle superfici laterali esterne degli edifici), e quindi si è provveduto ad eliminarli, arrivando così a 40.084 edifici. A questo punto si è fatta una cernita basandosi su alcuni parametri geometrici, in grado di escludere edifici con caratteristiche tali da rendere impossibile una loro abitabilità, andando cioè ad escludere edifici con altezza inferiore ai 3 metri, con superficie lorda minore di 60 mq e con un rapporto di forma S/V superiore all'unità, arrivando ad avere 34.742 edifici. Quindi si è incrociato tale database con il censimento ISTAT; qui, come detto, si sono dovuti escludere altri edifici per due ragioni: il DBT considera anche edifici immediatamente esterni ai confini cittadini ed edifici che il censimento ISTAT non considera, per cui tali edifici sono stati esclusi, anche se si è cercato di limitare tale perdita andando a recuperare alcuni edifici post-2001, nei casi in cui si ha la certezza di trovarsi davanti ad un edificio/quartiere residenziale di nuova costruzione. Il database finale così ottenuto è in grado di considerare così 34.253 edifici residenziali.

Per rendere un'idea, gli edifici censiti nel 2001 da ISTAT per il comune di Milano sono 39.308, per cui quelli che il nostro modello non è in grado di considerare per i motivi di cui sopra sono esattamente 5.055, cioè il 12,8% degli edifici residenziali totali al 2001 secondo il censimento ISTAT. Nella figura seguente sono riportate le varie perdite di informazioni per i rispettivi passaggi.

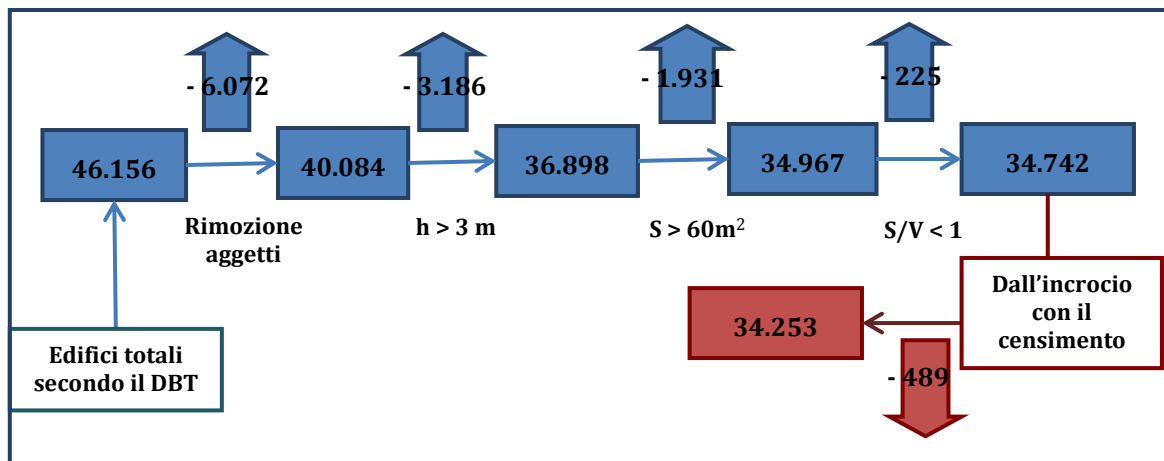


Figura 4.11 Schema del procedimento per la definizione del database degli edifici, con, per ogni passaggio, la perdita di informazioni con la rispettiva motivazione

Possiamo concludere che la maggiore perdita di informazioni si ha a causa delle molte imprecisioni del database topografico, in particolare relativamente alle altezze, per cui, per esempio, per molti edifici si ha semplicemente la superficie di base, nel senso che sono stati catalogati con un'altezza pari a 0, e per questo non si è potuto considerarli all'interno della nostra analisi, mentre per altri, in particolare per le case basse, si è notato che spesso vengono catalogate come edifici intorno ai 15 metri, sfalsando leggermente i risultati. Si prospetta tuttavia una migliore definizione del database di partenza degli edifici grazie al collaudo del DBT, a cui Regione Lombardia dovrebbe provvedere a breve. Inoltre, con il passaggio dal censimento 2001 al censimento 2011 che dovrebbe essere disponibile entro pochi mesi, si avrà sicuramente una minore perdita di informazioni e quindi maggiore precisione.

4.1.2 Analisi dei consumi di energia termica per i diversi cluster

Definite le tipologie edilizie e le classi d'età, è finalmente possibile passare alla stima dei consumi delle diverse classi. Ci concentreremo inizialmente sui consumi di energia termica, per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, in quanto dipendenti proprio dall'età dell'edificio e dalla rispettiva tipologia edilizia, più che sui consumi elettrici, che esporremo comunque in seguito, i quali, invece, risultano essere più omogenei tra le pur diverse utenze.

Risultati della stima del modello per i consumi di energia termica

In questo paragrafo verranno presentati i risultati numerici del modello di stima dei consumi energetici per energia termica, in forma grafica o tabellare; seguirà quindi un breve commento.

Dai database a nostra disposizione, è possibile analizzare la stima effettuata da due punti di vista differenti: secondo le sezioni censuarie, andando a vedere come si distribuiscono i consumi medi a questo tipo di scala, oppure secondo i singoli edifici, consentendo un maggiore livello di dettaglio. Di seguito i risultati del modello presentati seguendo questa distinzione. Importante mettere in luce il fatto che i consumi aggregati per sezione e per edifici siano leggermente differenti, in quanto il dato riferito alle sezioni è una media dei consumi degli edifici presenti in ogni sezione, mentre il dato riferito agli edifici riguarda il parco residenziale complessivo, senza ("sotto")distinzioni.

Tabella 4.2 Stima dei consumi medi e totali degli edifici del comune di Milano considerati elaborata dal modello, per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, nei tre diversi scenari (kWh/m²/anno)

	CONSUMI ATTUALI		RIQ STANDARD		RIQ AVANZATA	
	Riscaldamento	ACS	Riscaldamento	ACS	Riscaldamento	ACS
Consumo medio per edificio	258	48	43	26	26	14

Tabella 4.3 Stima dei consumi medi e totali delle sezioni censuarie del comune di Milano considerate elaborate dal modello, per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, nei tre diversi scenari (kWh/m²/anno)

	CONSUMI ATTUALI		RIQ STANDARD		RIQ AVANZATA	
	Riscaldamento	ACS	Riscaldamento	ACS	Riscaldamento	ACS
Consumo medio per sezione	250	48	43	26	26	14

Tabella 4.4 Stima dei consumi medi degli edifici del comune di Milano per classe d'età elaborata dal modello, per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, nei tre diversi scenari (kWh/m²/anno)

Classe d'età	CONSUMI ATTUALI		RIQ STANDARD		RIQ AVANZATA	
	Riscaldamento	ACS	Riscaldamento	ACS	Riscaldamento	ACS
<1919	297	42	48	25	31	15
1919-1945	293	48	40	25	26	14
1946-1961	247	55	46	26	23	14
1962-1971	242	47	44	30	30	15
1972-1981	170	34	38	25	26	15
1982-1991	115	25	33	21	21	15
>1991	65	23	40	20	24	19
Totale	258	48	43	26	26	14

Tabella 4.5 Stima dei consumi medi degli edifici del comune di Milano per tipologia edilizia elaborata dal modello, per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, nei tre diversi scenari (kWh/m²/anno)

Tipologia Edilizia	CONSUMI ATTUALI		RIQ STANDARD		RIQ AVANZATA	
	Riscaldamento	ACS	Riscaldamento	ACS	Riscaldamento	ACS
Casa monofamiliare	439	40	76	29	47	19
Casa a schiera	309	42	49	24	32	19
Edificio multifamiliare	268	43	47	25	29	15
Blocco di appartamenti	238	50	39	26	24	14
Totale	258	48	43	26	26	14

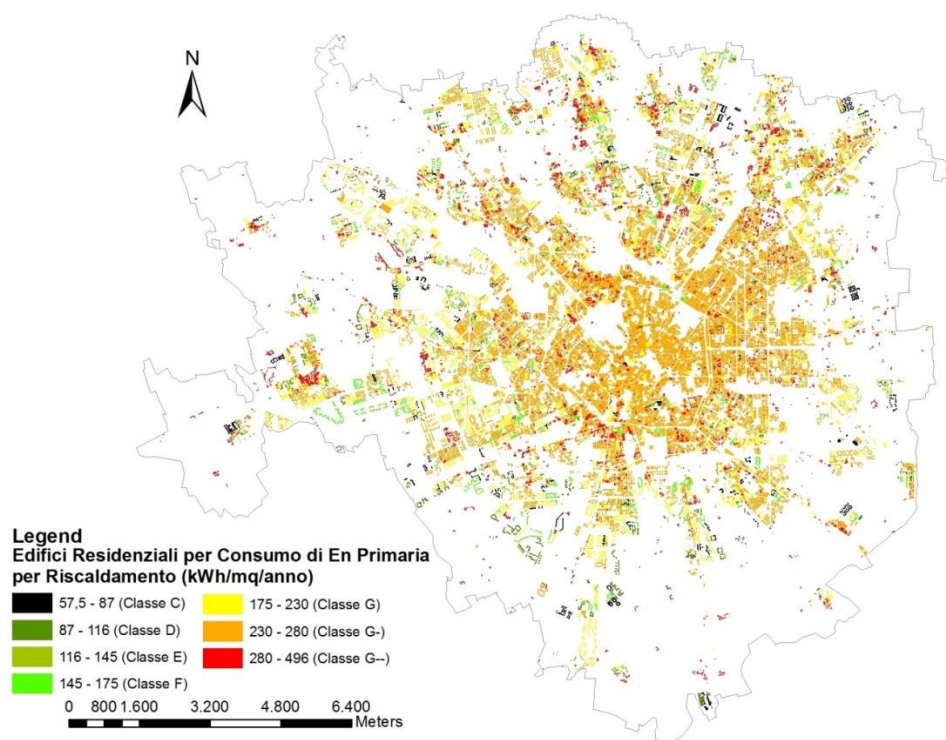


Figura 4.12 Edifici residenziali classificati per consumo di energia primaria per riscaldamento (kWh/m²/anno)

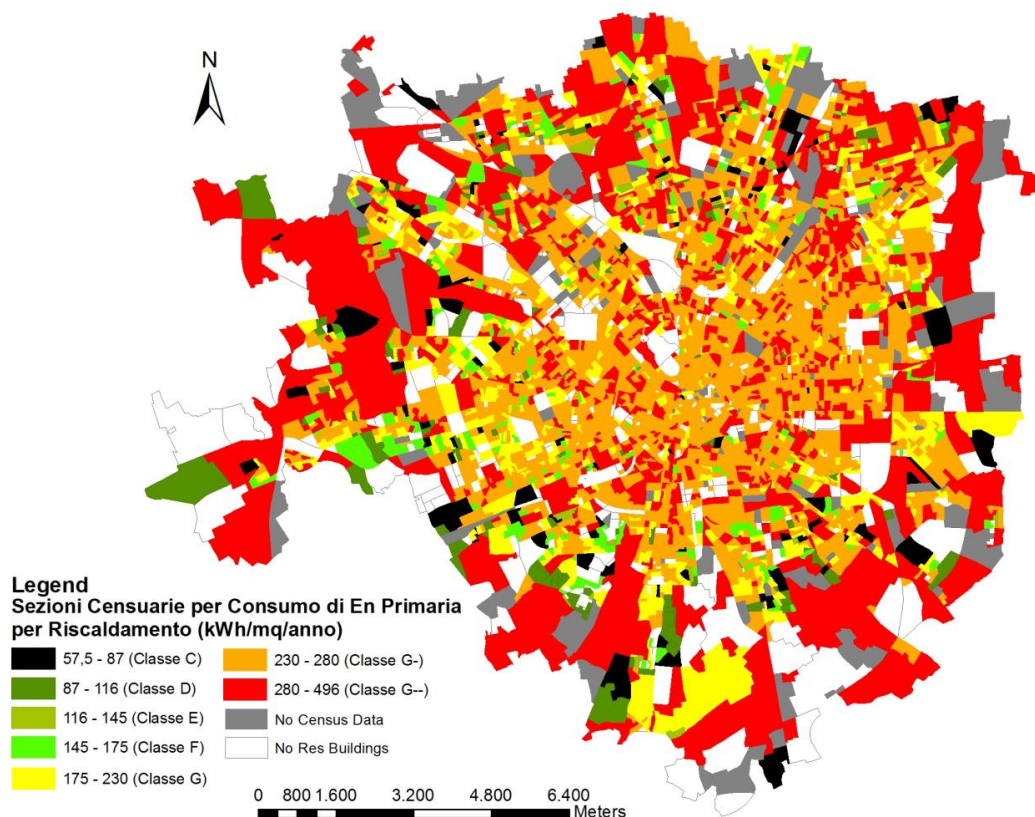


Figura 4.13 Sezioni censuarie classificate per fabbisogno di energia primaria medio

Per quanto riguarda la “distribuzione geografica” dei consumi per riscaldamento, si nota come le zone maggiormente centrali siano caratterizzate da consumi molto elevati, dovuti alla classe d’età dei rispettivi edifici, concentrandosi nel centro gli edifici più datati. Allontanandosi dal centro si ha quindi una progressiva riduzione dei consumi, dovuta anche qui alla presenza di edifici più recenti, fino ad arrivare alle poche sezioni al di sotto degli 87 kWh/m²/anno, che sono localizzate quasi interamente nell’estrema periferia. La grande quantità di sezioni censuarie *rosse* (cioè con un consumo maggiore di 280 kWh/m²/anno) ai confini esterni del territorio comunale sono caratterizzate solitamente da un numero molto ridotto di edifici di tipo rurale, e quindi quasi interamente case monofamiliari piuttosto vecchie, che determinano quindi un consumo molto elevato della rispettiva sezione.

Per quanto concerne, invece, i consumi totali della città di Milano, indipendenti cioè dalla superficie unitaria dell’edificio, sono stati calcolati partendo dai consumi medi per utenza (258 kWh/m²/anno nel caso del riscaldamento, 48 kWh/m²/anno per acqua calda sanitaria), si è moltiplicato tale valore per la superficie media dell’utenza del comune di Milano (calcolata dalle abitazioni considerate, e pari a 79,1 m²) ed infine per il numero di abitazioni considerate (pari a 625.391); il valore ottenuto è pari a 12.763 GWh/anno per riscaldamento e pari a 2.374 GWh/anno per acqua calda sanitaria.

Commento ai risultati della stima dei consumi attuali

Consumo di energia primaria per riscaldamento

Secondo il presente modello, il consumo medio di energia primaria per riscaldamento all’anno per unità di superficie per gli edifici del comune di Milano è pari a circa 250 kWh/mq/anno. Un valore simile mette immediatamente in luce dei consumi molto elevati per il parco edifici analizzato. Infatti, volendo fare un parallelo con le classi energetiche della Lombardia (CENED) oppure con quelle di CasaClima, tale consumo medio si attesterebbe comodamente in classe G in entrambe le classificazioni, che prevedono infatti rispettivamente 175 e

160 kWh/m²/anno come limite per tale classe. Per quanto riguarda, invece, i consumi per acqua calda sanitaria, la media degli edifici di Milano risulta essere pari a 48 kWh/m²/anno. Anche qui con un parallelo rispetto alla classificazione del CENED, che definisce in 30 kWh/m²/anno la soglia oltre la quale si parla di classe G (classificazione relativa esclusivamente all'ACS), viene confermato quanto detto a proposito dei consumi per riscaldamento, e cioè che gli edifici considerati presentano consumi anche per l'ACS molto elevati.

Un consumo di questo tipo è dovuto principalmente alla classe d'età degli edifici milanesi, in quanto solo il 10% circa di essi è stato realizzato in un periodo successivo agli anni '70, e quindi la quasi totalità degli edifici è stata realizzata in periodo storico in cui non vi era ancora nessun tipo di normativa che prevedesse una qualche misura di risparmio energetico nell'edilizia; la prima norma con questi fini, infatti, risale al 1976 (Legge ordinaria del Parlamento n° 373/76: norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici. Gazzetta Ufficiale Italiana 148). Come risulta, infatti, evidente dal Grafico 4.3, indipendentemente dalla tipologia edilizia, i consumi per riscaldamento degli edifici realizzati prima del 1945 arrivano quasi a 300 kWh/m²/anno, mentre per gli edifici più moderni gli stessi consumi vengono drasticamente ridotti: a partire dal 1972 si hanno fabbisogni annui di energia primaria intorno a 170 kWh/m², per gli edifici realizzati tra il 1982 e il 1991 i consumi si abbassano ulteriormente a 115 kWh/m², per arrivare agli edifici più moderni (realizzati dagli anni '90 in poi) che consumano mediamente 65 kWh/m²/anno.

Nelle tabelle che seguono vengono presentati anche i consumi negli scenari di efficientamento, i quali verranno però commentati in seguito.

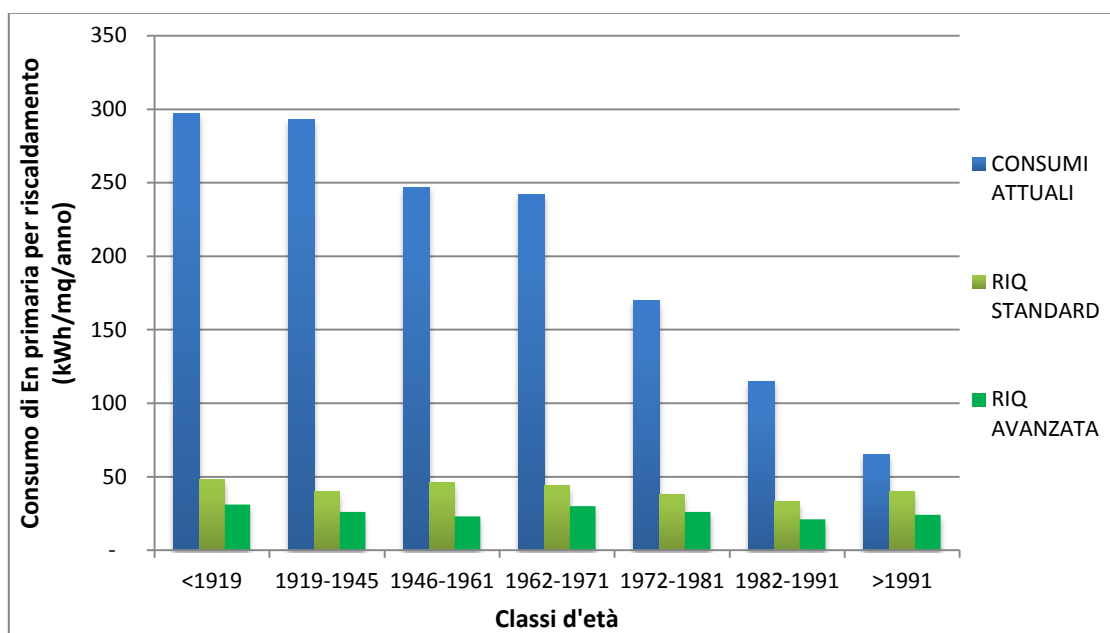


Grafico 4.3 Consumi medi stimati di energia primaria per riscaldamento (kWh/m²/anno) per classe d'età e nei tre scenari

Si pensa quindi che l'elevato consumo sia causato più dall'obsolescenza del parco edifici piuttosto che della tipologia edilizia, in quanto Milano da questo punto di vista risulta ben fornito, presentando circa il 70% dei propri edifici come *blocchi di appartamenti*, cioè la tipologia edilizia più vantaggiosa dal punto di vista dei consumi termici, perché più compatta e con una ridotta superficie disperdente il calore fornito, contrariamente da tipologie isolate e maggiormente disperdenti il calore quali *case monofamiliari* e *case a schiera*, presenti a Milano per poco più di 10 casi su 100. In particolare, facendo riferimento al Grafico 4.4, si nota come siano le case monofamiliari ad essere più energivore, presentando, infatti, un valore medio di circa 200 kWh/m² superiore a quello dei blocchi di appartamenti. Lo scarto, invece, con le case a schiera risulta più ridotto, diversamente da quanto si potesse pensare, presentando queste ultime consumi più vicini ai valori di *edifici monofamiliari* e *blocchi di appartamenti*, che non alle case monofamiliari, morfologicamente più simili. Infine, edifici monofamiliari e blocchi di appartamenti si attestano su livelli di consumi piuttosto simili.

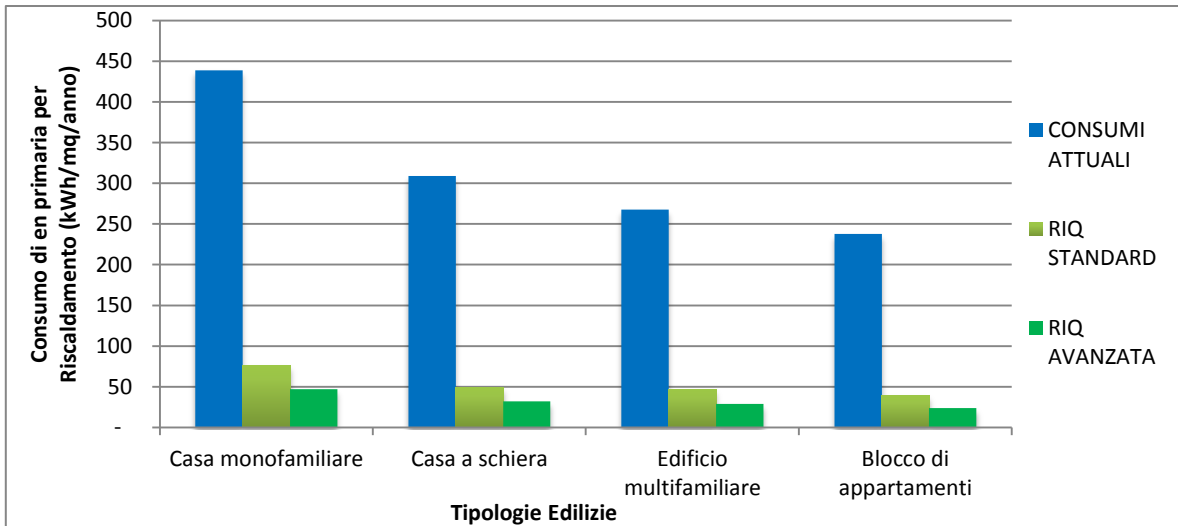


Grafico 4.4 Consumi medi stimati di energia primaria per riscaldamento ($kWh/m^2/anno$) per tipologia edilizia nei tre scenari

Consumo di energia primaria per acqua calda sanitaria

Per quanto riguarda i consumi per acqua calda sanitaria, si parla di cifre molto più contenute, che variano tra il 10% e il 30% dei consumi per riscaldamento. Anche qui si ha una generale riduzione dei consumi al diminuire dell'età degli edifici, anche se, contrariamente da quanto ci si potesse aspettare, i consumi maggiori si hanno per la classe 1946-1961, e non per le prime due. Anche per quanto concerne la tipologia edilizia si ha un risultato differente rispetto ai consumi per riscaldamento, in quanto i consumi minori si hanno per le case monofamiliari e crescono fino ad arrivare al valore massimo per i blocchi di edifici. Questo fatto è probabilmente dovuto alla scarsa efficienza degli impianti centralizzati che solitamente caratterizza edifici condominiali.

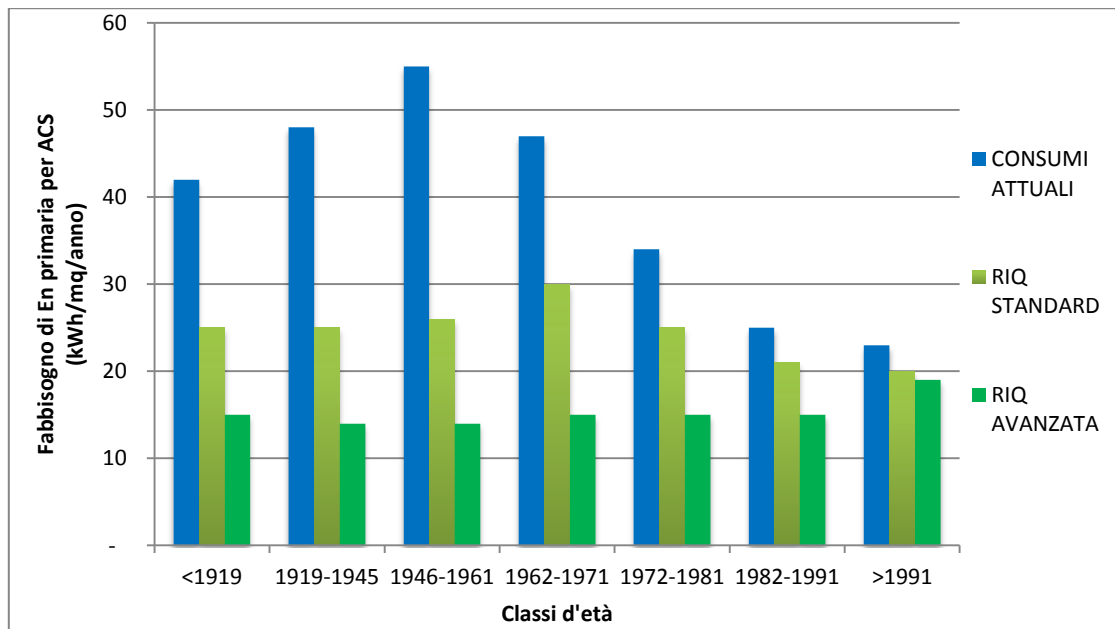


Grafico 4.5 Consumi medi stimati di energia primaria per acqua calda sanitaria ($kWh/m^2/anno$) per classe d'età e nei tre scenari

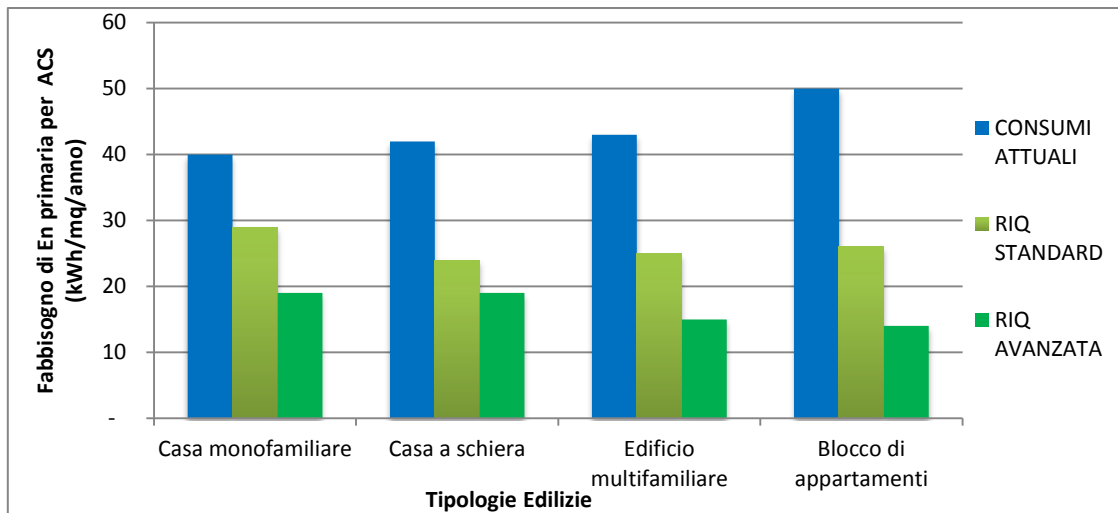


Grafico 4.6 Consumi medi stimati di energia primaria per acqua calda sanitaria (kWh/m²/anno) per tipologia edilizia nei tre scenari

Va fatta, inoltre, un'ulteriore precisazione, in quanto la fonte principale dei valori dei consumi per tipologia edilizia e classe d'età, TABULA, non può considerare eventuali ristrutturazioni importanti o riqualificazioni energetiche apportate al parco edifici a disposizione, e quindi anche per questo motivo i consumi sono molto elevati e probabilmente sovrastimati.

Per quanto riguarda la stima dei consumi attuali per energia termica è possibile condensare i risultati raggiunti nei seguenti punti:

- Il consumo medio per riscaldamento degli edifici di Milano è molto elevato, ed eccede di circa il 50% rispetto al limite della classe energetica G del CENED
- Questo è principalmente dovuto, più che alla tipologia edilizia, all'età media degli edifici milanesi, che si concentrano infatti per il 91% prima del 1971, cioè prima di ogni riferimento legislativo nazionale all'efficienza energetica degli edifici
- Per quanto riguarda l'acqua calda sanitaria, l'andamento dei consumi è meno lineare rispetto a quello per riscaldamento al variare di classe d'età e tipologia edilizia

Commento ai risultati della stima dei consumi in scenari di riduzione della domanda di energia termica

Come detto, oltre alla stima dei consumi allo stato attuale degli edifici per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, si è implementata una stima dei consumi in due distinti scenari in cui vengono portate avanti delle misure di efficientamento sugli edifici esistenti (per una spiegazione delle azioni previste si rimanda al Capitolo 3, paragrafo 3.2.3):

- scenario di *riqualificazione standard*, volta all'applicazione di misure di intervento comunemente utilizzate sul territorio italiano
- scenario di *riqualificazione avanzata*, che prevede l'introduzione di interventi che riflettono le migliori tecnologie disponibili (scenario BAT, *Best Available Technologies*)

In questi due scenari, per ogni tipologia edilizia e per ogni classe d'età, vengono proposte delle misure di riduzione dei consumi di energia termica unite a proposte per l'efficientamento degli impianti di produzione; perciò questi possono definirsi come scenari di riduzione integrata della domanda, che lavora infatti sia a livello

di riduzione globale dei consumi, agendo sull'involucro edilizio, sia a livello di incremento dell'efficienza, riducendo il consumo di energia primaria per kWh termico utile, agendo sull'impiantistica.

Qui di seguito riportiamo le mappe output del modello per questo tipo di stima, ipotizzando che per ogni scenario tutti gli edifici di Milano fossero coinvolti in queste misure di riqualificazione energetica.

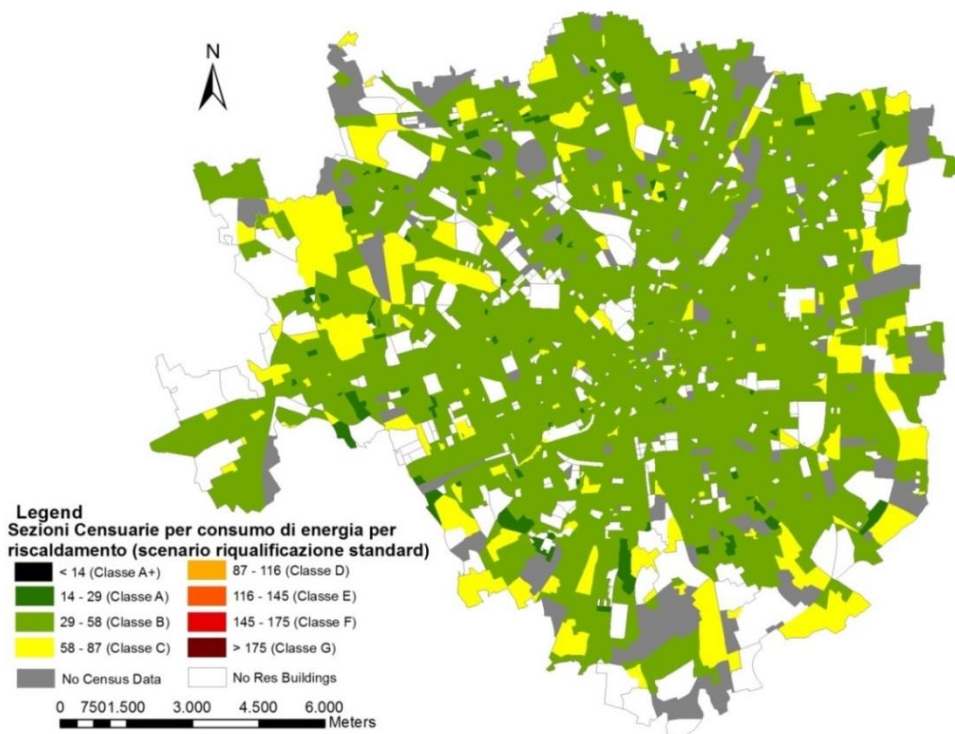


Figura 4.14 Sezioni censuarie classificate per fabbisogno di energia primaria medio nello scenario di riqualificazione standard (kWh/m²/anno)

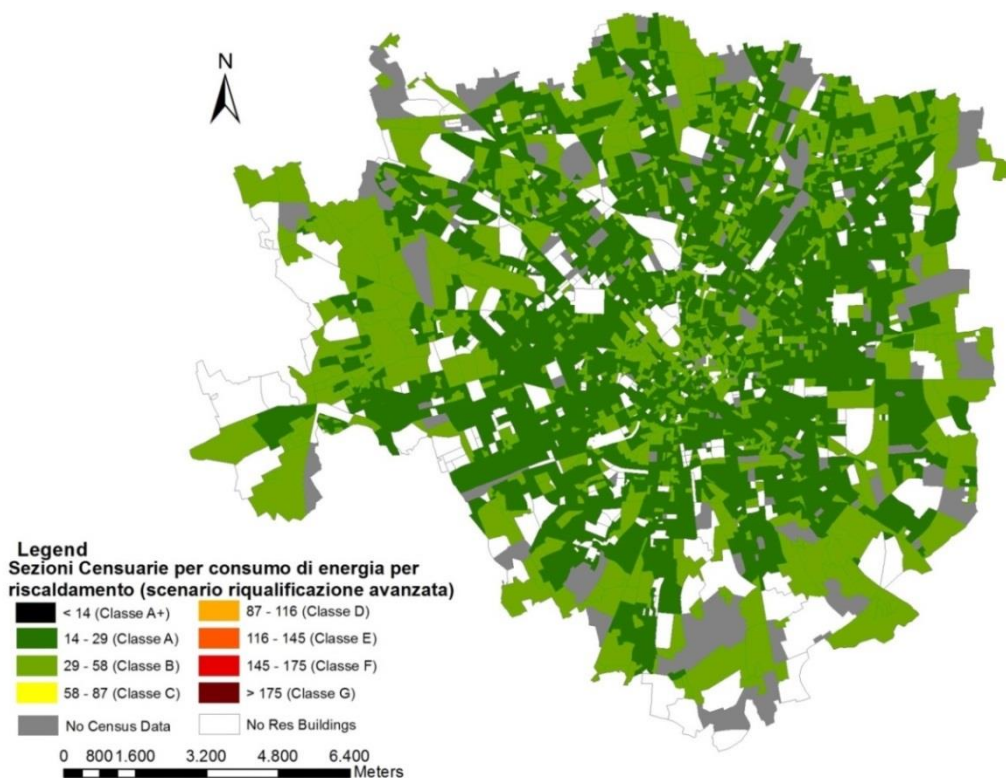


Figura 4.15 Sezioni censuarie classificate per fabbisogno di energia primaria medio nello scenario di riqualificazione avanzata (kWh/m²/anno)

Già dalle mappe si nota una grandissima variazione nelle prestazioni energetiche “della città”, in quanto si passa da una colorazione *rossa* ad una quasi interamente *verde*, e, facendo ancora il parallelo con le classi energetiche della Regione Lombardia, da una classe media ‘G’, ad una di tipo ‘B’. In termini numerici, si passa da un consumo medio annuo per riscaldamento pari a 258 kWh/m², ad un consumo di 43 kWh/m²/anno per lo scenario di riqualificazione standard, fino a consumi pari a 26 kWh/m²/anno per lo scenario di riqualificazione avanzata (vedi Tabella 4.6). Se tutti gli edifici di Milano dovessero quindi essere sottoposti ad una riqualificazione standard si avrebbe un risparmio pari a oltre l’80%, mentre se gli stessi dovessero essere riqualificati in modo avanzato il risparmio andrebbe addirittura quasi al 90%.

Ovviamente tali numeri sono le massime tecnologicamente ottenibili da una riqualificazione che lavora su tutte le leve possibili (involucro edilizio, impiantistica, impianti ausiliari, produzione di energia, ...), e non è ovviamente possibile tenere conto, per esempio, di costi e benefici, impedimenti normativi, ritorni economici ed eventuali incentivi.

Tabella 4.6 Stima dei consumi medi degli edifici del comune di Milano considerati elaborata dal modello, per riscaldamento, nei tre diversi scenari (kWh/mq/anno) con il rispettivo risparmio energetico

	CONSUMI ATTUALI	RIQ STANDARD	RIQ AVANZATA
	<i>Consumi per Riscaldamento</i>		
<i>Consumo medio per edificio</i>	258	43	26
	Risparmio di energia conseguito		
		83,3%	89,9%

Per quanto riguarda, invece, l’efficientamento dei consumi relativi ad acqua calda sanitaria, i risparmi, come d’altra parte i consumi stessi, sono relativamente contenuti, ma pur sempre molto importanti, passando dal 45% per la riqualificazione standard al 70% per la riqualificazione avanzata.

Confrontando poi i consumi stimati per riscaldamento ed ACS per gli scenari di efficientamento, si nota come tendano ad avvicinarsi, in quanto, grazie alla grande riduzione del fabbisogno per riscaldamento, arrivano ad avere lo stesso ordine di grandezza e ad essere confrontabili.

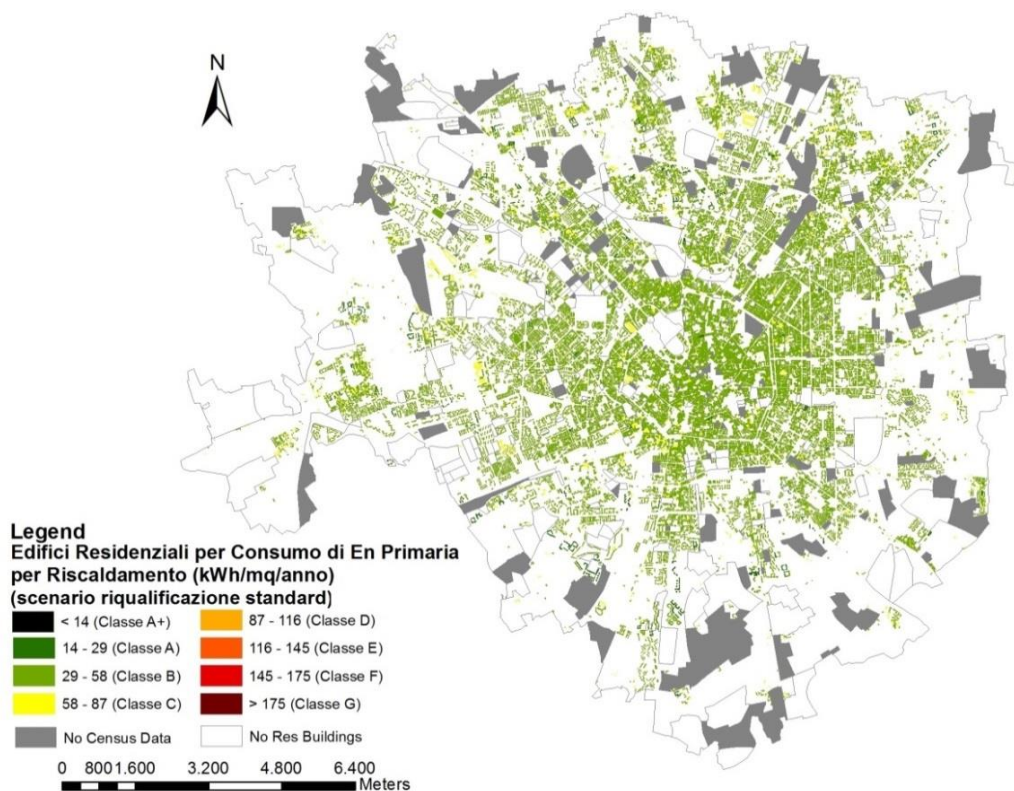


Figura 4.16 Edifici residenziali classificati per consumo di energia primaria per riscaldamento (kWh/m²/anno) nello scenario di riqualificazione standard

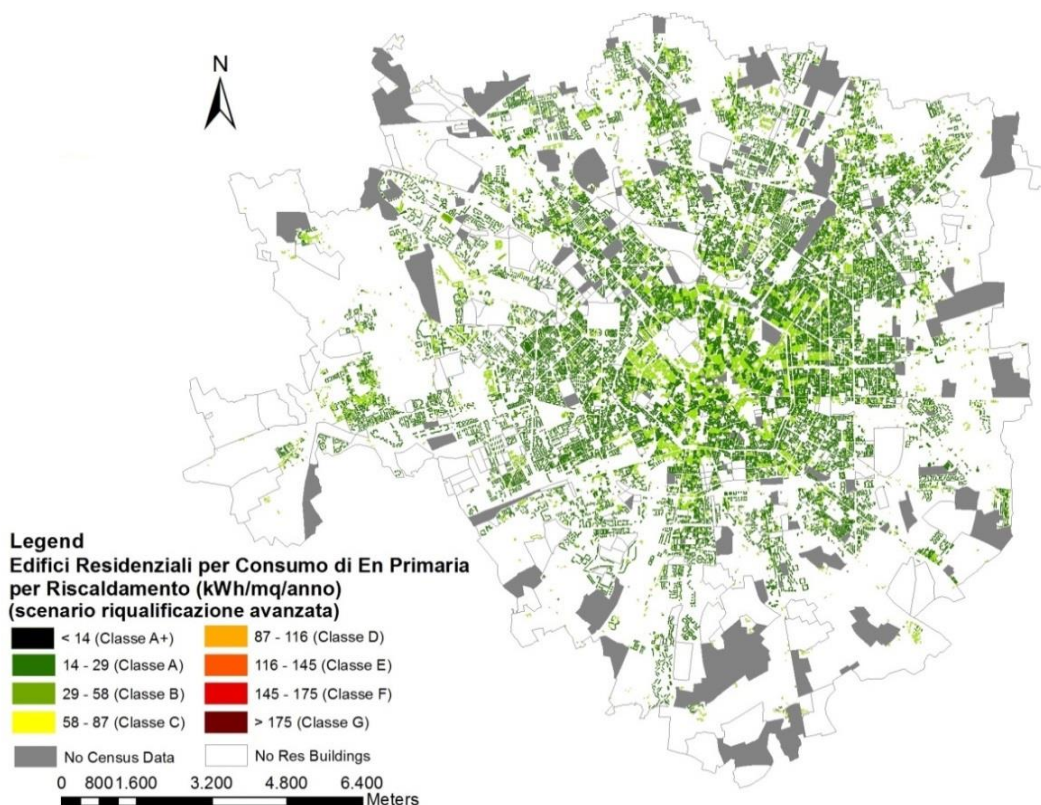


Figura 4.17 Edifici residenziali classificati per consumo di energia primaria per riscaldamento (kWh/m²/anno) nello scenario di riqualificazione avanzata

Tabella 4.7 Stima dei consumi medi degli edifici del comune di Milano considerati elaborata dal modello, per acqua calda sanitaria, nei tre diversi scenari (kWh/m²/anno) con il rispettivo risparmio energetico

	CONSUMI ATTUALI	RIQ STANDARD	RIQ AVANZATA
<i>Consumi per Acqua calda sanitaria</i>			
<i>Consumo medio per edificio</i>	48	26	14
Risparmio di energia rispetto al consumo attuale		45,8%	70,8%

In Tabella 4.8 sono, invece, riportati, oltre ai consumi medi per edificio, i consumi totali annui complessivi di tutti gli edifici considerati nella stima, ottenuti sempre moltiplicando il consumo medio per la superficie media delle abitazioni considerate e per il loro numero. Risaltano con evidenza gli oltre 10mila GWh (10.636) che si risparmierebbero annualmente se tutti gli edifici milanesi dovessero intraprendere una riqualificazione standard, con un risparmio dell'83,3%; con una riqualificazione avanzata il risparmio ammonterebbe addirittura a 11.477 GWh ogni anno, con un risparmio dell'89,9%.

Tabella 4.8 Stima dei consumi medi degli edifici del comune di Milano e dei consumi totali di tutto il parco edifici considerato, per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, nei tre diversi scenari

	CONSUMI ATTUALI		RIQ STANDARD		RIQ AVANZATA	
	Riscaldamento	ACS	Riscaldamento	ACS	Riscaldamento	ACS
<i>Consumi medi (kWh/m²/anno)</i>	258	48	43	26	26	14
<i>Consumi totali (GWh/anno)</i>	12.763	2.374	2.127	1.286	1.286	693
Riduzione rispetto ai consumi attuali			83,3%	45,8%	89,9%	70,8%

Per quanto riguarda il risparmio energetico ottenibile al variare delle classe d'età degli edifici, si nota come sia possibile ottenere vantaggi enormi dalla riqualificazione degli edifici più vecchi, con risparmi dell'ordine di 200-250 kWh/m²/anno per gli edifici realizzati prima del 1971, risparmio che ovviamente si riduce per edifici realizzati più di recente. Guardando il dato percentuale riguardante la riqualificazione standard, per gli edifici

realizzati prima del 1982 il risparmio è sempre prossimo all'80%, ma anche per gli edifici realizzati tra il 1982 ed il 1991 il risparmio è ancora molto consistente (71%), mentre per gli edifici più recenti (>1991) scende al 38%. Per quanto concerne la riqualificazione avanzata, i risparmi per gli edifici più datati sono addirittura intorno al 90%, mentre il risparmio minore si ha sempre per gli edifici realizzati dopo il 1991 e risulta comunque essere pari al 63%.

Passando ai consumi per acqua calda sanitaria, i risparmi in termini assoluti sono ovviamente molto minori, e anche tenendo conto dei valori percentuali i risparmi sono inferiori a quelli ottenibili da riscaldamento, anche se comunque, nel caso di riqualificazione standard, si parla di valori intorno al 50% per gli edifici più vecchi, per arrivare a percentuali prossime al 15% per gli edifici datati oltre il 1982; nel caso di riqualificazione avanzata, i risparmi percentuali per gli edifici più vecchi variano intorno al 70%, risparmio che precipita al 17% per gli edifici post 1991.

Mentre i risparmi di energia termica per riscaldamento conseguibili dalle due riqualificazioni variano molto in dipendenza della classe d'età dell'edificio, per quanto riguarda la tipologia edilizia si notano percentuali praticamente identiche tra le 4 tipologie, prossime all'83% in caso di riqualificazione standard, prossime al 90% in caso di riqualificazione avanzata. Tuttavia, passando ai risparmi in termini assoluti, la differenza tra le differenti tipologie edilizie emerge, in quanto dalla riqualificazione standard ed avanzata di una casa monofamiliare si ottengono all'anno rispettivamente 363 e 392 kWh/m², mentre riqualificando un blocco di appartamenti il risparmio assoluto scende rispettivamente a 199 e 214 kWh/m², risparmi in entrambi i casi molto ampi e vantaggiosi.

Tabella 4.9 Stima dei risparmi di energia conseguibili dalla riqualificazione (standard o avanzata) del parco edifici di Milano per classe d'età (kWh/m²/anno e %)

	RIQ STANDARD				RIQ AVANZATA			
	Riscaldamento		ACS		Riscaldamento		ACS	
	kWh/m ² /anno	%	kWh/m ² /anno	%	kWh/m ² /anno	%	kWh/m ² /anno	%
<1919	249	84	17	40	266	90	27	64
1919-1945	253	86	23	48	267	91	34	71
1946-1961	201	81	29	53	224	91	41	75
1962-1971	198	82	17	36	212	88	32	68
1972-1981	132	78	9	26	144	85	19	56
1982-1991	82	71	4	16	94	82	10	40
>1991	25	38	3	13	41	63	4	17
Totale	215	83	22	46	232	90	34	71

Passando ai consumi di energia termica per acqua calda sanitaria, i risparmi assoluti sono minori, così come anche quelli percentuali, che però, a differenza dei consumi per riscaldamento, presentano una maggiore dipendenza dalla tipologia edilizia. Qui le percentuali si attestano intorno al 46% per la riqualificazione standard, e variano tra il 53 ed il 72% per quella avanzata. Come si era fatto notare nella sezione appositamente dedicata, diversamente dai consumi per riscaldamento, quelli per acqua calda sanitaria mostrano una dipendenza inversa rispetto alle tipologie edilizie, presentano i consumi minori per le utenze di tipo isolato, che, in particolare per le case monofamiliari, fanno vedere anche percentuali di risparmio energetico minori rispetto alle altre tipologie. Di seguito grafici e mappe dei valori appena discussi.

Tabella 4.10 Stima dei risparmi di energia conseguibili dalla riqualificazione (standard o avanzata) del parco edifici di Milano per tipologia edilizia (kWh/m²/anno e %)

	RIQ STANDARD				RIQ AVANZATA			
	Riscaldamento		ACS		Riscaldamento		ACS	
	kWh/m ² /anno	%	kWh/m ² /anno	%	kWh/m ² /anno	%	kWh/m ² /anno	%
Casa monofamiliare	363	83	11	28	392	89	21	53
Casa a schiera	260	84	18	43	277	90	23	55
Edificio multifamiliare	221	82	18	42	239	89	28	65
Blocco di appartamenti	199	84	24	48	214	90	36	72
Totale	215	83	22	46	232	90	34	71

Quanto detto fino a questo punto può essere riassunto nei seguenti quattro grafici (vedi da Grafico 4.7 a Grafico 4.10), in cui risulta evidente come il risparmio di energia termica cresca sensibilmente all'aumentare dell'età dell'edificio che si va a riqualificare, mentre le differenze tra le diverse tipologie edilizie risultano relativamente più contenute, anche se tra le due categorie "estreme", case monofamiliari e blocchi di appartamenti, sia effettivamente più vantaggiosa, a parità di classe d'età, da un punto di vista del risparmio energetico la riqualificazione dell'utenza isolata.

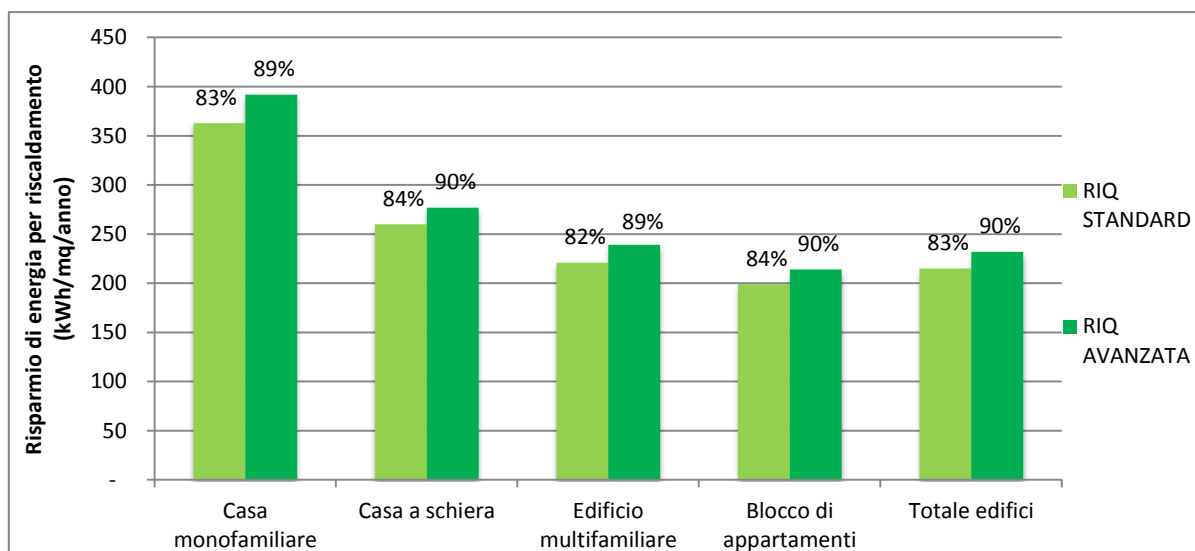


Grafico 4.7 Stima dei risparmi medi in termini di energia (kWh/m²/anno) e percentuali per edificio dei due scenari di riqualificazione rispetto alla stima del consumo attuale per tipologia edilizia (consumi per riscaldamento)

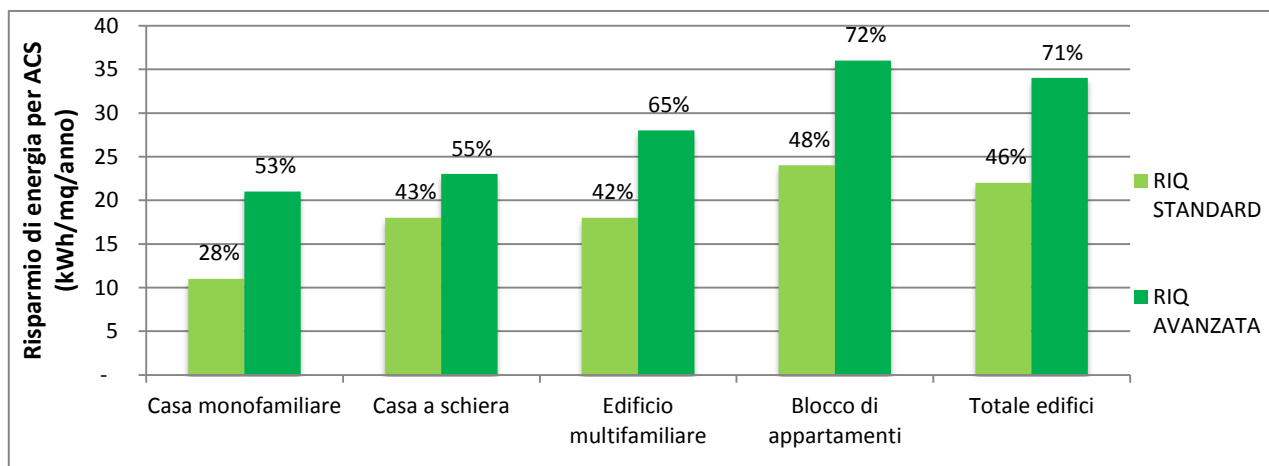


Grafico 4.8 Stima dei risparmi medi in termini di energia (kWh/m²/anno) e percentuali per edificio dei due scenari di riqualificazione rispetto alla stima del consumo attuale per tipologia edilizia (consumi per acqua calda sanitaria)

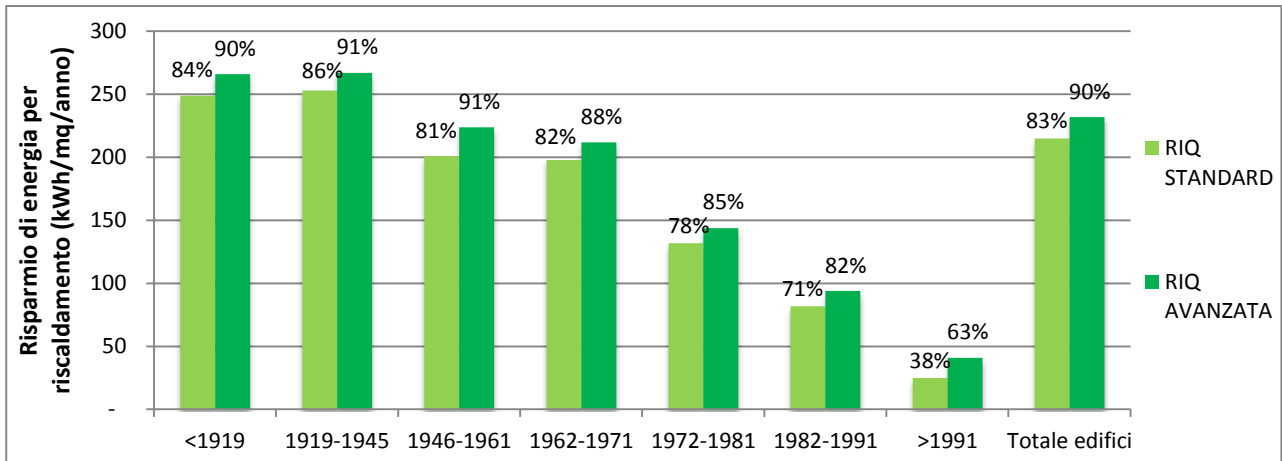


Grafico 4.9 Stima dei risparmi medi in termini di energia (kWh/m²/anno) e percentuali per edificio dei due scenari di riqualificazione rispetto alla stima del consumo attuale per classe d'età (energia per riscaldamento)

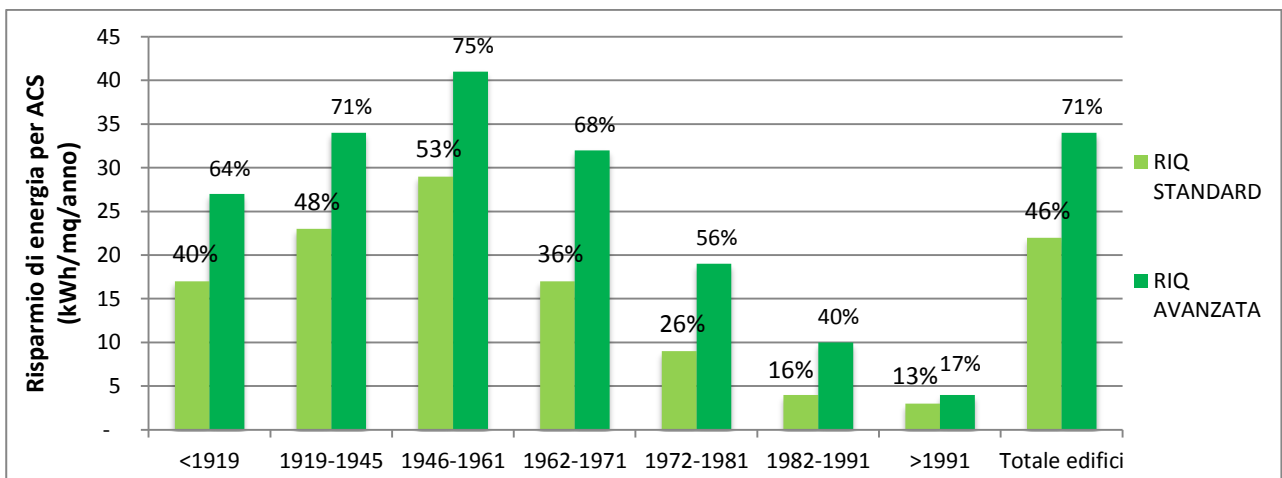


Grafico 4.10 Stima dei risparmi medi in termini di energia (kWh/m²/anno) e percentuali per edificio dei due scenari di riqualificazione rispetto alla stima del consumo attuale per classe d'età (energia per acqua calda sanitaria)

Per finire diamo uno sguardo d'insieme alle mappe di Figura 4.18 e Figura 4.19, dove si nota appunto come la gran parte delle sezioni censuarie milanesi presenti risparmi di energia compresi tra i 160 e i 280 kWh/m²/anno per lo scenario di riqualificazione standard e tra i 180 e i 300 kWh/m²/anno per lo scenario di riqualificazione avanzata. Dal punto di vista "geografico", non si ha una marcata uniformità di tali risparmi, anche se i valori più frequenti citati sopra sono particolarmente concentrati nella zona centrale, mentre nelle aree di cintura i risparmi sono molto variabili, in quanto si passa da sezioni con risparmi annui di oltre 300 kWh/m², a sezioni con risparmi molto ridotti, al di sotto degli 80.

Infine, per quanto riguarda i risparmi in termini percentuali (vedi Figura 4.20 e Figura 4.21), si nota come siano per la maggior parte compresi tra 80% e 90% per lo scenario di riqualificazione standard e tra 85% e 90% per lo scenario di riqualificazione avanzata; la variazione "geografica" è qui invece molto contenuta.

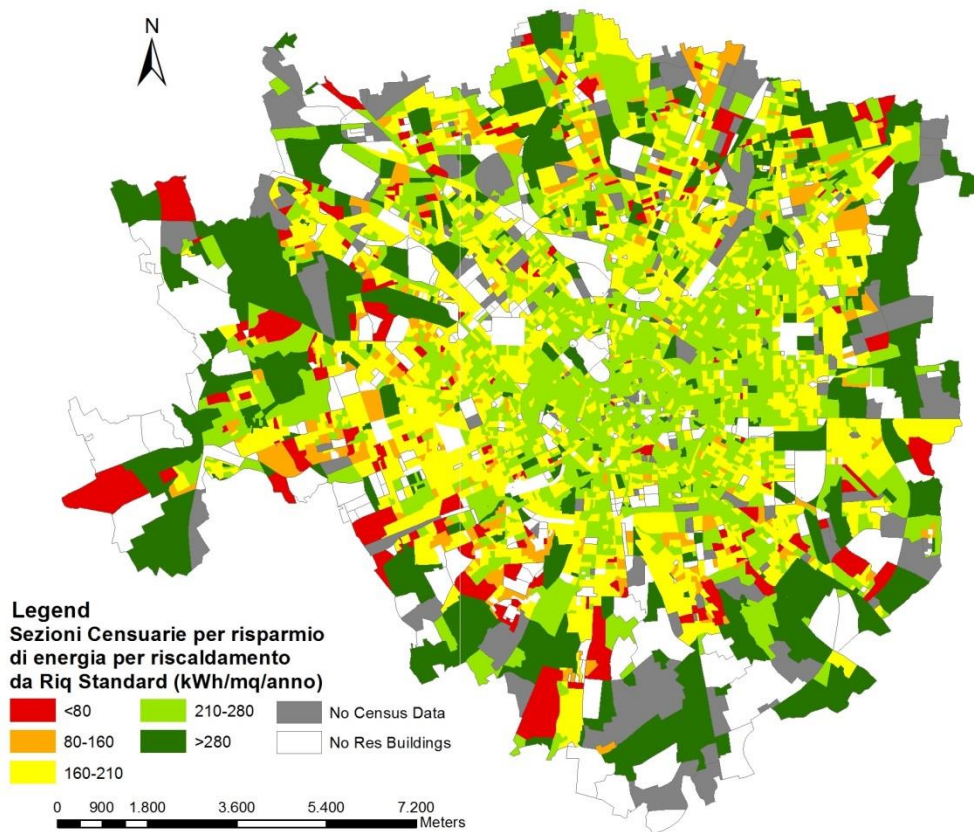


Figura 4.18 Sezioni censuarie classificate per risparmio medio di energia per riscaldamento conseguito da riqualificazione standard (kWh/m²/anno)

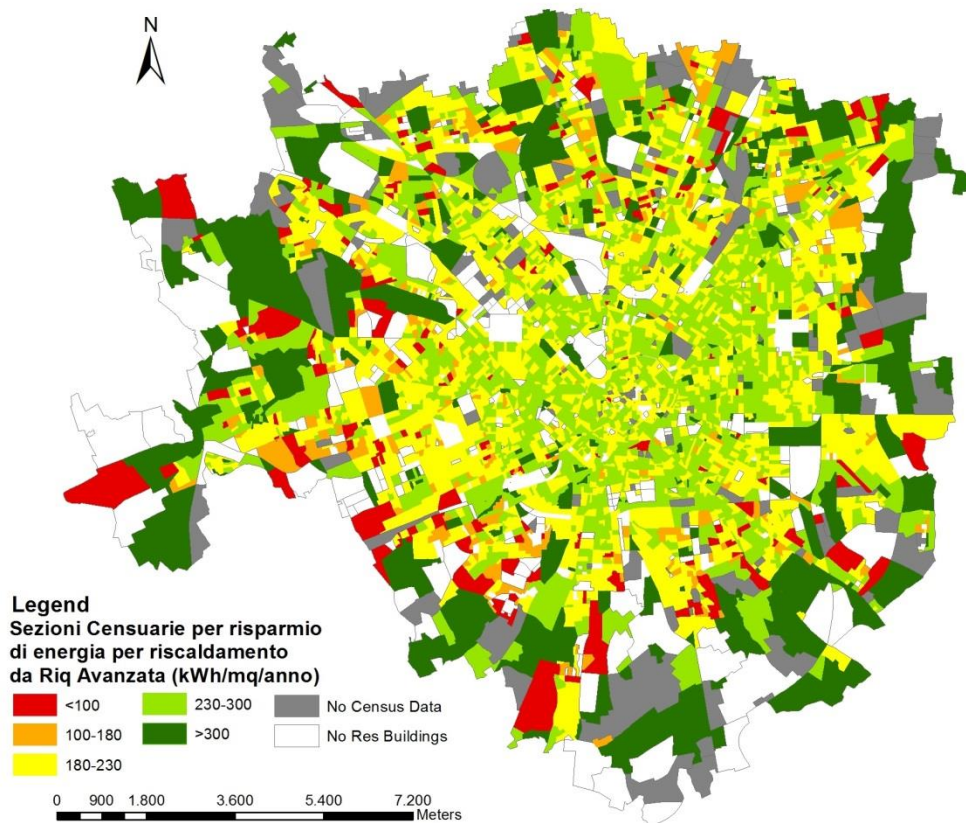


Figura 4.19 Sezioni censuarie classificate per risparmio medio di energia per riscaldamento conseguito da riqualificazione avanzata (kWh/m²/anno)

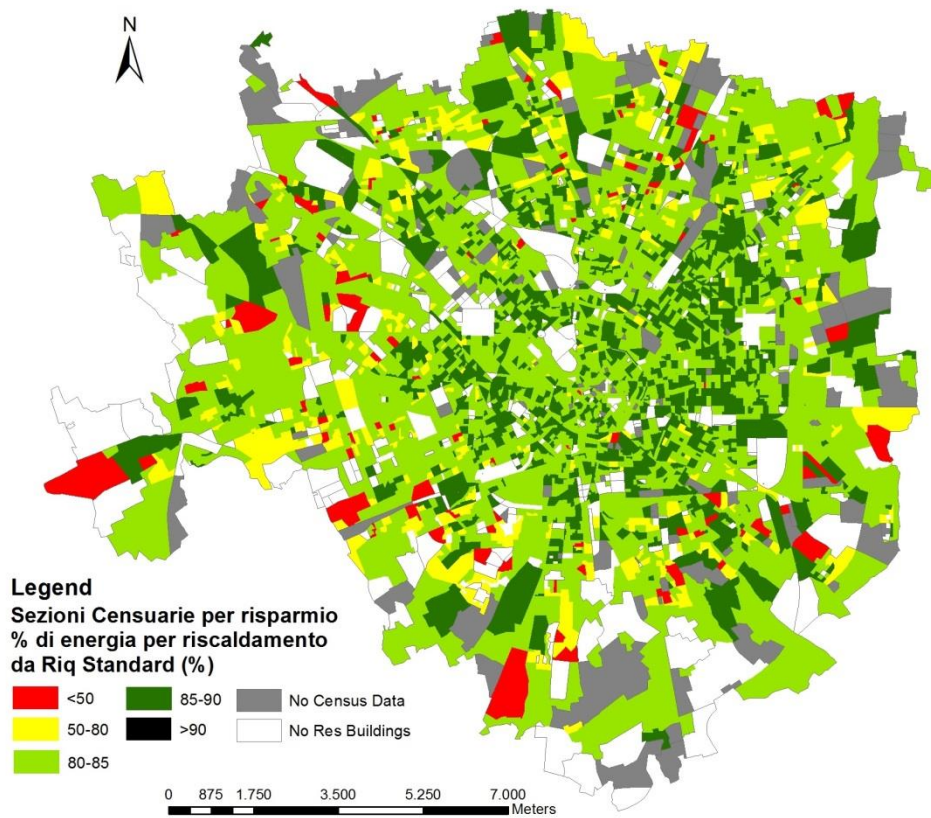


Figura 4.20 Sezioni censuarie classificate per risparmio medio di energia per riscaldamento conseguito da riqualificazione standard in termini percentuali (%)

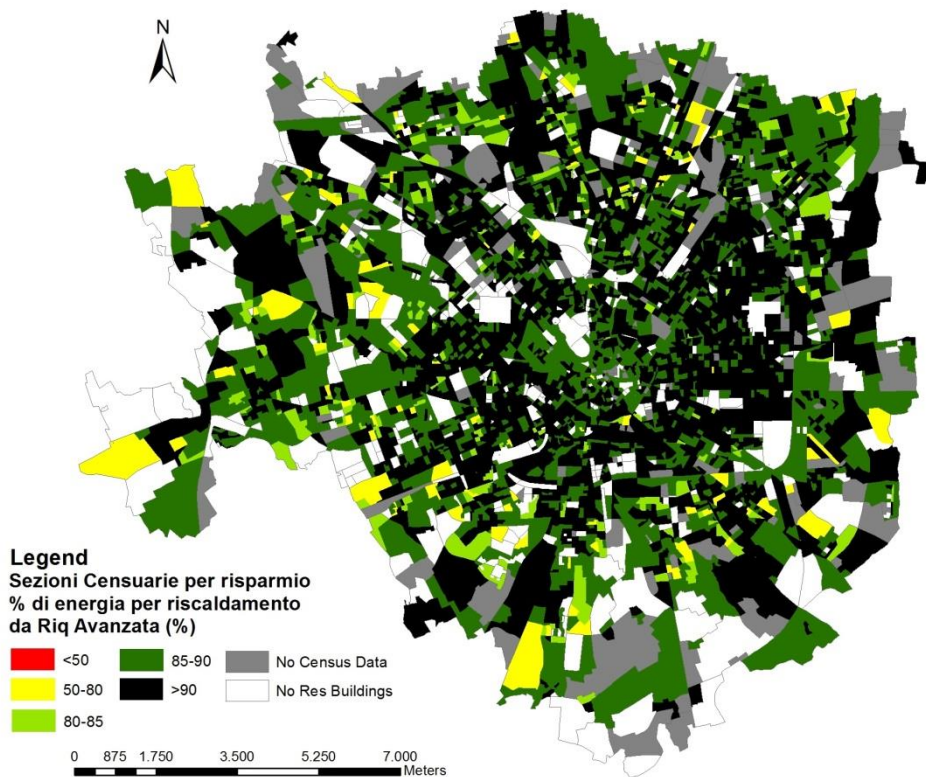


Figura 4.21 Sezioni censuarie classificate per risparmio medio di energia per riscaldamento conseguito da riqualificazione avanzata in termini percentuali (%)

Per quanto riguarda la stima dei consumi in scenari di riduzione del fabbisogno per energia termica è possibile condensare i risultati raggiunti nei seguenti punti:

- Il potenziale di risparmio energetico stimato è molto ampio, con percentuali tra l'80 ed il 90% per riscaldamento e tra il 50 e il 70% per ACS, rispettivamente per riqualificazione standard ed avanzata
- Indipendentemente dal livello di riqualificazione il risparmio è molto vantaggioso, nel senso che, per esempio, basterebbe anche una riqualificazione standard per ridurre dell'80% i consumi di energia termica per riscaldamento
- Gli edifici più vecchi presentano il potenziale di risparmio maggiore, mentre, in termini percentuali, il risparmio resta omogeneo al variare della tipologia edilizia

4.2 Stima dei consumi di energia elettrica per gli edifici

4.2.1 Stima dei consumi elettrici attuali

Per quanto riguarda la stima dei consumi di energia elettrica, diversamente dai consumi per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, si è adottato un procedimento più diretto e semplificato, che si basa su un fattore di consumo a livello generale preso, come detto nel capitolo riferito al modello, da un lavoro consistente in campagne di misurazioni dei consumi elettrici di un certo numero di utenze europee, tra oltre 100 abitazioni italiane, molte di queste in Lombardia, di cui molte a Milano. In particolare si è scelto di prendere come valore di riferimento il consumo di energia elettrica medio annuo per utenza, pari a 3.250 kWh(/utenza/anno). Prima di passare ai risultati dei consumi complessivi, è bene precisare che per i consumi elettrici si è mantenuta come unità di riferimento l'unità censuaria, in quanto il censimento ISTAT fornisce per ognuna di esse il numero di abitazioni (quindi di utenze), e ci si è quindi "agganciati" a tale dato per determinare il consumo elettrico di ogni sezione censuaria. Non è stato possibile, invece, determinare i consumi elettrici alla scala del singolo edificio, in quanto non si hanno a disposizione dati sul numero di utenze all'interno dell'edificio; si sarebbe potuto stimare in modo approssimativo tale dato, ma sarebbe risultato molto impreciso, rispetto al dato ISTAT delle sezioni.

Per determinare il consumo elettrico complessivo della città di Milano, si è semplicemente moltiplicato il consumo medio annuo per utenza per il numero di abitazioni per ogni sezione censuaria e si è ottenuto il valore del consumo di energia elettrica complessivo per ogni sezione di censimento; quindi, sommando tali consumi, il consumo complessivo delle utenze residenziali del comune di Milano, risultato pari a 2.058 GWh/anno.

Come detto il procedimento è più semplice e lineare rispetto a quello intrapreso per la stima dei consumi di energia termica, ma non per questo la stima deve essere meno precisa, in quanto i consumi elettrici sono molto più omogenei al variare dell'età dell'edificio piuttosto che della rispettiva tipologia edilizia, e quindi anche una stima basata su di un semplice, ma importante e preciso, indicatore può risultare altrettanto efficace di quella più complessa e diversificata adottata per la stima dei consumi termici, questi sì, invece, molto variabili con età dell'edificio e tipologia edilizia.

Di seguito la mappa con i consumi di energia elettrica attuali applicati alle sezioni censuarie di Milano.

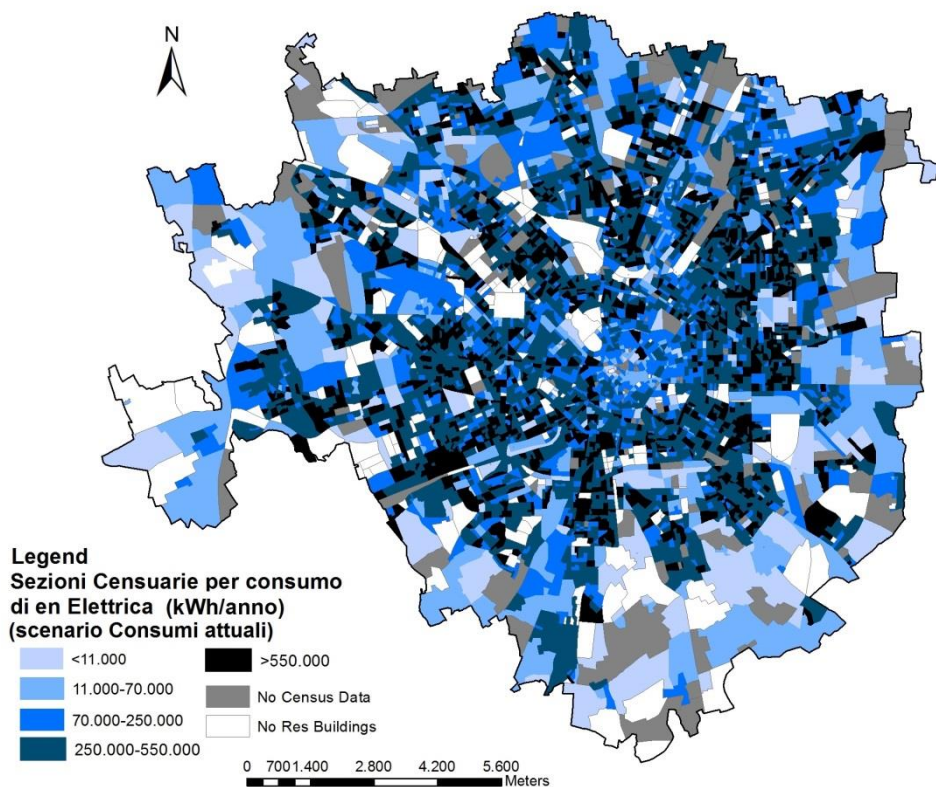


Figura 4.22 Mappa della stima dei consumi attuali di energia elettrica alla scala delle sezioni censuarie (kWh/anno)

Diversamente dalle varie mappe che riportano i consumi di energia termica, quella dei consumi elettrici è sicuramente meno significativa, in quanto dipende dal numero di abitazioni per ogni sezione e quindi dalla densità delle abitazioni sul territorio comunale. In ogni caso è utile per avere un'idea di come è distribuito il consumo di energia elettrica, e quindi, in particolare in un'ottica di autoproduzione da fonti rinnovabili, per definire aree in cui ci dovrà essere una maggiore densità di "autogenerazione".

4.2.2 Stima dei consumi in scenari di riduzione della domanda di energia elettrica per efficientamento

Come detto nel capitolo riguardante il modello, per quanto riguarda gli scenari di efficientamento dei consumi elettrici, basandosi sempre sui lavori REMODECE, EURECO e MICENE, si è quantificata con il 40% la quota massima di riduzione dei consumi elettrici per utenza, e quindi si sono definiti due scenari di riduzione progressiva dei consumi, il primo in cui i consumi vengono ridotti del 20%, ed il successivo in cui si consegue la riduzione massima dei consumi pari al 40%. Si sono mantenuti questi due livelli al fine di suddividere in percorso di riqualificazione in due successivi step, ipotizzando, quindi, che sul breve/medio periodo i consumi possano ridursi complessivamente di un 20%, per arrivare al 40% sul medio/lungo periodo (vedi Tabella 4.11).

Tabella 4.11 Tabella riassuntiva con i dati stimati per il consumo di energia elettrica attuali e nei due scenari di efficientamento

	Consumi attuali	Scenario -20%	Scenario -40%
Consumo medio per sezione censuaria	345.313 kWh/anno/sez	276.251 kWh/anno/sez	207.188 kWh/anno/sez
Consumo comunale totale	2.058 GWh/anno	1.646 GWh/anno	1.234 GWh/anno

Di seguito le mappe derivanti da scenari in cui si ipotizza una riduzione dei consumi elettrici rispettivamente pari al 20% e al 40%.

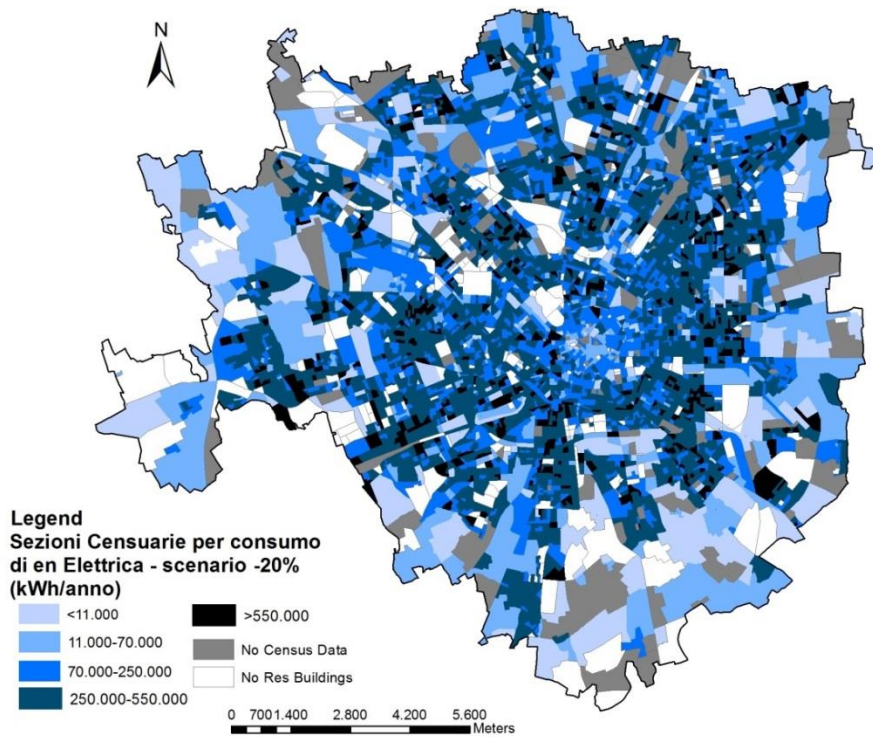


Figura 4.23 Mappa della stima dei consumi di energia elettrica alla scala delle sezioni censuarie nello scenario di riduzione dei consumi del 20% (kWh/anno)

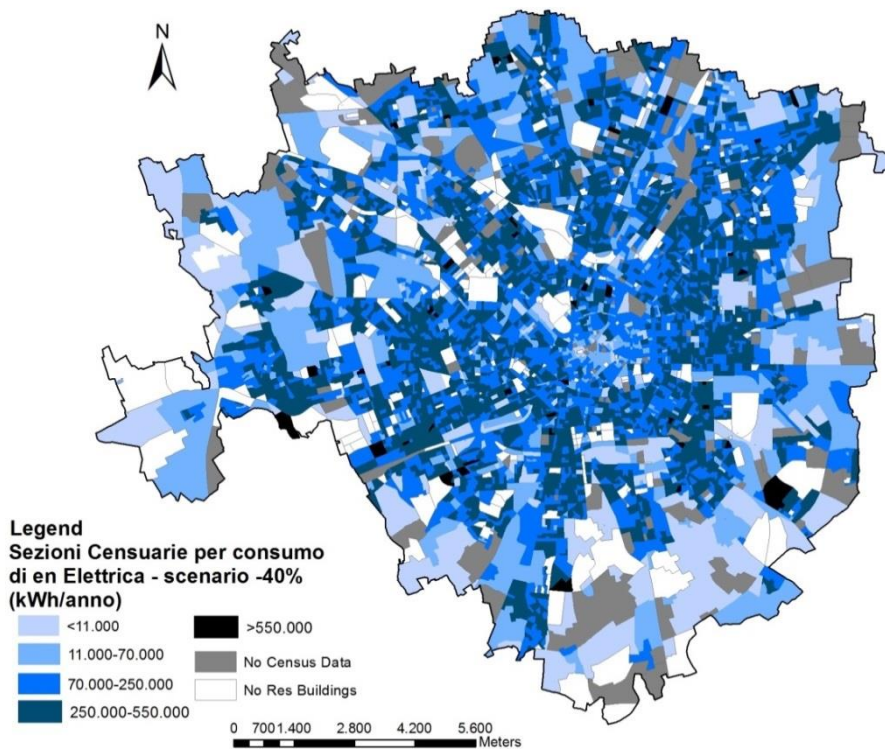


Figura 4.24 Mappa della stima dei consumi di energia elettrica alla scala delle sezioni censuarie nello scenario di riduzione dei consumi del 40% (kWh/anno)

Per quanto riguarda la stima dei consumi elettrici, i dati ottenuti in output definiscono una situazione in cui

- i consumi attuali elettrici risultano essere in un rapporto di 1:6 rispetto ai consumi attuali per riscaldamento
- negli scenari di efficientamento tale proporzione passa all'incirca ad un rapporto di 1:1
- In generale, non è molto significativo commentare questo tipo di consumi, in quanto, a differenza dei consumi termici, troppo omogenei tra le varie utenze

4.3 Analisi dei consumi degli edifici per brani di tessuto urbano

Con lo scopo di dare all'analisi un maggior taglio urbanistico, si è deciso di condurre un'ulteriore analisi dei dati stimati sulla base di tessuti urbani differenti. Ci si è basati su un'analisi simile, condotta sempre sulla città di Milano da Doni e Keim (2010); si rimanda al capitolo 2 per maggiori informazioni in proposito.

4.3.1 Descrizione dei tessuti considerati

Con il termine "tessuto urbano" si intende un'organizzazione territoriale ed urbanistico-edilizia, che presenta caratteri di omogeneità dal punto di vista della trasformazione storica, del rapporto formale e dimensionale tra spazi pubblici e spazi privati, del rapporto tra tipo edilizio e lotto di riferimento, con la prevalenza di una o più funzioni urbanistiche principali. Alla luce di questa definizione, Doni e Keim hanno suddiviso l'urbanizzato di Milano nelle seguenti categorie (macrotessuti): *Traditional urban block* (TUB, isolati tradizionali/storici), *Regular urban block* (RUB, isolati regolari), *Slab housing* (SH, isolati di edifici a stecca), *Tower block housing* (TB, isolati di edifici a torre) e *Detached housing* (DH, isolati di villette isolate e/o a schiera). Seguendo le linee caratterizzanti di questi 5 macrotessuti (vedi paragrafo successivo) siamo andati a definire cinque diversi "campioni di città" per ogni macrotessuto, per valutarne quindi le prestazioni energetiche, andando perciò a considerare complessivamente 25 porzioni di tessuti urbani, classificate in base agli aspetti urbanistici sopra riportati. Il processo di identificazione di questi ambiti ha seguito una semplificazione e generalizzazione, in modo da far emergere i caratteri salienti di ciascuno di essi.

Approfondiamo qui di seguito le caratteristiche morfologiche ed urbanistiche che distinguono questi macrotessuti, in modo da specificare meglio le differenze tra i brani di città presi in esame.

Le parti di città classificate come *Traditional Urban Block (TUB)* corrispondono a quei tessuti localizzati nella zona della città storica, caratterizzati da una morfologia edilizia tale da creare una cortina continua su filo strada, formata da edifici singoli o agglomerati. Le altezze dei complessi edilizi sono in media comprese tra i quattro e sei piani fuori terra. Il mix funzionale vede anche la presenza di funzioni residenziali (dove spesso il piano terra è commerciale) e servizi.

Alla tipologia *Regular Urban Block (RUB)* appartengono parti di città presenti nelle zone a corona del centro storico, dove prevalgono tessuti chiusi a medio-alta densità caratterizzati da edifici in linea o a corte che formano un fronte continuo su strada. Gli edifici presentano altezze molto varie, comprese in media tra i quattro e gli otto piani fuori terra, con una sufficiente dotazione di verde privato e spazi pertinenziali, accessibili tramite androni carrabili. La destinazione prevalente è quella residenziale, con attività commerciali e di servizio al piano terreno, garantendo un medio mix funzionale.

I tessuti urbani appartenenti alla tipologia *Slab Housing (SH)* sono parti di città localizzate nelle zone urbane semiperiferiche, brani di città dove il tipo edilizio prevalente è l'edificio residenziale a stecca, per cui tessuti aperti a medio alta densità, con edifici arretrati rispetto al filo stradale e tipologie edilizie simili; si caratterizzano per la presenza di spazi verdi o aperti tra i corpi di fabbrica, determinando così una maggiore permeabilità anche di tipo visivo. Generalmente queste tipologie di tessuti sono frutto di un progetto comune e quindi un disegno


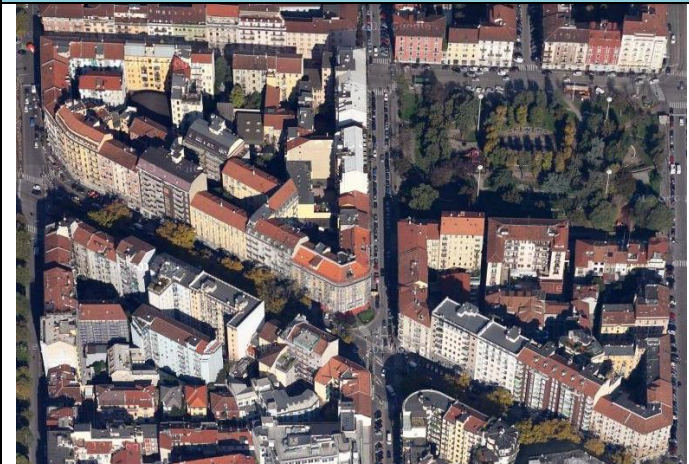
unitario, spesso finalizzato alla costruzione di quartieri a prevalente carattere popolare. Si nota il netto prevalere di edifici a funzione residenziale, intervallati da edifici a servizi, determinando un basso mix funzionale.



I tessuti urbani rientranti nella macrotipologia delle *Tower Block housing (TB)*, possiedono caratteri urbanistici simili alla categoria delle *slab housing*, ma in questo caso prevalgono edifici a torre che è parte di un disegno urbano in cui sono presenti anche edifici a stecca; si osserva un'altezza media solitamente superiore ai cinque piani fuori terra. La lettura dell'evoluzione storica colloca la nascita di questi tessuti dopo gli anni '50 come per i quartieri unitari delle *slab housing*, ma spesso derivanti anche da progetti organici posteriori agli anni settanta. La configurazione generale di queste parti di città determina lo sviluppo di tessuti con buona dotazione di verde, con edifici a prevalente funzione residenziale, spesso intervallati da edifici destinati a servizi di quartiere, con basso mix funzionale.

La tipologia delle *Detached housing (DH)* si caratterizza per la prevalenza di edifici con una bassa densità edilizia; tessuti di questo tipo si localizzano solitamente in zone urbane semiperiferiche, ma non è rara la localizzazione semicentrale spesso causata dalle scelte dei piani urbanistici. Si osserva un netto prevalere della destinazione residenziale basata su una lottizzazione frammentata che privilegia le tipologie della villetta singola/bifamiliare, mini-palazzina o a schiera. Gli immobili sono isolati su lotto, con un'altezza variabile tra 1-3 piani e sono dotati di una discreta quantità di verde privato, che garantisce una buona permeabilità del terreno. Il mix funzionale è relativamente basso, giacché prevalgono edifici a funzione residenziale, anche se è possibile riscontrare la presenza di aree destinate a servizi.

Per maggiori informazioni riguardo ai tessuti considerati si veda Tabella 4.12 qui di seguito ed in Appendice 3 i dati di ogni campione considerato.

Tabella 4.12 Foto da GoogleEarth con descrizione e principali caratteristiche delle 5 tipologie di tessuto urbano considerate

<i>Traditional Urban Block (TUB)</i>		Tessuto
	Tessuto ad alta densità, caratterizzato da edifici singoli o agglomerati, con altezza media tra i 4 e i 6 piani	Descrizione tessuto
	Zona della città storica	Localizzazione prevalente
	Medio – prevalenza di edifici residenziali, con attività commerciali e di servizio al pian terreno	Mix funzionale
	Blocchi di appartamenti	Tipologia edilizia prevalente
	<1919	Classe d'età prevalente
<i>Regular Urban Block (RUB)</i>		Tessuto
	Prevalenza di morfologia chiusa a medio-alta densità, con edifici in linea o a corte con altezze molto varie (4- 8 piani)	Descrizione tessuto
	Zone a corona del centro storico	Localizzazione prevalente
	Medio – prevalenza di edifici residenziali, con attività commerciali e di servizio al pian terreno	Mix funzionale
	Blocchi di appartamenti ed edifici multifamiliari	Tipologia edilizia prevalente
	1919-1945	Classe d'età prevalente

<i>Slab Housing (SB)</i>		<i>Tessuto</i>
	Tessuto aperto a medio-alta densità, caratterizzato da edifici a stecca	<i>Descrizione tessuto</i>
	Zone semiperiferiche	<i>Localizzazione prevalente</i>
	Basso – Prevalenza di edifici residenziali	<i>Mix funzionale</i>
	Blocchi di appartamenti	<i>Tipologia edilizia prevalente</i>
	1946-1971	<i>Classe d'età prevalente</i>
<i>Tower Block (TB)</i>		<i>Tessuto</i>
	Prevalenza di edifici a torre, ma anche a stecca Altezza media superiore ai 5 piani	<i>Descrizione tessuto</i>
	Zone periferiche e semiperiferiche	<i>Localizzazione prevalente</i>
	Basso – Prevalenza di edifici residenziali	<i>Mix funzionale</i>
	Blocchi di appartamenti	<i>Tipologia edilizia prevalente</i>
	1962-1981	<i>Classe d'età prevalente</i>
<i>Detached Housing (DH)</i>		<i>Tessuto</i>
	Edifici con una bassa densità edilizia; lottizzazione frammentata, con immobili isolati su lotto, con altezze tra 1-3 piani	<i>Descrizione tessuto</i>
	Zone periferiche e semiperiferiche	<i>Localizzazione prevalente</i>
	Basso – Prevalenza di edifici residenziali	<i>Mix funzionale</i>
	Case monofamiliari e case a schiera	<i>Tipologia edilizia prevalente</i>
	1946-1971	<i>Classe d'età prevalente</i>

4.3.2 Definizione dei campioni di tessuto urbano

Seguendo le caratteristiche dei diversi tessuti definite nel paragrafo precedente, si è cercato, come detto, di estrapolare dal tessuto urbano milanese cinque campioni per ogni tipologia di tessuto urbano, arrivando così a definire complessivamente 25 campioni. Nella scelta si sono estrapolate quelle sezioni censuarie i cui edifici corrispondessero il più possibile alle caratteristiche del tessuto corrispondente, per poi estrarle dal contesto e analizzarle in modo separato, ottenendo come risultato la mappa di Figura 4.25.

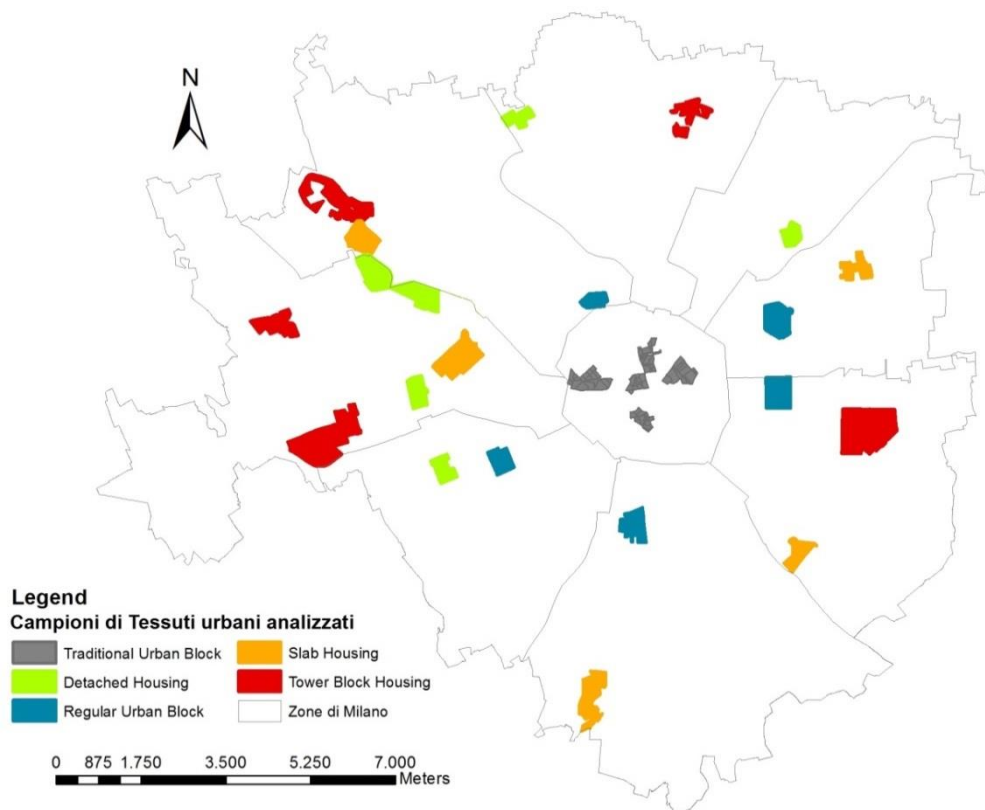


Figura 4.25 Mappa dei 5 campioni considerati per ogni tipologia di tessuto urbano

Da essa si nota innanzitutto il fatto che i campioni di *Traditional Urban Block* sono localizzati interamente nella parte più centrale, e quindi più antica, della città, mentre i campioni di *Regular Urban Block* sono situati immediatamente fuori dalla cerchia più centrale. Per quanto riguarda i restanti campioni di tessuto urbano, non si ha una localizzazione univoca o precisa, ma sono stati presi in modo quasi casuale, e comunque in zone periferiche o semi-periferiche.

4.3.3 Analisi dei consumi per energia termica dei campioni di tessuto urbano

Consumi attuali

Per quanto riguarda la stima dei consumi attuali definita dal modello, si fa riferimento ai dati presentati in Tabella 4.13. Si nota prima di tutto il fatto che all'interno dello stesso tessuto urbano i consumi per riscaldamento ambienti siano piuttosto uniformi, andando quindi a confermare una sorta di uniformità nel comportamento energetico degli stessi (vedi Grafico 4.11). Dai consumi medi per tessuto emerge immediatamente il fatto che la tipologia *Detached housing* presenti il consumo per unità di superficie maggiore, addirittura di oltre 100 kWh/m²/anno rispetto a tessuti quali *Regular* e *Traditional urban Block*, mediamente caratterizzati da un'età molto avanzata degli edifici. La tipologia *Tower Block* presenta invece il consumo minore, l'unico al di sotto della soglia dei 200 kWh/m²/anno; anche la *Slab housing* ha un consumo inferiore alla media cittadina.

Tabella 4.13 Valori dei consumi attuali medi per i campioni di tessuto urbano selezionati per riscaldamento ed ACS
(kWh/m²/anno)

		CONSUMO ATTUALE (kWh/m ² /anno)	
Tessuto		Riscaldamento	ACS
DH	DH01	340,1	41,9
	DH02	321,6	49,5
	DH03	280,4	43,1
	DH04	297,2	43,2
	DH05	362,1	28,4
	MEDIA DH	320,3	41,2
RUB	RUB01	274,1	49,4
	RUB02	243,2	46,7
	RUB03	282,8	50,5
	RUB04	260,1	51,8
	RUB05	232,8	52,3
	MEDIA RUB	258,6	50,1
SH	SH01	252,0	50,1
	SH02	225,7	53,1
	SH03	232,2	52,8
	SH04	225,0	52,8
	SH05	224,5	51,5
	MEDIA SH	231,9	52,1
TB	TB01	132,6	30,1
	TB02	198,2	45,7
	TB03	196,7	43,2
	TB04	210,6	47,7
	TB05	196,6	45,3
	MEDIA TB	186,9	42,4
TUB	TUB01	269,5	42,2
	TUB02	264,7	47,7
	TUB03	220,9	38,2
	TUB04	258,2	46,8
	TUB05	242,8	40,7
	MEDIA TUB	251,2	43,1
MILANO		250,12	47,67

Da questo abbiamo un'ulteriore conferma del fatto che, come detto nel capitolo precedente, le tipologie edilizie isolate presentano consumi nettamente maggiori rispetto a edifici multifamiliari o blocchi di appartamenti; oltretutto in questo caso il tessuto più morfologicamente disperso risulta anche nel complesso più "giovane" rispetto, per esempio, a tessuti più centrali, come *Regular Urban Block* o *Traditional Urban Block*; nonostante questo, i consumi sono ancora maggiori, a evidenziare ulteriormente le migliori prestazioni energetiche degli edifici compatti rispetto a case monofamiliari o case a schiera, anche nel caso in cui questi ultimi presentino il vantaggio della classe d'età migliore.

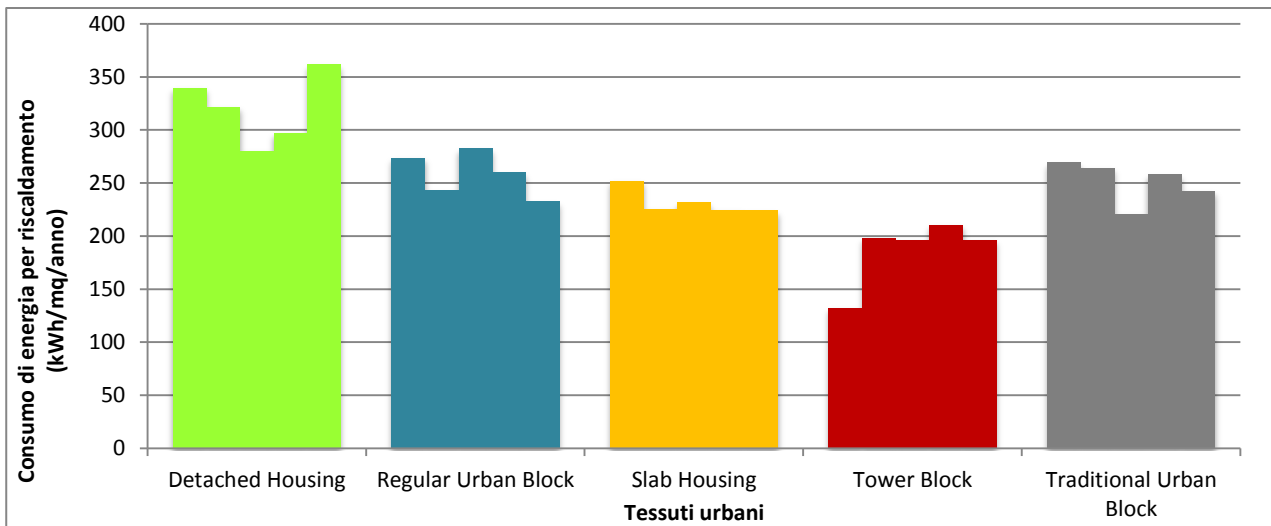


Grafico 4.11 Consumi stimati per riscaldamento per i 5 campioni di sezioni censuarie che vanno a costituire i 5 rispettivi campioni di tessuto urbano (kWh/m²/anno)

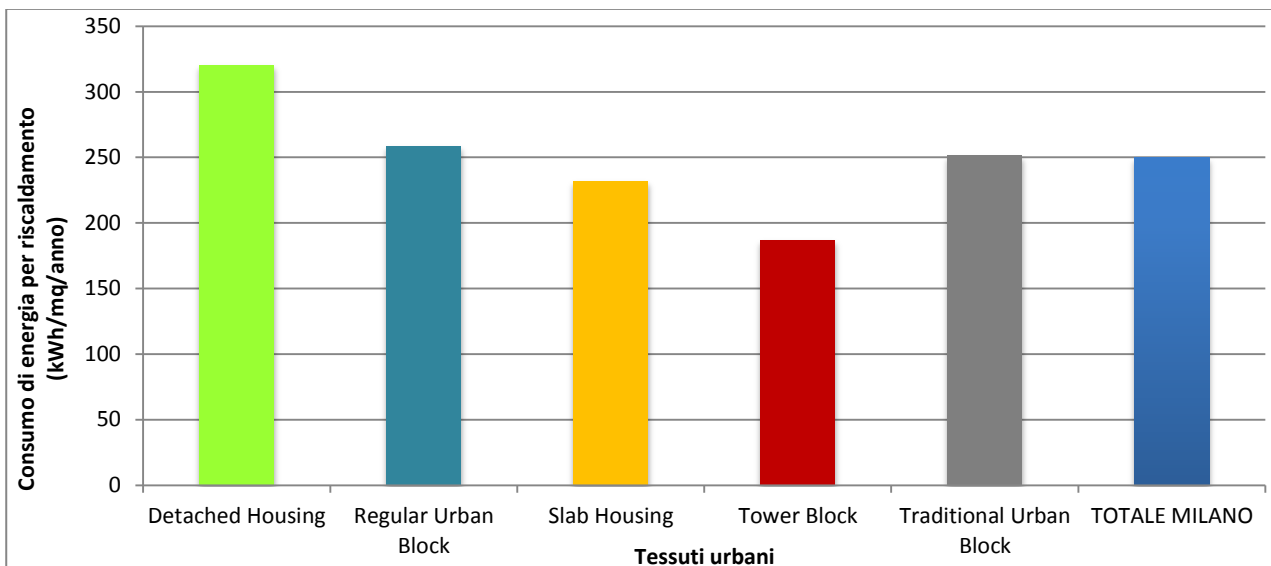


Grafico 4.12 Consumi medi attuali stimati per riscaldamento dei 5 campioni di tessuto urbano analizzati (kWh/m²/anno)

Il tessuto *Tower Block* è quello meno energivoro: esso presenta da un lato come tipologia edilizia prevalente quella dalle prestazioni energetiche migliori, e dall'altro presenta una classe d'età media piuttosto buona, in quanto gli edifici a torre tipici di tale tessuto sono caratteristici di periodi relativamente recenti.

La tipologia *Slab housing* presenta, infine, consumi intermedi tra quelli di *Tower Block* e di *traditional* e *regular urban block*, in quanto anche da un punto di vista urbanistico in un certo senso si pongono come via di mezzo tra le due classi di tessuti (volendo in un certo senso aggregare i tessuti *traditional* e *regular urban block*), in quanto ponendosi in ambiti semiperiferici hanno un'età prevalente posteriore ai tessuti centrali di cui però hanno in pratica la stessa tipologia edilizia (edifici multifamiliari e blocchi di appartamenti), mentre, presentando un'età compatibile con quella tipica dei TB, "soffrono" rispetto a questi ultimi la presenza di edifici multifamiliari che alzano i consumi medi, mentre tessuti *tower block* sono costituiti quasi interamente da edifici a blocchi di appartamenti.

Passando ai consumi di energia termica per acqua calda sanitaria, questi risultano essere meno uniformi all'interno della stessa tipologia di tessuto urbano e inoltre non seguono lo stesso andamento dei consumi per riscaldamento. Per questo, in questa sezione dell'analisi ci si è concentrati maggiormente su quest'ultimi,

trascurando quelli per acqua calda sanitaria. Di seguito vengono comunque riportati per completezza i grafici relativi (vedi Grafico 4.13 e Grafico 4.14).

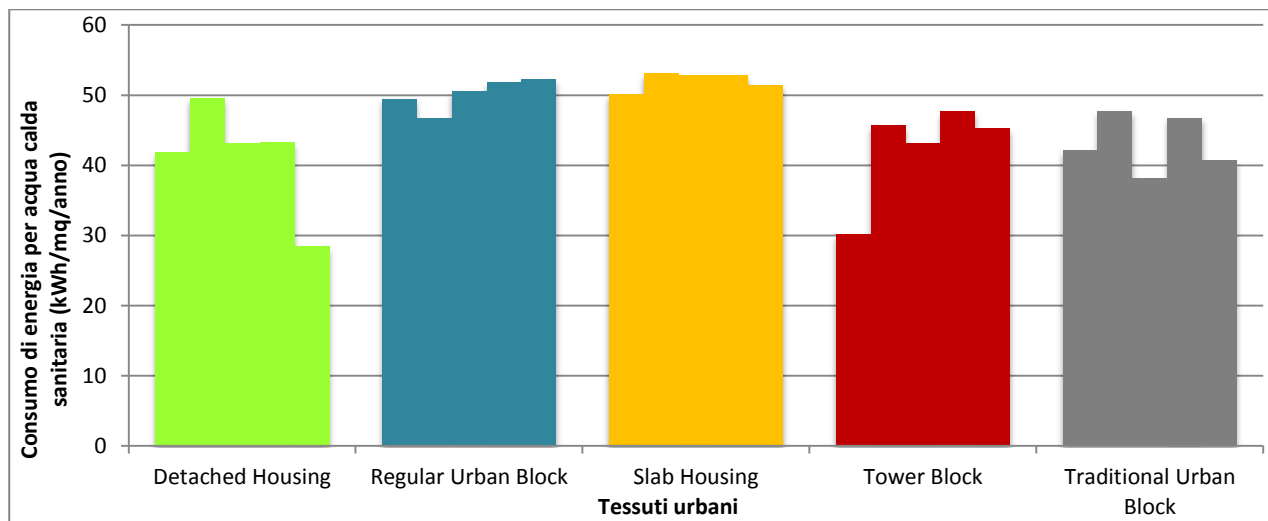


Grafico 4.13 Consumi stimati per acqua calda sanitaria per i 5 campioni di sezioni censuarie che vanno a costituire i 5 rispettivi campioni di tessuto urbano (kWh/m²/anno)

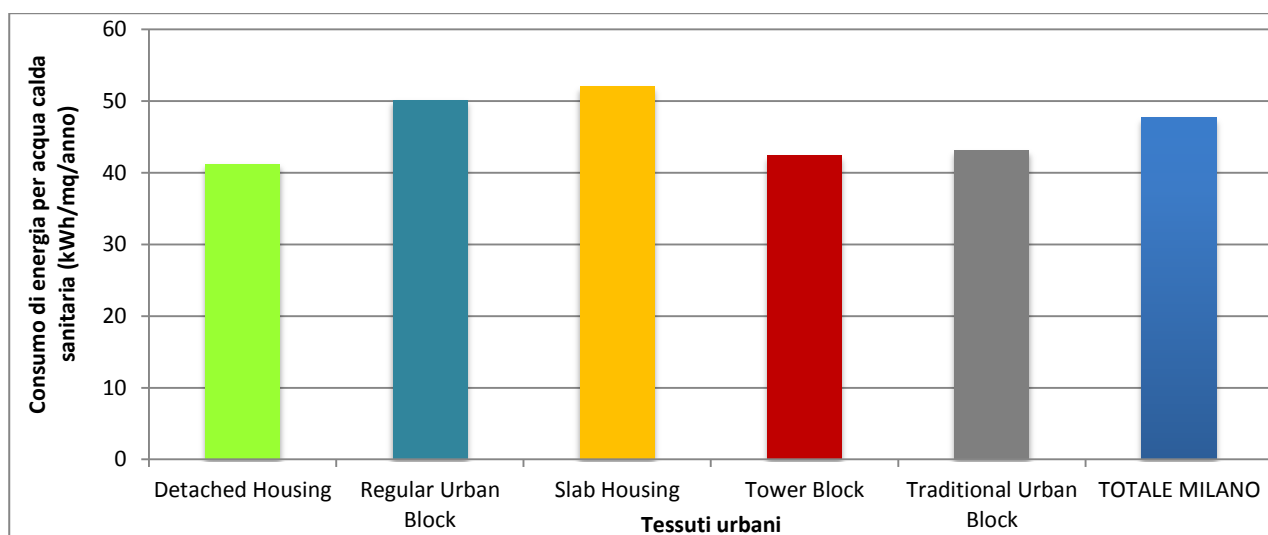


Grafico 4.14 Consumi medi attuali stimati per acqua calda sanitaria dei 5 campioni di tessuto urbano analizzati (kWh/m²/anno)

Valutazione del potenziale di risparmio energetico

Per questo paragrafo si farà riferimento ai dati sui consumi medi stimati per gli scenari di riqualificazione per i diversi campioni di tessuto presentati in Tabella 4.14.

Tabella 4.14 Valori dei consumi negli scenari di riqualificazione medi per i campioni di tessuto urbano selezionati per riscaldamento ed ACS (kWh/m²/anno)

Tessuto Urbano		RIQ STANDARD (kWh/m ² /anno)		RIQ AVANZATA (kWh/m ² /anno)	
		Riscaldamento	ACS	Riscaldamento	ACS
DH	DH01	57,9	34,4	39,0	17,0
	DH02	60,8	25,0	40,5	17,7
	DH03	55,4	28,5	35,9	18,8
	DH04	56,8	28,8	37,1	18,0
	DH05	49,0	20,6	29,5	17,8
	<i>MEDIA DH</i>	<i>56,0</i>	<i>27,5</i>	<i>36,4</i>	<i>17,9</i>
RUB	RUB01	40,9	25,8	25,8	14,1
	RUB02	35,4	23,2	22,0	12,8
	RUB03	39,8	25,6	26,2	13,9
	RUB04	41,7	26,2	24,1	13,3
	RUB05	41,8	27,1	24,2	13,6
	<i>MEDIA RUB</i>	<i>39,9</i>	<i>25,6</i>	<i>24,5</i>	<i>13,6</i>
SH	SH01	38,6	25,8	24,2	14,0
	SH02	41,5	28,7	26,5	14,0
	SH03	42,4	26,7	21,1	12,0
	SH04	42,2	27,4	22,5	12,6
	SH05	41,2	27,5	25,1	14,0
	<i>MEDIA SH</i>	<i>41,2</i>	<i>27,2</i>	<i>23,9</i>	<i>13,3</i>
TB	TB01	31,0	21,2	20,7	13,5
	TB02	39,4	26,5	24,9	14,4
	TB03	37,9	25,7	24,4	13,7
	TB04	38,6	25,8	24,0	13,1
	TB05	37,9	25,7	22,7	13,5
	<i>MEDIA TB</i>	<i>36,9</i>	<i>25,0</i>	<i>23,4</i>	<i>13,6</i>
TUB	TUB01	43,2	25,5	29,2	14,9
	TUB02	40,7	25,6	26,0	14,1
	TUB03	35,2	22,0	23,6	12,4
	TUB04	41,1	25,7	26,4	14,2
	TUB05	37,5	23,4	25,7	13,4
	<i>MEDIA TUB</i>	<i>39,5</i>	<i>24,4</i>	<i>26,7</i>	<i>14,4</i>
<i>TOTALE MILANO</i>		<i>42,57</i>	<i>25,96</i>	<i>25,91</i>	<i>14,33</i>

I potenziali risparmi energetici seguono per la distinzione tra tessuti quanto emerso dall'analisi dei consumi stessi: i risparmi maggiori si hanno per i tessuti più energivori (*detached housing* in particolare), mentre risparmi più contenuti si hanno per i tessuti che presentano consumi minori (*tower block* e *slab housing*). Al di là di queste differenze, come ribadito nei precedenti capitoli, i risparmi risultano in ogni caso molto ampi, evidenziando ancora una volta gli enormi vantaggi dal punto di vista energetico della riqualificazione degli edifici più energivori.

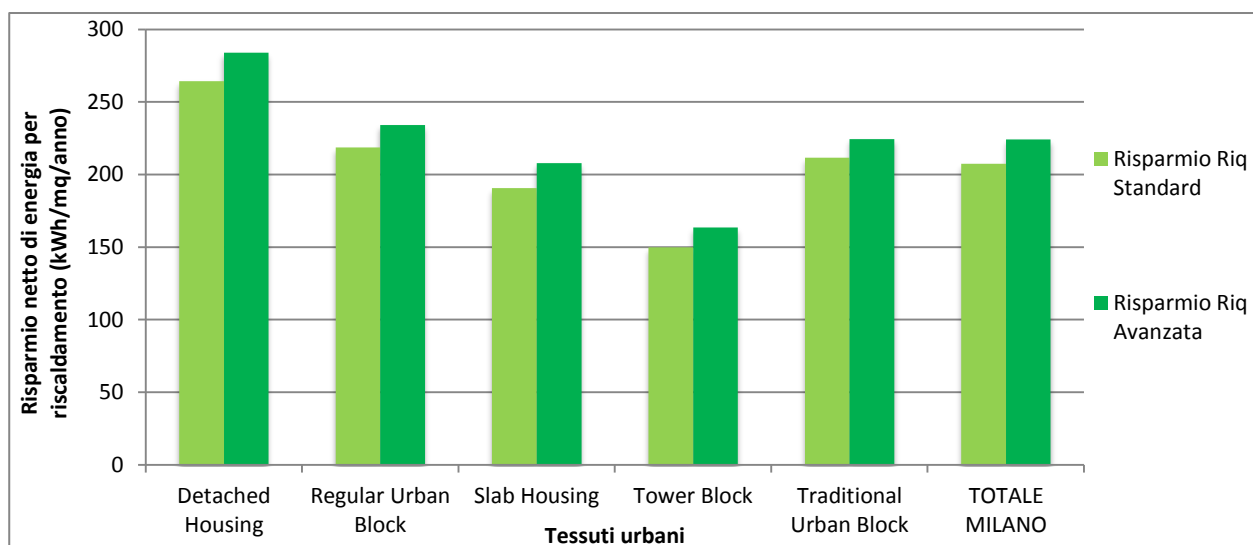


Grafico 4.15 Risparmio energetico medio stimato netto per riscaldamento per le 5 tipologie di tessuto urbano (kWh/m²/anno)

Analizzando i risparmi in termini percentuali (vedi Grafico 4.16), si nota che la distinzione emersa dai risparmi in termini netti viene meno, in quanto i valori dei diversi tessuti urbani si attestano tutti tra l'80 e l'85% per la riqualificazione standard, e tra l'85 e il 90% per la riqualificazione avanzata.

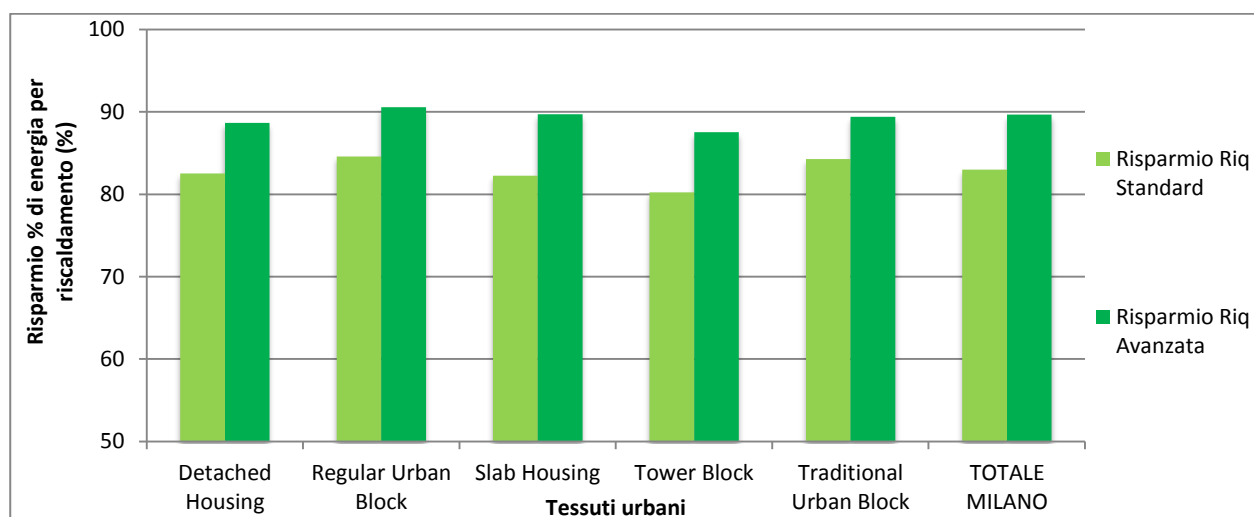


Grafico 4.16 Risparmio energetico medio stimato percentuale per riscaldamento per le 5 tipologie di tessuto urbano (%)

Nei seguenti grafici vengono, infine, presentati i consumi di energia medi per riscaldamento ed acqua calda sanitaria risultanti dai due successivi scenari di riduzione della domanda di energia termica dei campioni dei cinque tessuti urbani analizzati. Viene confermato quanto detto per i valori di riduzioni nette dei consumi energetici, per cui si hanno i consumi maggiori per la tipologia residenziale a bassa densità (DH) e al contrario i consumi minori per la tipologia a minor densità (TB). Bisogna però sottolineare che in questi scenari di riduzione della domanda, i consumi, al variare dei tessuti urbani, vengono resi maggiormente omogenei, variando, cioè, in misura molto minore al variare della tipologia di tessuto urbano di appartenenza. In altre parole, in uno scenario di riqualificazione energetica degli edifici i fabbisogni energetici finali risultano meno influenzati dal tessuto urbano cui appartengono (vedi Grafico 4.17 e Grafico 4.18).

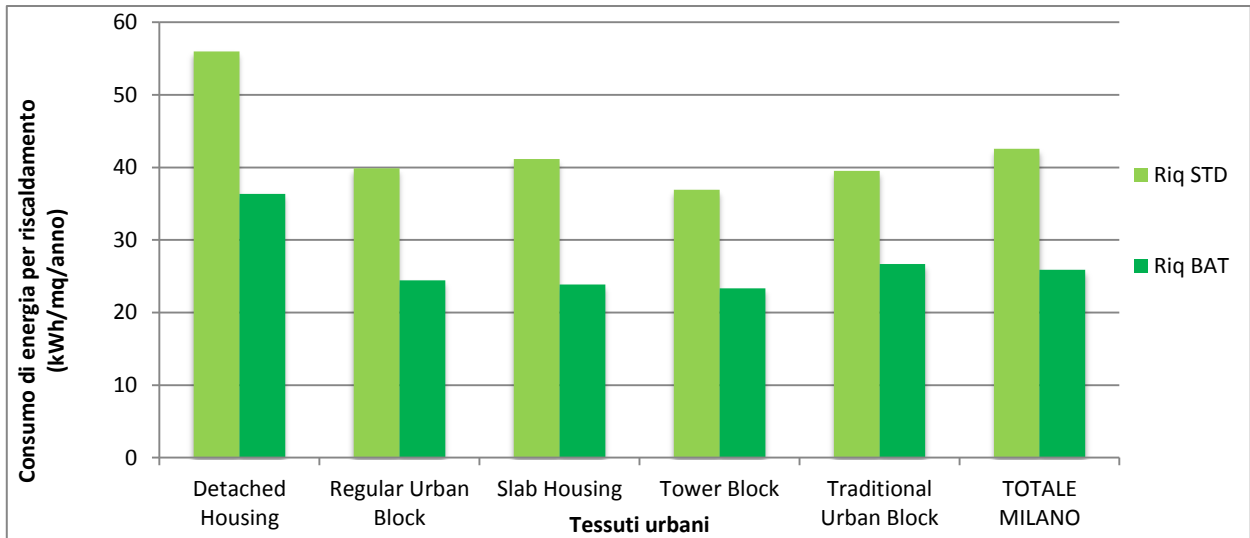


Grafico 4.17 Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento medio per i campioni di tessuto urbano analizzati per i due scenari di riqualificazione (kWh/m²/anno)

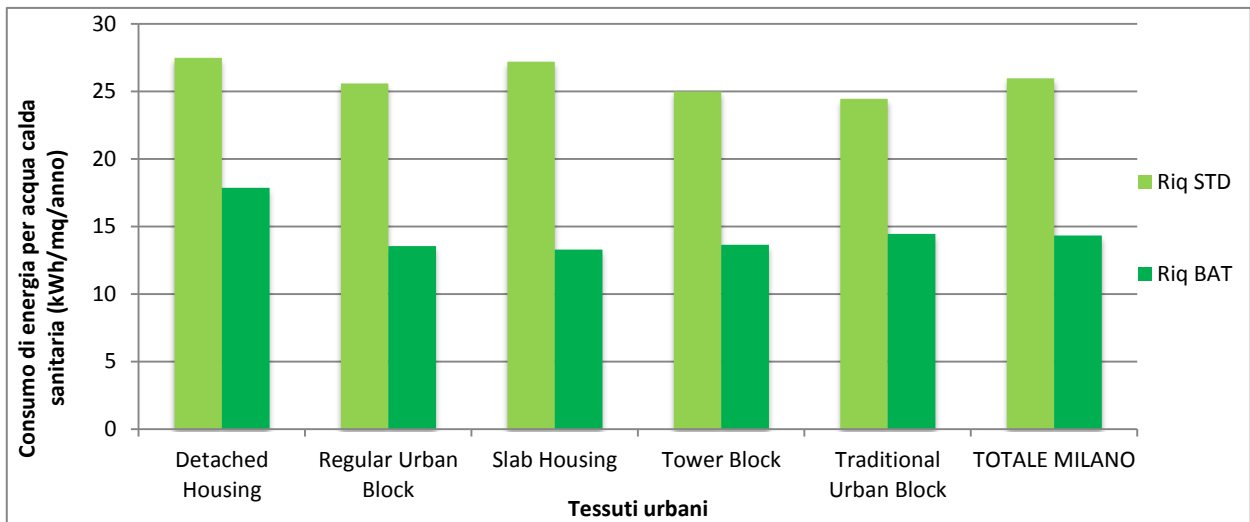


Grafico 4.18 Fabbisogno di energia primaria per acqua calda sanitaria medio per i campioni di tessuto urbano analizzati per i due scenari di riqualificazione (kWh/m²/anno)

Nei seguenti grafici, invece, vengono presentati i consumi “riqualificati” al netto dei risparmi fin qui analizzati.

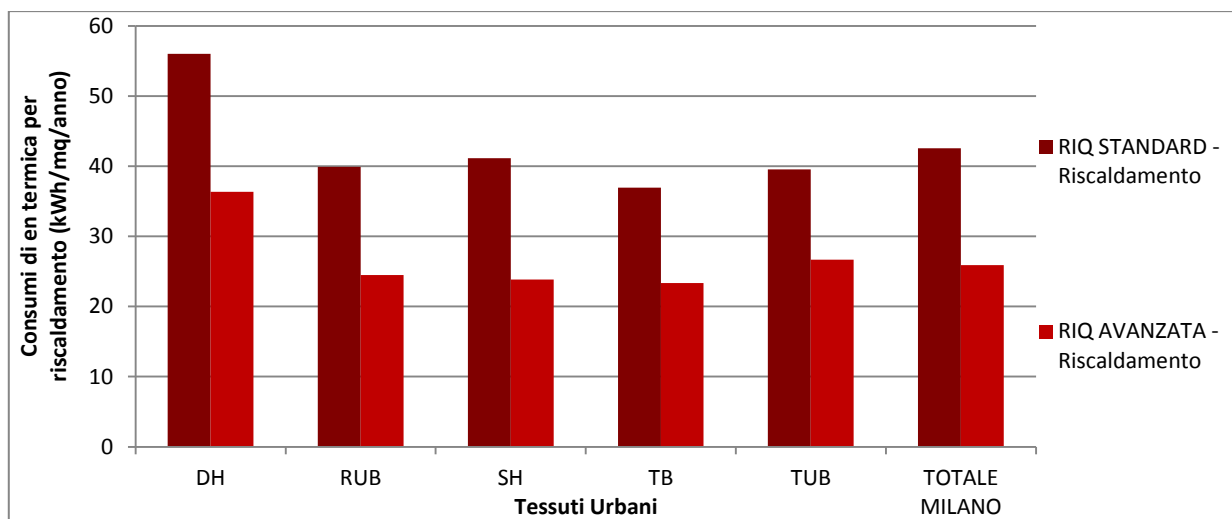


Grafico 4.19 Consumi per riscaldamento medi per i 5 tessuti considerati negli scenari di riqualificazione (kWh/m²/anno)

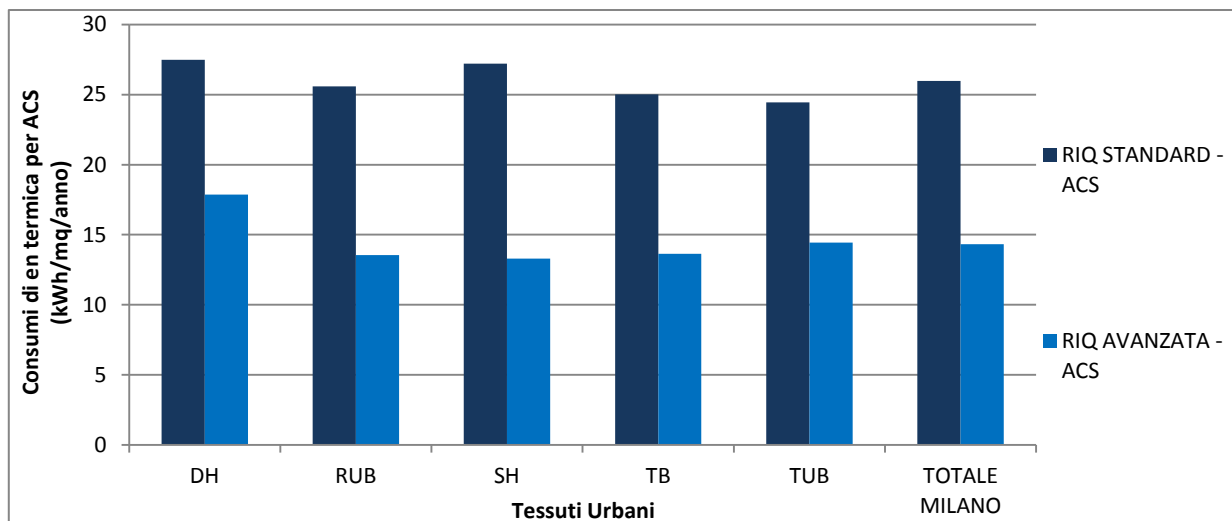


Grafico 4.20 Consumi per ACS medi per i 5 tessuti considerati negli scenari di riqualificazione (kWh/m²/anno)

In una visione maggiormente realistica e, per così dire, “a favore di sicurezza” si potrebbe ipotizzare di non riuscire ad implementare la riqualificazione di tipo avanzato ai tessuti maggiormente centrali e storici, per cui gli edifici appartenenti al tessuto di tipo *Traditional urban block (TUB)* rimarrebbero fermi alla riqualificazione di tipo standard. In Grafico 4.21 viene definito questo scenario, in cui, appunto, si ipotizza che per quest’ultima tipologia urbana si riesca a raggiungere un livello di riqualificazione di tipo standard, mentre i restanti quattro riescano a raggiungere l’ultimo livello di riqualificazione. Si nota come, inevitabilmente, i consumi dei tessuti *TUB* risultino qui i maggiori, di poco superiori anche rispetto ai tessuti della tipologia *Detached Housing (DH)*. I tre rimanenti tipi di tessuto urbano presentano invece consumi omogenei tra loro, tra 20 e 25 kWh/m²/anno.

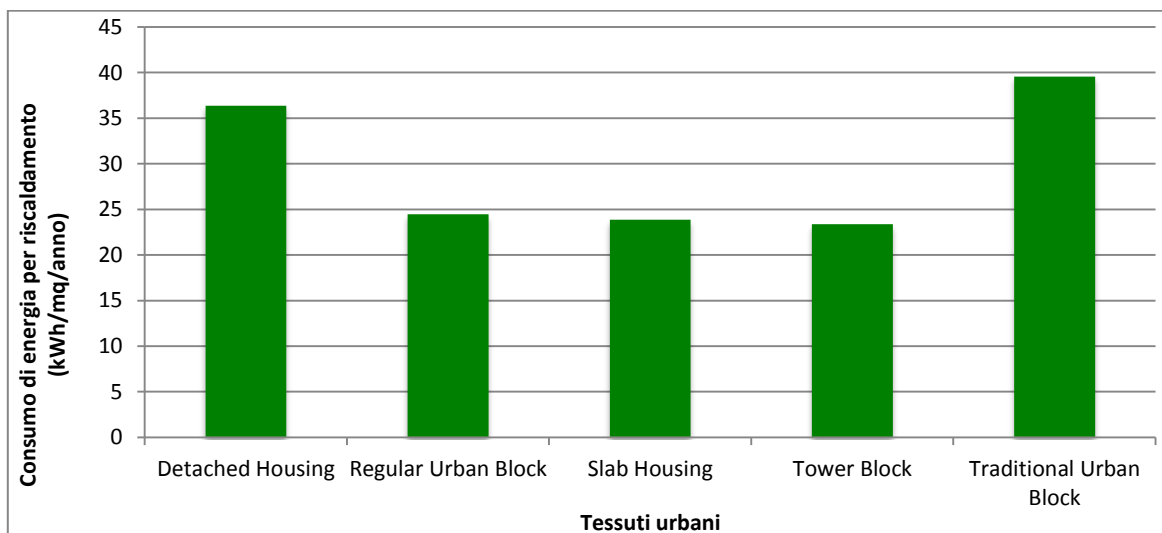


Grafico 4.21 Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento medio per i campioni di tessuto urbano analizzati nello scenario in cui si ipotizza una riqualificazione standard per i tessuti *TUB* ed una avanzata per i restanti tessuti (kWh/m²/anno)

Dall'analisi sui consumi di energia termica per tessuti urbani è possibile concludere che:

- Il tessuto meno denso (*Detached Housing*) presenta i consumi attuali per riscaldamento più elevati, mentre quello meno denso (*Tower Block*) i consumi minori, mentre i restanti tessuti presentano consumi piuttosto omogenei tra loro
- I risparmi netti seguono l'andamento dei consumi, mentre i risparmi percentuali risultano essere costanti al variare delle tipologie di tessuto urbano
- I consumi per ACS presentano un andamento differente rispetto a quello dei consumi per riscaldamento, quasi inverso, con i tessuti *DH* che figurano con i consumi minori
- Nello scenario finale in cui si ipotizza di arrivare ad una riqualificazione di tipo avanzato su tutti i tessuti tranne che per i *TUB* (tessuto storico), che si fermano ad una riqualificazione di tipo standard, sono proprio quest'ultimo a presentare i consumi per riscaldamento maggiori, seguiti dai tessuti *DH*, mentre i rimanenti tessuti si attestano a fabbisogni di energia termica inferiori di quasi la metà rispetto ai *TUB*

Si fa presente che questo tipo di analisi è strettamente legata al caso di studio, in quanto, per esempio, in un altro comune il tessuto *DH* potrebbe essere caratterizzato da edifici interamente nuovi, mentre il tessuto *TB* da edifici molto vecchi, e quindi le cose probabilmente cambierebbero; detto questo, indipendentemente dall'età degli edifici, tessuti a bassa densità sono solitamente più energivori di tessuti caratterizzati da densità maggiori.

4.4 Scenari di riduzione della domanda mediante reperimento di energia da FER

Nell'ultima parte del lavoro si è cercato di fare una stima della quota di domanda di energia degli edifici residenziali del caso di studio, domanda che può essere soddisfatta mediante energia da fonte rinnovabile prodotta localmente. Partendo quindi dagli scenari di efficientamento, si sono implementate le procedure di calcolo definite nel Capitolo 3.

Siccome, come detto, negli scenari di riduzione della domanda di energia termica realizzati a partire da TABULA sono già considerate varie tipologie impiantistiche di produzione di energia termica da fonte rinnovabile (pompe di calore geotermiche e solare termico), in particolare nello scenario derivante da una riqualificazione di tipo avanzato, in quest'ultima sezione si è deciso di considerare impianti a fonte rinnovabile che forniscano esclusivamente energia elettrica, e che vadano cioè a ridurre, o in alcuni a casi a soddisfare interamente, la domanda di elettricità che viene attualmente "importata" dall'esterno, e che di solito è generata soprattutto a partire da fonti fossili.

4.4.1 Definizione delle fonti rinnovabili disponibili

Tra le tipologie impiantistiche considerate nel modello (vedi Capitolo 3), quelle in grado di produrre energia elettrica sono le seguenti:

- Impianto di cogenerazione a biomasse legnose
- Impianto di digestione anaerobica da reflui zootecnici

- Impianto di digestione anaerobica da colture dedicate
- Impianto solare fotovoltaico
- Impianto mini o micro-eolico

Ovviamente, però, non tutte queste tipologie possono essere applicate al caso di studio in questione, oltretutto in un contesto molto particolare come quello del comune di Milano.

Tra le precedenti tipologie impiantistiche si è deciso, quindi, di non considerare:

- *Impianti mini-eolici*, in quanto il comune di Milano presenta una ventosità media al livello di 25 m sul terreno inferiore a 3 m/s, che corrisponde ad una producibilità specifica a 25 m inferiore ai 500 kWh per ogni kW di potenza installata; Milano risulta infatti nella fascia di ventosità minore a livello italiano secondo l'Atlante Eolico dell'RSE. Inoltre, dal punto di vista economico si comincia ad avere una convenienza accettabile per producibilità maggiori di 1.500 – 2.000 kWh/kW, per cui un impianto mini-eolico a Milano, oltre che produrre poca energia, sarebbe economicamente svantaggioso.
- *Impianti micro-eolici*, per lo stesso motivo degli impianti mini-eolici, in quanto, se a 25 m sul livello del terreno la velocità del vento non è sufficientemente elevata, a maggior ragione sarà ancora minore all'interno di un contesto urbano molto denso come quello milanese. Nemmeno una turbina micro eolica posta su un palazzo di 30 piani sarebbe conveniente, producendo, sempre secondo l'atlante dell'RSE, tra i 500 e i 1.000 kWh/kW.
- *Impianto di cogenerazione a biomasse legnose*, che si è escluso sia perché produce oltre all'energia elettrica anche energia termica, che, come detto, non considereremo in questa stima, sia perché, in un comune come Milano completamente privo di boschi dalla cui gestione e/o taglio reperire la biomassa necessaria, si dovrebbe ricorrere a coltivazioni di tipo *Short Rotation Forestry* (SRF), che comportano una massiccia occupazione di suolo agricolo, in un contesto in cui le aree agricole sono già ridotte al minimo (vedi Figura 4.26), oltre che quasi interamente protette all'interno del Parco Agricolo Sud Milano (per rendere l'idea, per un piccolo impianto a cogenerazione da 1 MW che soddisfi la domanda elettrica di circa 600 abitazioni e quella termica di circa 1.200 – abitazioni in classe CENED B o C – sarebbero necessari all'incirca 150 ettari, per un impianto da 5 MW la superficie necessaria passerebbe a circa 700 ha).

Alla luce di queste considerazioni, si è deciso di valutare il potenziale di energia elettrica ottenibile dalle seguenti tipologie impiantistiche:

- Impianto di digestione anaerobica da colture dedicate
- Impianto di digestione anaerobica da reflui zootecnici
- Impianto fotovoltaico

4.4.2 Stima dell'energia elettrica prodotta da biogas da colture dedicate

Prima di stimare la produzione di energia elettrica che è possibile produrre da impianti a digestione anaerobica da colture dedicate sui terreni agricoli del comune di Milano, si sono fatte alcune stime riguardo alla superficie agricola attuale, la quota di essa che risulta protetta e le variazioni che sono occorse negli ultimi anni sulle superficie agricole milanesi.

Definizione della superficie agricola disponibile

Per questo tipo di valutazioni, si è fatto riferimento al database *DUSAF (Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali)* della Regione Lombardia, database che definisce, gli usi del suolo per tutta la regione, suddivisi in 5 classi (*Aree antropizzate, Aree agricole, Territori boscati e ambienti seminaturali, Aree Umide e Corpi idrici*), classi a loro volta ulteriormente suddivise, per arrivare ad un elevato grado di dettaglio. Per definire le aree protette, si

è incrociata la mappa degli usi del suolo con le aree protette del comune di Milano, riconducibili sostanzialmente al Parco Agricolo Sud Milano e al Parco Nord. In questo modo si è arrivati a definire allo stato attuale (che corrisponde all'ultimo aggiornamento del database *DUSAF*, cioè il 2009) la superficie agricola del comune di Milano protetta e quella non protetta; per avere però un'idea di come tali superfici sono mutate nel corso degli anni, si è fatto lo stesso procedimento anche per l'anno 1999, e cioè in occasione della prima edizione dello stesso *DUSAF*. I risultati ottenuti vengono presentati nella seguente tabella.

Tabella 4.15 Valori (in ettari) delle varie categorie di superficie agricola del comune di Milano al 1999 e al 2009 con le rispettive variazioni (ha)

	1999 (ha)	2009 (ha)	Variazione netta (ha)	Variazione % (%)
Aree agricole totali	3.988	3.431	-557	-14%
Aree agricole protette	3.113	2.817	-296	-9,5%
Aree agricole NON protette	875	613	-262	-30%

Innanzitutto, è bene far notare che la già scarsa superficie agricola comunale abbia visto ridurre la propria superficie di oltre 500 ettari, per una quota percentuale pari al 14%. Questo viene da una riduzione di quasi il 10% per le aree agricole protette ed una riduzione pari addirittura al 30% delle aree non protette. La cosa che stupisce è il fatto che tra 1999 e 2009, nonostante la funzione di tutela del parco, si è comunque verificata una perdita di suolo agricolo complessivo pari quasi 300 ettari.

Definizione dell'energia elettrica potenzialmente ottenibile dai vari scenari di superficie utilizzata

Alla luce di questi dati, si è deciso di valutare il potenziale di energia elettrica eventualmente erogabile da impianti a biogas da colture dedicate, giustificando il conseguente consumo di suolo in questi termini: se nei prossimi 10 anni (come è successo dal 1999 al 2009) si dovrà verificare una perdita consistente di suolo agricolo, sia protetto che non protetto, tanto vale che tale conversione vada, piuttosto che verso l'urbanizzazione (come avvenuto in questi ultimi anni), verso la semplice trasformazione degli usi finali del prodotto agricolo, l'uso energetico, appunto (vedi figure mappe seguenti).

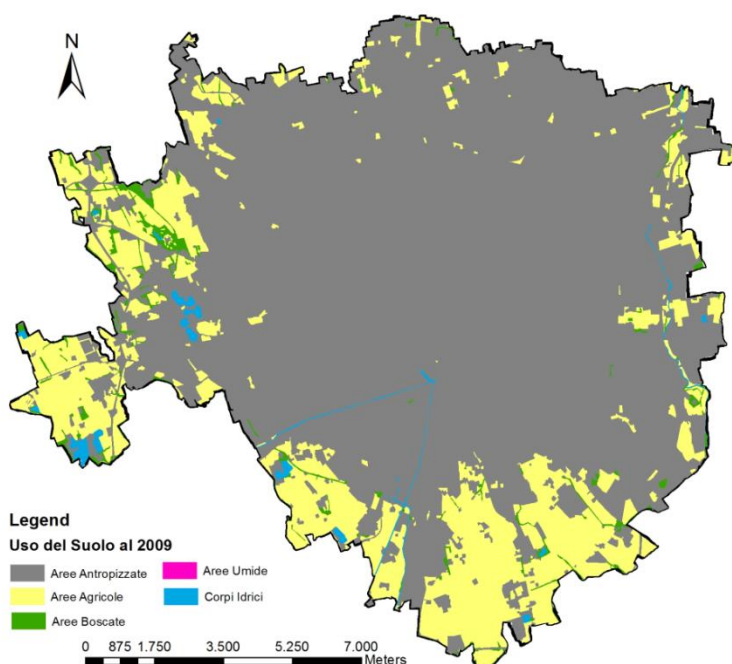


Figura 4.26 Mappa degli usi del suolo del comune di Milano al 2009

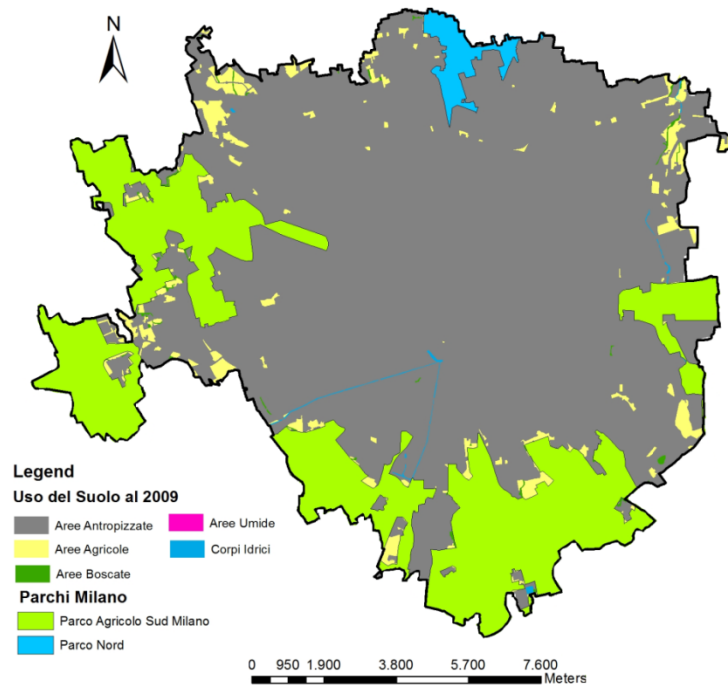


Figura 4.27 Mappa dei parchi del comune di Milano e sullo sfondo gli usi del suolo al 2009

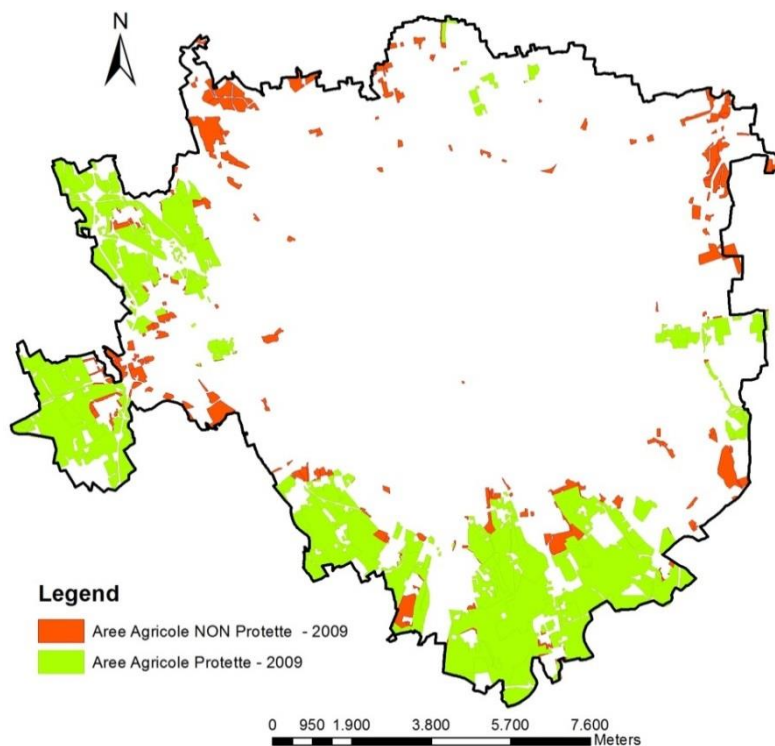


Figura 4.28 Mappa delle aree agricole di Milano con la distinzione tra protette e non protette al 2009

Di seguito gli scenari di produzione di biogas da colture dedicate. Si premette che per le superfici considerate per la valutazione del potenziale di biogas producibile riguardando esclusivamente la porzione di superficie agricola (protetta o meno) attualmente destinata a seminativo semplice (vedi Tabella 4.16), ipotizzando che in tal modo la trasformazione sia logisticamente ed agronomicamente meno impegnativa ed impattante.

Tabella 4.16 Superfici a seminativo semplice rispetto alle varie superfici agricole del comune di Milano

	Seminativo sull'area agricola totale	Seminativo sull'area agricola protetta	Seminativo sull'area agricola NON protetta
Superficie a seminativo semplice (ha)	2.039	1.633	376

Per semplicità e praticità dei calcoli, si è optato per la definizione di un impianto a digestione anaerobica tipo, con i seguenti requisiti e caratteristiche:

- Potenza pari a 299 kW (maggiormente redditizio, in quanto ricade nella fascia di incentivi 100-300 kW)
- Superficie coltivata pari a 95 ha
- Doppia coltura: estiva di insilato di mais ed invernale/primaverile di triticale
- Resa elettrica dell'impianto pari al 36%
- Autoconsumo elettrico del 15%
- Tempo di funzionamento annuo pari a 8.000 ore
- Energia elettrica erogata pari a 2.400 MWh/anno

In Tabella 4.17 vengono presentati i risultati riguardo all'energia prodotta nei vari casi di superficie disponibile.

Tabella 4.17 Potenziale di energia elettrica prodotta nei vari scenari di superficie adibita a colture energetiche

		Superficie interessata (ha)	Numero di impianti (#)	Energia prodotta (GWh/anno)
Superfici complessive	Superficie a seminativo totale	2.039	21	50,4
	Superficie a seminativo protetta	1.633	17	40,8
	Superficie a seminativo NON protetta	376	4	9,6
% superfici urbanizzate	Superficie a seminativo totale	286	3	7,2
	Superficie a seminativo protetta	155	1	2,4
	Superficie a seminativo NON protetta	113	1	2,4

Commento ai risultati di energia elettrica prodotta da biogas da colture dedicate

Dai risultati delle stime effettuate, è possibile confermare quanto esposto sopra, e cioè il fatto che il comune di Milano non possa fare molto affidamento sulla propria superficie agricola per trarre energia elettrica da impianti a biogas. Infatti, secondo gli ultimi 3 scenari di Tabella 4.17, cioè quelli maggiormente realistici, in cui si ipotizza di convertire le attuali coltivazioni a mais e triticale con fini energetici per percentuali di superficie che sono pari alla quota di superficie agricola urbanizzata tra 1999 e 2009, l'energia massima potenzialmente erogabile risulta pari a 7,2 GWh/anno, una quota ben inferiore all'1% del consumo elettrico sia attuale (0,3%) che riquilibrato (0,5% per i consumi elettrici ridotti del 40%) del comune di Milano. Dall'altro lato, nel caso estremo ed irrealistico in cui tutta la superficie agricola a seminativo attuale del comune passasse ad essere coltivata a fini energetici, grazie ai 50,4 GWh/anno potenzialmente erogati, si arriverebbe a soddisfare solamente poche unità di punti percentuali del consumo elettrico comunale complessivo, più precisamente il 2,4% dei consumi attuali ed il 4,1% in caso di consumi ridotti del 40%.

Possiamo quindi dire che l'energia elettrica che può essere potenzialmente prodotta da biogas da colture dedicate sulla superficie agricola del comune di Milano è comunque molto contenuta, in particolare rispetto ai consumi elettrici totali; in ogni caso, dedicare una piccola percentuale della superficie agricola del comune alla produzione di colture destinate alla produzione di biogas sarebbe sicuramente una buona cosa, piuttosto che continuare ad urbanizzare aree agricole come avvenuto tra 1999 e 2009.

4.4.3 Stima dell'energia elettrica prodotta da biogas da reflui zootecnici

Anche in questo caso alcune valutazioni preliminari sono d'obbligo, in quanto gli allevamenti zootecnici, così come i territori agricoli, sul comune di Milano non sono sicuramente molto diffusi. Si è fatta, quindi, una ricerca preliminare dei dati riguardanti il numero di allevamenti zootecnici ed il rispettivo numero di capi presenti all'interno del territorio comunale.

Come era prevedibile, sono solamente 48 gli allevamenti zootecnici attualmente in attività presenti nel comune di Milano (fonte: *SIARL*, Sistema Informativo Agricolo della Regione Lombardia). Per quanto riguarda il numero di capi, i suini (censiti) sono solamente 40, quando il numero minimo per un impianto da 100 kW è pari a circa 3000 (anche se è raro un impianto a biogas alimentato esclusivamente da reflui suini), mentre per i bovini si parla di 915 capi, di cui 771 femmine (fonte: ASL Milano, vedi Tabella 4.18).

Tabella 4.18 Numero di bovini e suini per il comune di Milano (fonte: ASL, Media capi censiti tra il 30/06/12 ed il 31/05/13)

SUINI	
Numero allevamenti	12
Totale capi suini censiti	40
di cui lattonzoli	8
di cui magroncelli	0
di cui magroni	22
di cui grassi	2
di cui Scrofe	5
di cui Scrofette	0
di cui Verri	3
di cui Cinghiali	0

BOVINI	
Capi vivi	915
di cui bovini	915
di cui bufalini	0
Maschi	144
Femmine	771
di cui con età compresa tra 0 e 12 mesi	146
di cui con età compresa tra 12 e 24 mesi	196
di cui con età oltre 24 mesi	424

Escludendo a priori la possibilità di considerare i suini, di queste 771 vacche, consideriamo solamente le *vacche da latte* (con età maggiore di 24 mesi), che risultano essere pari a 424 capi; simulando un impianto che venga alimentato dai rispettivi reflui, si otterrebbe un impianto di potenza pari a circa 180 kW, capace di produrre circa 1,5 GWh/anno. Questa è un'affermazione puramente teorica, in quanto tali 424 vacche da latte sono disperse su tutto il territorio comunale, ed infatti dal database del *SIARL* abbiamo notato che gli allevamenti sono tutti molto piccoli, ed ospitano al massimo qualche decina di vacche da latte l'uno, per cui tale opzione è del tutto irrealistica.

Commento ai risultati di energia elettrica prodotta da biogas da reflui zootecnici

Possiamo concludere, quindi, che il potenziale di energia elettrica che è possibile ottenere da reflui zootecnici prodotti all'interno del confine comunale di Milano è molto ridotto, se non addirittura pari a zero; infatti, l'unica possibilità sarebbe convogliare tutti o quasi i reflui bovini e suini ad un unico impianto per produrre meno di 2 GWh/anno, per soddisfare cioè circa un millesimo del consumo elettrico comunale, cosa che ha poco senso andando a soppesare costi (trasporto di quintali di reflui per la città di Milano provenienti da decine di aziende differenti) e benefici (soddisfare circa un millesimo della domanda elettrica, con guadagni minimi per gli allevatori). Una possibilità più realistica sarebbe quella di utilizzare i reflui per integrare la produzione di biogas in impianti che utilizzano prevalentemente colture dedicate realizzate in prossimità degli impianti di allevamento, in modo tale da minimizzare la mobilitazione dei reflui stessi.

Dall'analisi sul potenziale di energia elettrica da impianti a digestione anaerobica del comune di Milano è possibile concludere che:

- L'energia elettrica potenzialmente ottenibile dai suoli agricoli a seminativo del territorio comunale è all'incirca pari al 2-3% dei consumi elettrici attuali; tale percentuale è però raggiungibile utilizzando TUTTO il suolo agricolo a seminativo del comune per fini energetici; la cosa è chiaramente irrealistica. In uno scenario che si ipotizza maggiormente realizzabile, la superficie disponibile si riduce di circa un ordine di grandezza, così come la percentuale di consumi elettrici che riesce ad essere così soddisfatta
- L'energia elettrica potenzialmente ottenibile, invece, da reflui zootecnici è praticamente nulla, in quanto il numero di allevamenti e quindi di capi su territorio comunale è troppo contenuto

Da questo possiamo quindi definire come quanto alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili il comune di Milano dovrà necessariamente rivolgersi verso l'esterno, considerando probabilmente non più il solo comune ma l'area metropolitana.

4.4.4 Stima dell'energia elettrica prodotta da fotovoltaico

Per quanto riguarda gli impianti fotovoltaici, si è deciso di considerare tipologie impiantistiche esclusivamente connesse alla rete e realizzate sui tetti degli edifici residenziali considerati nell'analisi dei consumi.

La stima dell'energia elettrica producibile da tale superficie di pannelli fotovoltaici è stata effettuata attraverso i due seguenti step:

- valutazione della superficie dei tetti disponibile per ogni edificio ad ospitare i pannelli fotovoltaici necessari,
- stima dell'energia prodotta dai pannelli installabili sulla superficie calcolata al punto precedente.

Per la stima del primo punto ci si è basati sul paper di Bergamasco e Asinari (2010), che effettuano un'analisi del potenziale fotovoltaico sui tetti degli edifici residenziali ed industriali della regione Piemonte a scala comunale, mentre per il calcolo dell'energia prodotta si sono implementate le procedure di calcolo del modello realizzato (vedi Capitolo 3). Ipotesi che sta alla base di tutto è che attualmente i tetti degli edifici del caso di studio non siano già occupati da pannelli fotovoltaici; questa risulta quindi essere una stima del potenziale fotovoltaico teorico, e non incrementale rispetto alla situazione attuale.

Stima della superficie di tetti disponibile per pannelli fotovoltaici

Per stimare la superficie disponibile ad ospitare un impianto fotovoltaico per ogni edificio residenziale considerato si è partiti dalla superficie "a terra" del singolo edificio, la si è convertita in superficie di tetto (tramite il coseno dell'angolo di pendenza del tetto stesso) e attraverso coefficienti di riduzione della superficie totale si è arrivati a calcolare la superficie disponibile voluta.

Il dato riguardante la superficie a terra dell'edificio viene dal database topografico della Regione Lombardia (relativo ovviamente al Comune di Milano) utilizzato anche per la definizione dei cluster degli edifici nella stima dei consumi energetici. Per quanto riguarda i coefficienti di riduzione si fa riferimento interamente al paper di cui sopra (Bergamasco e Asinari, 2010): non avendo a disposizione alcuna informazione precisa sulla pendenza del tetto per ogni edificio dal database topografico, si adotta una pendenza identica per tutti gli edifici pari a 20° ($\theta_{res}=20^\circ$), e quindi l'area del tetto si ottiene semplicemente dividendo la superficie di base per il coseno di tale angolo. Si ipotizza poi che tutti i tetti siano della tipologia a doppia falda, per cui sarà possibile dedicare all'impianto fotovoltaico esclusivamente una metà del tetto (*roof-type coeff.*: $C_{RT} = 0,5$). Inoltre, siccome non si hanno informazioni a priori sull'orientamento degli edifici, si introduce un apposito coefficiente (C_{AZ}) per considerare le perdite che si hanno nel caso in cui i collettori non siano orientati secondo il migliore *azimut* (cioè

l'angolo di orientamento rispetto al Sud, $0^\circ = \text{Sud}$); Bergamasco e Asinari hanno valutato tale coefficiente pari a 0,9, ipotizzando cioè in una percentuale del 10% le perdite medie che si hanno dal non perfetto orientamento dei pannelli. Un ulteriore coefficiente tiene conto della presenza di eventuali altri elementi presenti sul tetto (camini, lucernari, impianti di ventilazione, ...) e si è tenuto pari a 0,7 (*feature coeff*: $C_F = 0,7$), mentre un ultimo coefficiente tiene conto che il 10% della superficie del tetto non sia disponibile in quanto già occupato da collettori solari termici (*solar-thermal coeff*: $C_{ST} = 0,9$). La superficie di tetto disponibile è stata calcolata quindi come:

$$S_{\text{tetto disp}} = C_{AZ} * C_{RT} * C_F * C_{ST} * \frac{S_{\text{edif}}}{\cos \theta_{\text{res}}} = C_{TOT} * S_{\text{edif}}$$

Nella seguente tabella vengono riassunti i dati ed i coefficienti considerati:

Tabella 4.19 Tabella riassuntiva dei termini considerati nel calcolo della superficie disponibile per i pannelli fotovoltaici

Termine	Valore	Motivazione
C_{AZ}	0,90	Coefficiente per la riduzione dovuta ad orientamento diverso dall'ottimale
C_{RT}	0,50	Coefficiente per la riduzione dovuta alla tipologia di tetto (doppia falda)
C_F	0,70	Coefficiente per la riduzione dovuta ad altre strutture presenti sul tetto
C_{ST}	0,90	Coefficiente per la riduzione per la presenza di collettori solari termici
$\frac{1}{\cos \theta_{\text{res}}}$	1,06	Termine per la proiezione della superficie in pianta proiettata su un piano inclinato di $(\theta_{\text{res}})^\circ$ sul terreno
S_{edif}	Superficie dell'edificio in pianta (dal database topografico)	
$\frac{S_{\text{edif}}}{\cos(\theta_{\text{res}})}$	Superficie del tetto	
$S_{\text{tetto disp}}$	Superficie disponibile per l'installazione di pannelli fotovoltaici	
C_{TOT}	0,30	

Stima dell'energia elettrica prodotta dalla superficie disponibile

Come detto, l'energia elettrica prodotta dalla superficie disponibile per ogni tetto stimata secondo il paragrafo precedente è stata calcolata implementando le procedure di calcolo presentate nel Capitolo 3; risulta necessario, però ricordare che in questo caso specifico come valore della radiazione incidente si è utilizzata quella relativa all'irraggiamento su superficie ottimale (per Milano pari a 1.100 kWh/m²), in quanto la riduzione dell'energia prodotta a causa di un orientamento dei collettori non ottimale è già prevista mediante il coefficiente C_{AZ} , mentre si trascurano le perdite di efficienza dovute all'inclinazione non esattamente ottimale, essendo ipotizzata pari a 20°, mentre quella ottimale è all'incirca uguale a 30°; in ogni caso quest'ultima approssimazione non dovrebbe rendere la stima molto meno precisa, in quanto una differenza nell'inclinazione di circa 10° comporta perdite di efficienza molto contenute.

Inoltre, sono state fatte tre diverse stime per le principali tecnologie di pannelli fotovoltaici (in ordine per efficienza decrescente): al silicio monocristallino, al silicio policristallino e al silicio amorfo (o film sottile); esse presentano rendimenti differenti, che implicano quindi diverse quantità di energia elettrica prodotta. Attualmente in Lombardia la tecnologia maggiormente diffusa è quella a silicio policristallino (72%), seguita dal monocristallino (22%) e dal silicio amorfo (6%) (Rapporto Statistico 2011, GSE). Per la stima oggetto di quest'analisi si sono effettuati quindi molteplici valutazioni, che prevedono l'installazione di una sola tipologia di pannelli piuttosto che il mix corrente ad oggi in Lombardia (vedi Tabella 4.20).

Tabella 4.20 Distribuzione delle tre principali tecnologie di pannelli solari per potenza installata al 2011 (Rapporto Statistico 2011 – Solare fotovoltaico, GSE, 2011)

	Silicio monocristallino	Silicio policristallino	Silicio amorfo
Lombardia	22%	72%	6%
Italia	23%	70%	7%

4.4.5 Analisi dei risultati della stima di energia elettrica da fotovoltaico a scala urbana

In questo paragrafo vengono presentati i risultati della stima dell'energia teoricamente producibile da pannelli fotovoltaici installati sui tetti degli edifici residenziali considerati in questo lavoro. Bisogna premettere che tutti gli edifici sono risultati, alcuni più e altri meno, in grado di ospitare una certa superficie di pannelli: si va da un minimo di circa 18 m² ad un massimo di addirittura 7.562 m²; per quest'ultimo caso il database topografico raggruppa più edifici contigui in un edificio unico, che per questo motivo risulta avere una superficie destinata ai collettori solari così ampia. Per quanto riguarda l'energia prodotta per edificio, si va da un minimo di 2.250 kWh/anno ad un massimo di 966.939 kWh/anno.

Per questo tipo di stima si sono ipotizzati differenti scenari; si fa innanzitutto una distinzione sulla possibilità o meno di installare pannelli fotovoltaici sugli edifici del centro città ("scenari autorizzativi"):

- *Scenario teorico*, in cui si ipotizza di poter installare pannelli fotovoltaici sui tetti di tutti gli edifici di Milano
- *Scenario reale*, in cui si ipotizza, più realisticamente, di non poter installare impianti fotovoltaici sui tetti degli edifici del centro, che si è congetturato coincidere, in modo molto cautelativo, con l'intera Zona 1 del comune di Milano

ed altri tre scenari che riguardano invece la distribuzione delle tecnologie dei pannelli fotovoltaici installati ("scenari tecnologici"):

- *Scenario Mono*, in cui si valuta il potenziale dell'installazione di soli pannelli al silicio monocristallino
- *Scenario Poli*, in cui si valuta il potenziale dell'installazione di soli pannelli al silicio policristallino
- *Scenario Mix Attuale*, in cui si valuta l'installazione di pannelli seguendo l'attuale suddivisione (22%-72%-6%) sulla superficie disponibile

Di seguito mappe, grafici e tabelle che presentano i vari risultati.

Tabella 4.21 Valori riassuntivi della stima di energia elettrica prodotta dalla superficie disponibile per pannelli fotovoltaici per il comune di Milano nei vari scenari di produzione

		Totale	Unità di misura	
Scenario teorico (FV in centro)	Superficie Disponibile	4.573.422	m ²	
	Energia Prodotta	Scenario Mono	583,1	GWh/anno
		Scenario Poli	501,6	GWh/anno
		Scenario Mix	522,3	GWh/anno
Scenario reale (NO FV in centro)	Superficie Disponibile	3.796.052	m ²	
	Energia Prodotta	Scenario Mono	483,9	GWh/anno
		Scenario Poli	387,1	GWh/anno
		Scenario Mix	431,7	GWh/anno

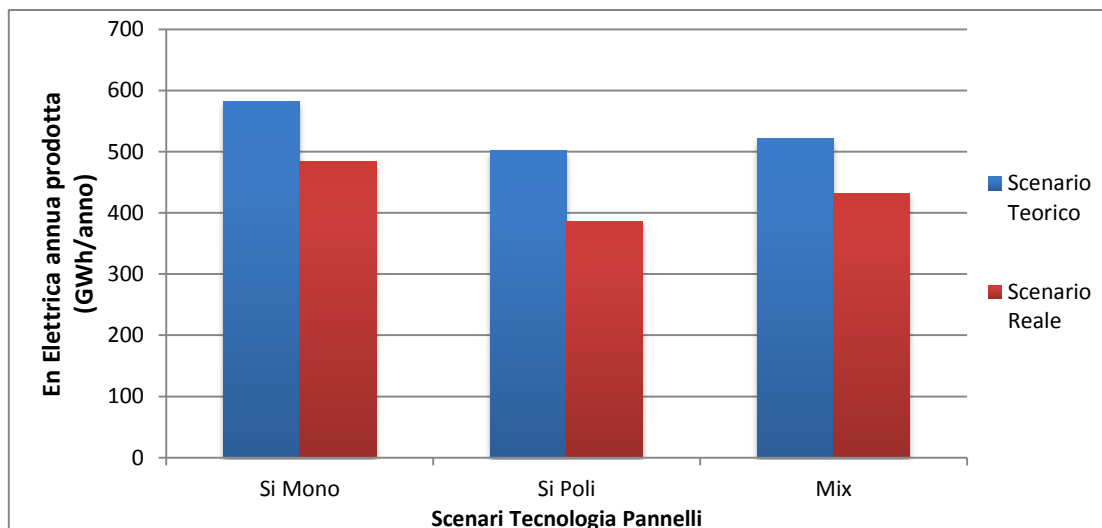


Grafico 4.22 Valori stimati di produzione annua di energia elettrica da pannelli fotovoltaici installati sui tetti degli edifici residenziali di Milano nei vari scenari tecnologici e amministrativi

Per quanto riguarda la differenza tra gli scenari “autorizzativi”, si nota che non considerando gli edifici più centrali per l’installazione dei pannelli fotovoltaici, vengono esclusi 4.273 edifici (circa il 12,5% degli edifici considerati), la rispettiva superficie disponibile, pari a 777.370 m², e quindi la relativa energia elettrica prodotta, pari a 99 GWh/anno per lo scenario in cui si adottano esclusivamente pannelli al silicio monocristallino, 114 GWh/anno per lo scenario in cui si adottano esclusivamente pannelli al silicio policristallino e 91 GWh/anno in quello in cui viene mantenuto l’attuale mix tecnologico regionale.

Per quanto riguarda invece la distinzione tra gli scenari tecnologici, si ha una maggiore produzione elettrica ipotizzando di installare esclusivamente pannelli al silicio monocristallino, e si ha infatti uno scostamento tra 80 e 90 GWh/anno circa in più rispetto alla scenario in cui i pannelli installati sono ipotizzati essere interamente del tipo policristallino. Lo scenario che segue l’attuale mix di produzione regionale presenta valori intermedi tra i precedenti.

Nelle due mappe seguenti vengono confrontati gli edifici di Milano per produzione di energia elettrica da pannelli FV nei due casi di silicio monocristallino e silicio policristallino; ovviamente nel primo caso, vista l’efficienza migliore, la mappa risulta “più scura”:

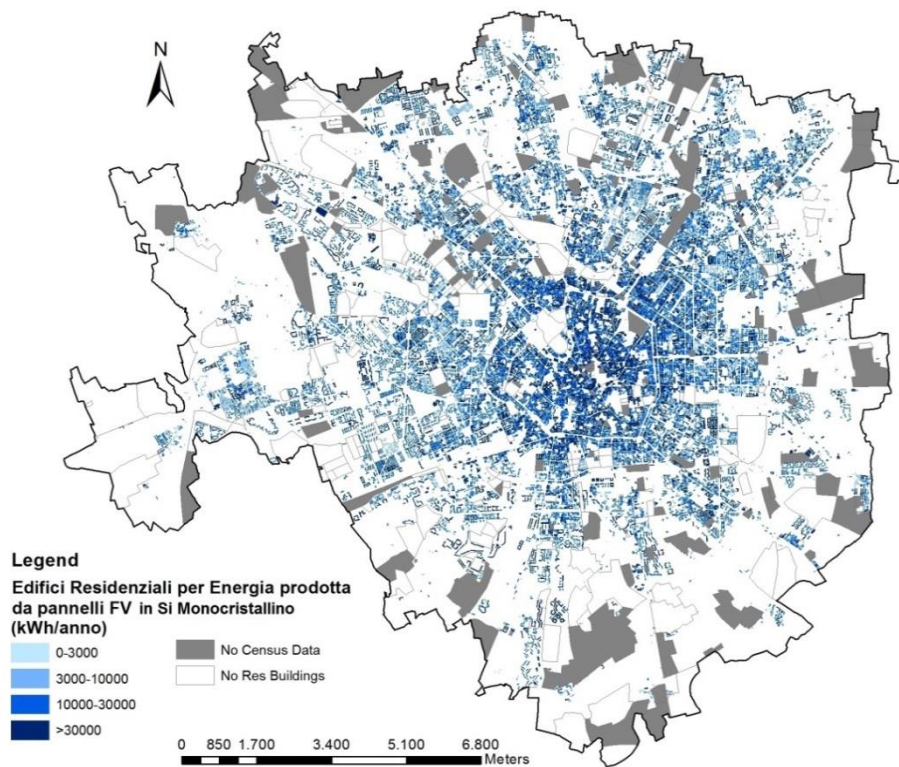


Figura 4.29 Mappa degli edifici residenziali di Milano considerati classificati per energia prodotta da pannelli fotovoltaici in silicio monocristallino (kWh/anno)

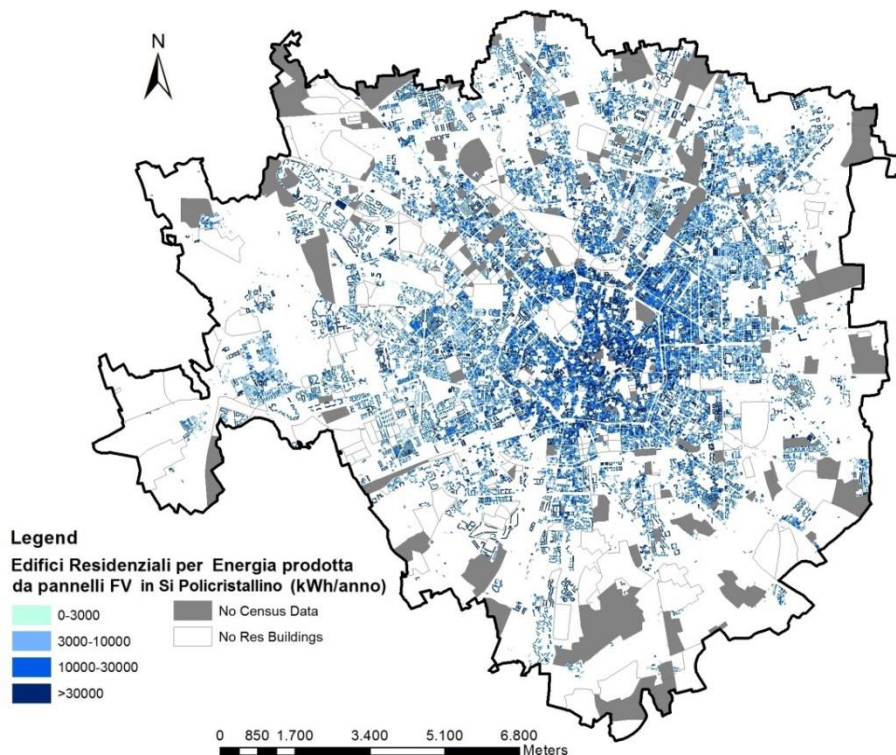


Figura 4.30 Mappa degli edifici residenziali di Milano considerati classificati per energia prodotta da pannelli fotovoltaici in silicio policristallino (kWh/anno)

Qui di seguito la mappa degli edifici di Milano classificati per energia prodotta da pannelli fotovoltaici in silicio policristallino, nello scenario in cui si ipotizza che sui tetti degli edifici centrali (cioè degli edifici situati in Zona 1, evidenziata in rosso) non sia possibile installare gli impianti.

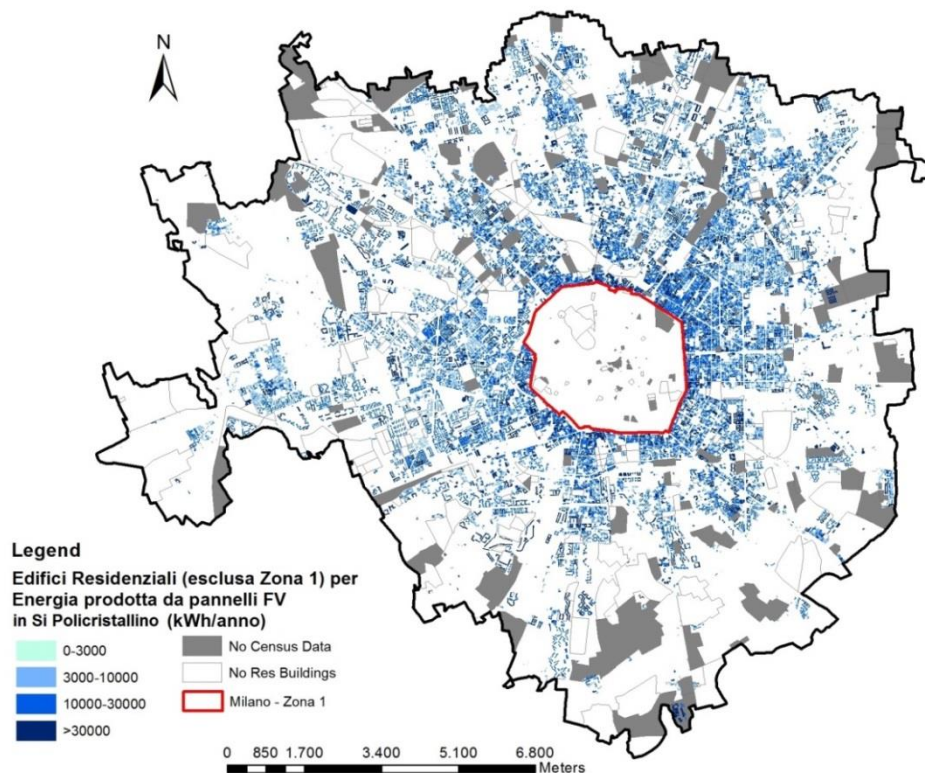


Figura 4.31 Mappa degli edifici residenziali di Milano considerati, classificati per energia prodotta da pannelli fotovoltaici in silicio policristallino per lo scenario reale, con la Zona 1 evidenziata in rosso (kWh/anno)

Nelle due figure seguenti, invece, vengono presentate due mappe riguardanti le sezioni censuarie: nella prima sono stati considerati i valori di produzione medi degli edifici contenuti da ogni sezione censuaria, mentre nella seconda i valori di produzione totali degli edifici contenuti da ogni sezione censuaria; dalla prima mappa si nota come non ci sia una ben precisa ed omogenea distribuzione “geografica” della produzione di energia da fotovoltaico per gli edifici di Milano, e come la maggior parte si attesti nella fascia tra i 10.000 e i 30.000 kWh di energia elettrica prodotta all’anno; dalla seconda, invece, si nota come le sezioni maggiormente centrali presentino i valori di produzione complessivi maggiori, per poi ridursi verso le periferie. Ovviamente questa distribuzione si ha in quanto le sezioni censuarie centrali siano caratterizzate da una più elevata densità di edifici.

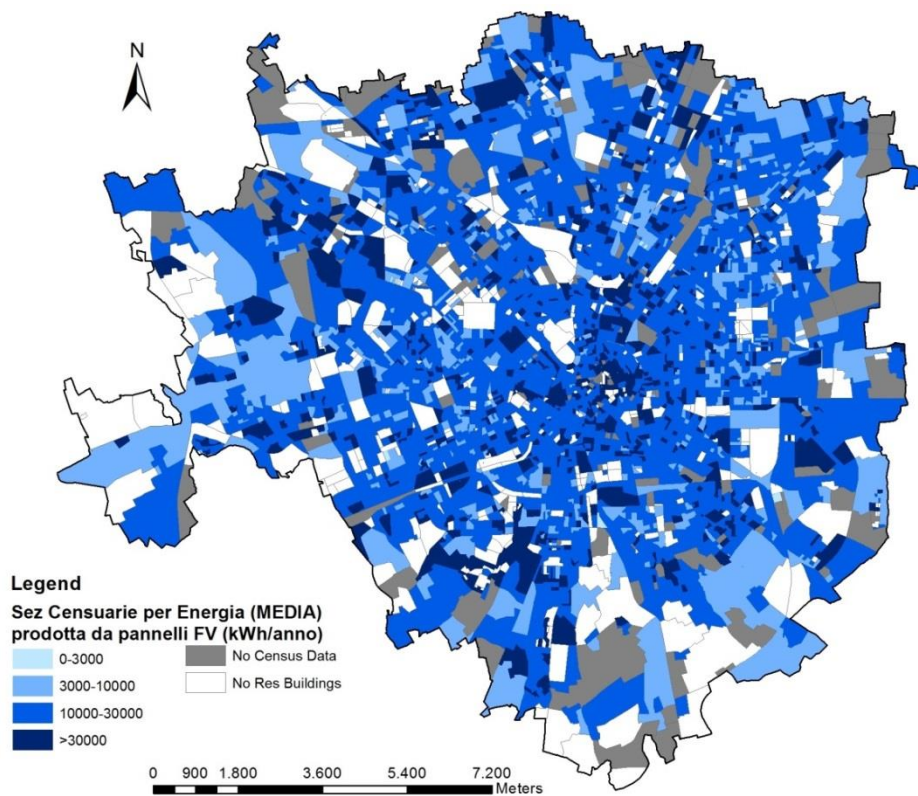


Figura 4.32 Mappa delle sezioni censuarie di Milano classificate per produzione di energia da fotovoltaico media (calcolata come media tra gli edifici che contengono) (kWh/anno)

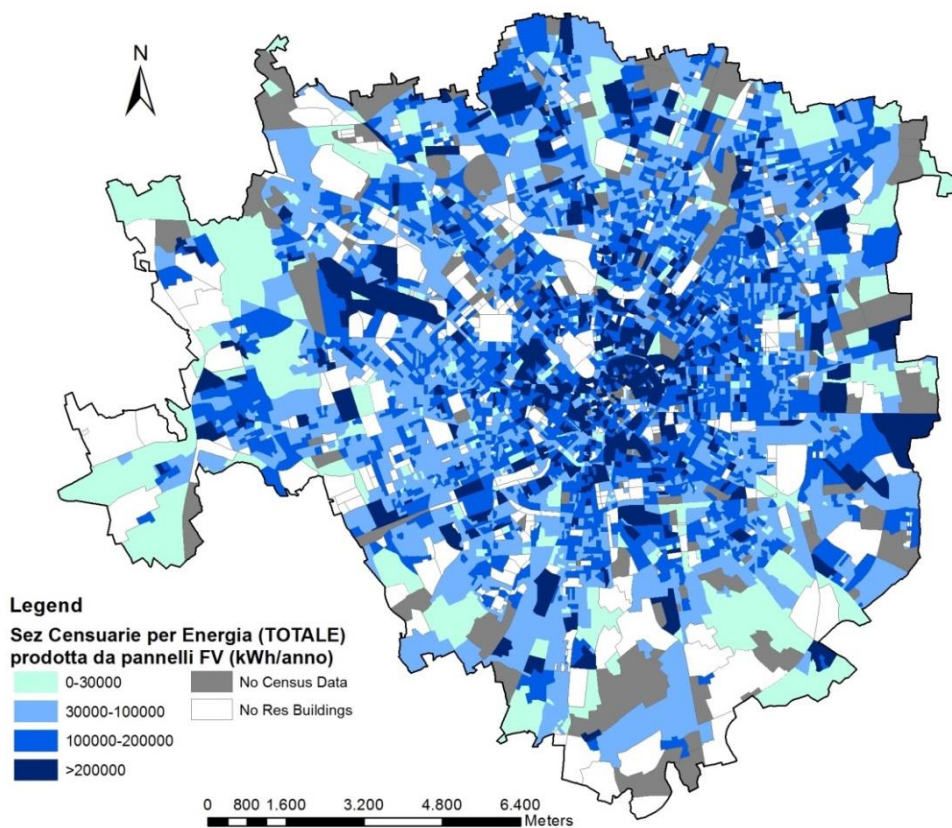


Figura 4.33 Mappa delle sezioni censuarie di Milano classificate per produzione di energia da fotovoltaico totale (calcolata come somma dell'energia prodotta dagli edifici che contengono) (kWh/anno)

Analisi dell'autosufficienza elettrica

Di seguito vengono presentate alcune analisi che hanno lo scopo di valutare il livello di autosufficienza elettrica che si arriva a conseguire rispetto ai consumi totali dei vari scenari.

In prima battuta, si riporta un'analisi alla scala delle sezioni censuarie, in cui, mediante il calcolo del bilancio di energia netta, calcolato come differenza tra energia elettrica consumata ed energia elettrica prodotta, si sono distinte le sezioni censuarie a seconda che il consumo dei rispettivi edifici ecceda o meno rispetto all'autoproduzione. Si nota come per entrambi gli scenari *autorizzativi* le sezioni autosufficienti siano poche rispetto al totale, e cioè, nel caso dei consumi attuali, 287 nel caso in cui NON venga considerata la possibilità di installare pannelli fotovoltaici sui tetti degli edifici centrali e 433 nel caso in cui sia possibile farlo, mentre nel caso dei consumi ridotti del 40%, gli stessi valori passano rispettivamente a 535 e 782. Ovviamente in quest'ultimo caso (consumi elettrici ridotti del 40%), l'energia netta risulta, anche se non di molto, minore, ed infatti sono quasi il doppio le sezioni censuarie autosufficienti (rispettivamente l'8 e l'11% circa delle sezioni totali), e quindi sarà complessivamente minore l'energia elettrica da importare dall'esterno. Un'altra volta, quindi, viene rimarcata l'importanza come prima cosa di ridurre i consumi agendo direttamente sulla domanda.

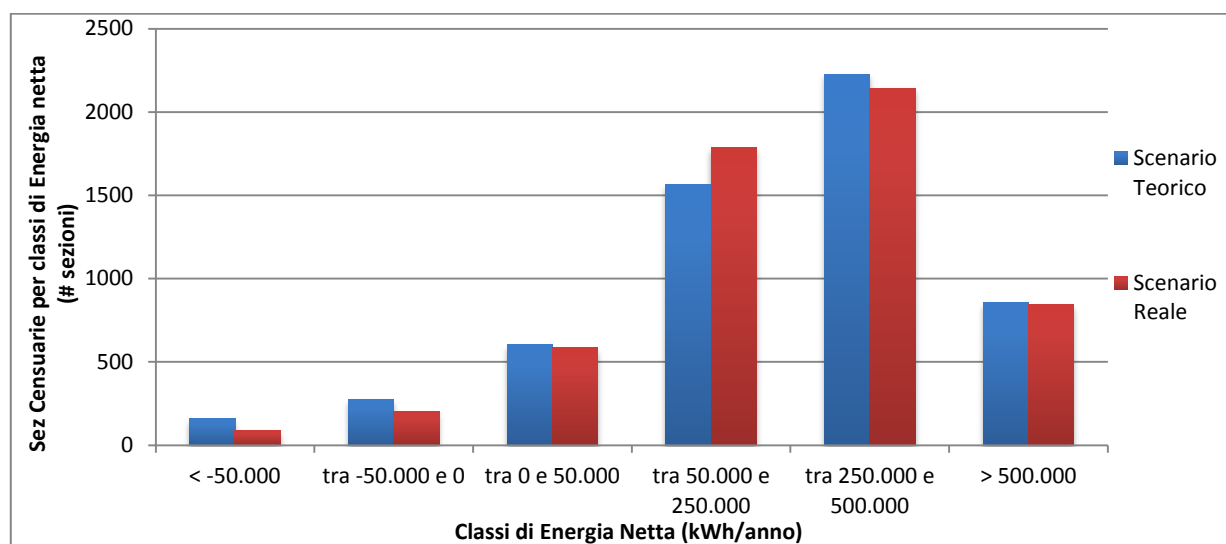


Grafico 4.23 Suddivisione delle sezioni censuarie per classi di energia netta (kWh/anno) per lo scenario teorico (che include gli edifici centrali) e lo scenario reale (che prevede di escluderli) nel caso dei consumi elettrici attuali

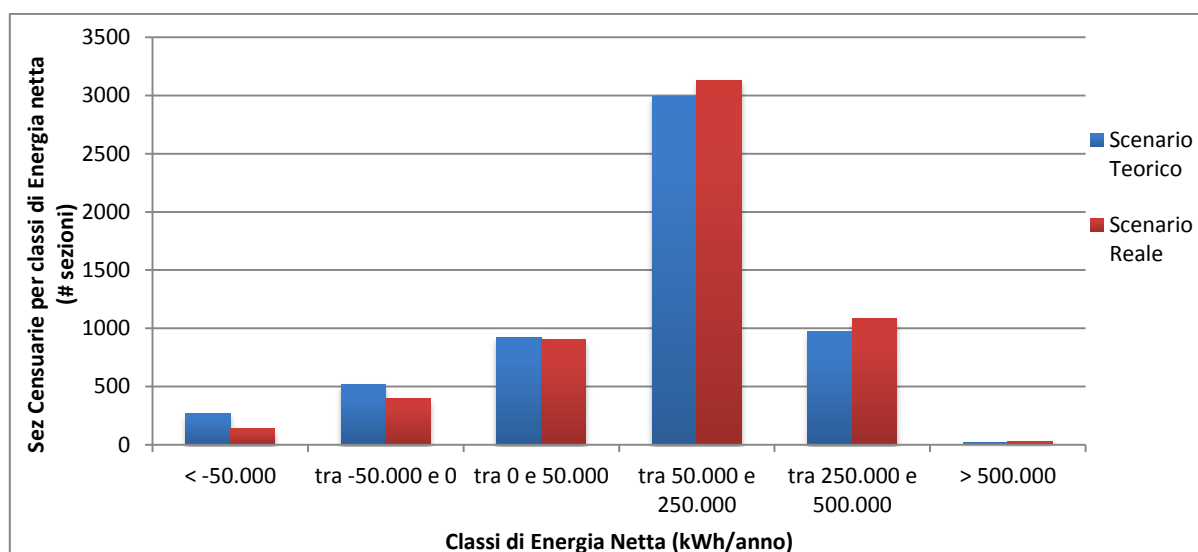


Grafico 4.24 Suddivisione delle sezioni censuarie per classi di energia netta (kWh/anno) per lo scenario teorico (che include gli edifici centrali) e lo scenario reale (che prevede di escluderli) nel caso dei consumi elettrici ridotti del 40%

Nelle figure successive si riportano le sezioni censuarie classificate per valori di energia netta nei vari scenari:

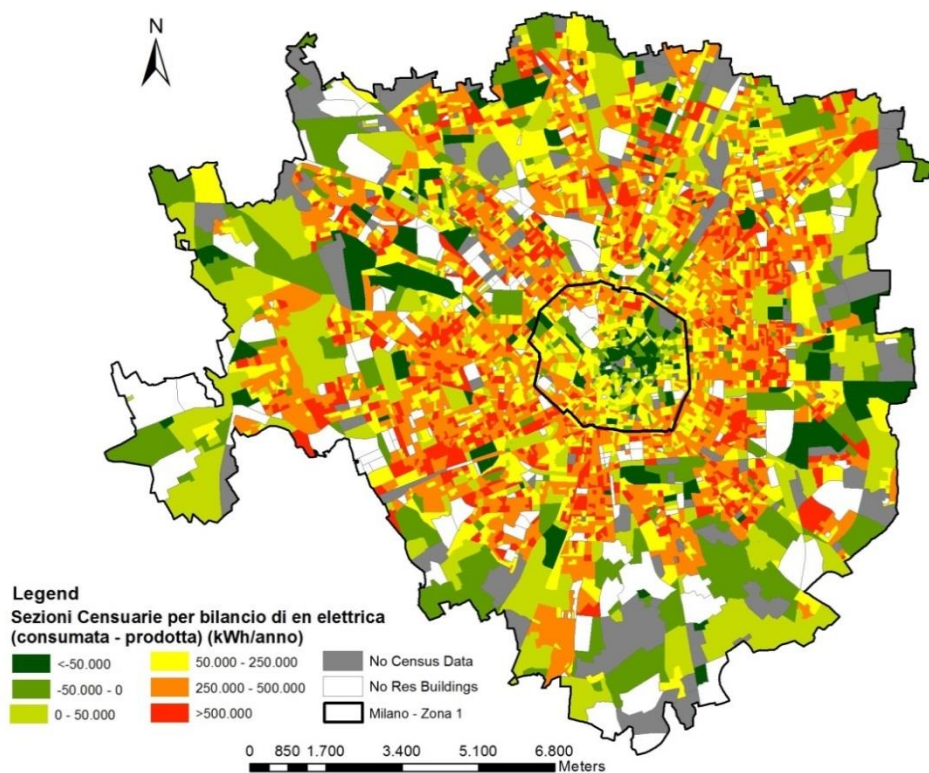


Figura 4.34 Sezioni censuarie di Milano classificate per bilancio di energia elettrica (en consumata – en prodotta) nello scenario autorizzativo teorico (in cui i tetti degli edifici centrali – zona 1 – ospitano pannelli fotovoltaici)(kWh/anno) (i consumi si riferiscono a quelli attuali)

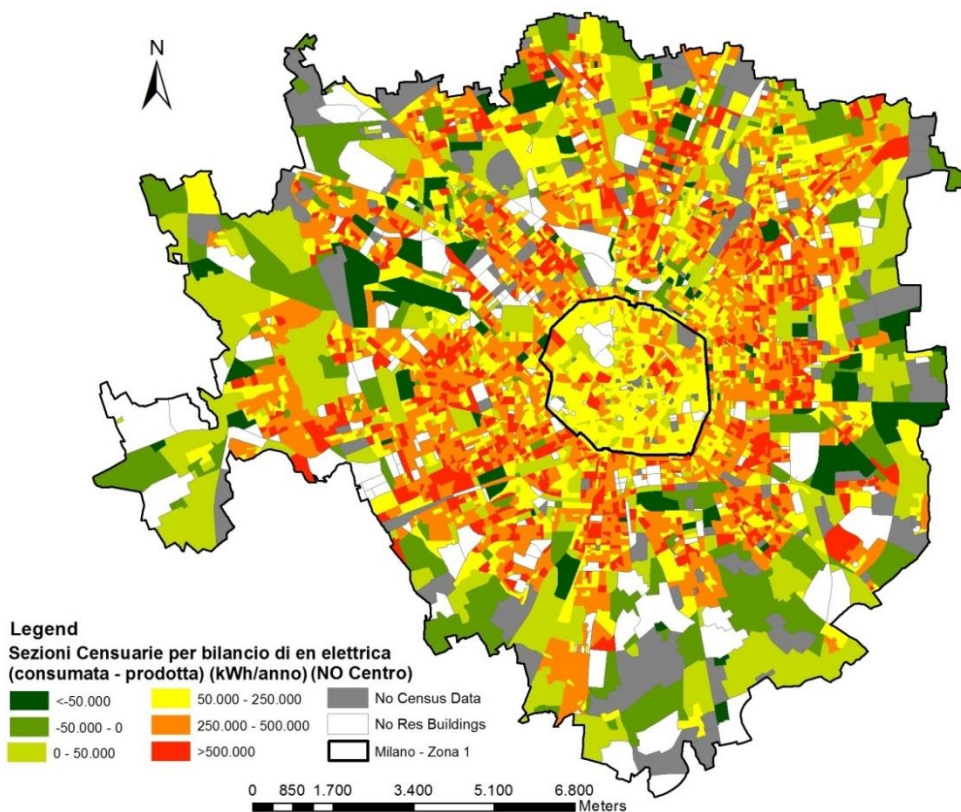


Figura 4.35 Sezioni censuarie di Milano classificate per bilancio di energia elettrica (en consumata – en prodotta) per lo scenario autorizzativo reale (in cui i tetti degli edifici centrali – zona 1 – non ospitano pannelli fotovoltaici) (kWh/anno) (i consumi si riferiscono a quelli attuali)

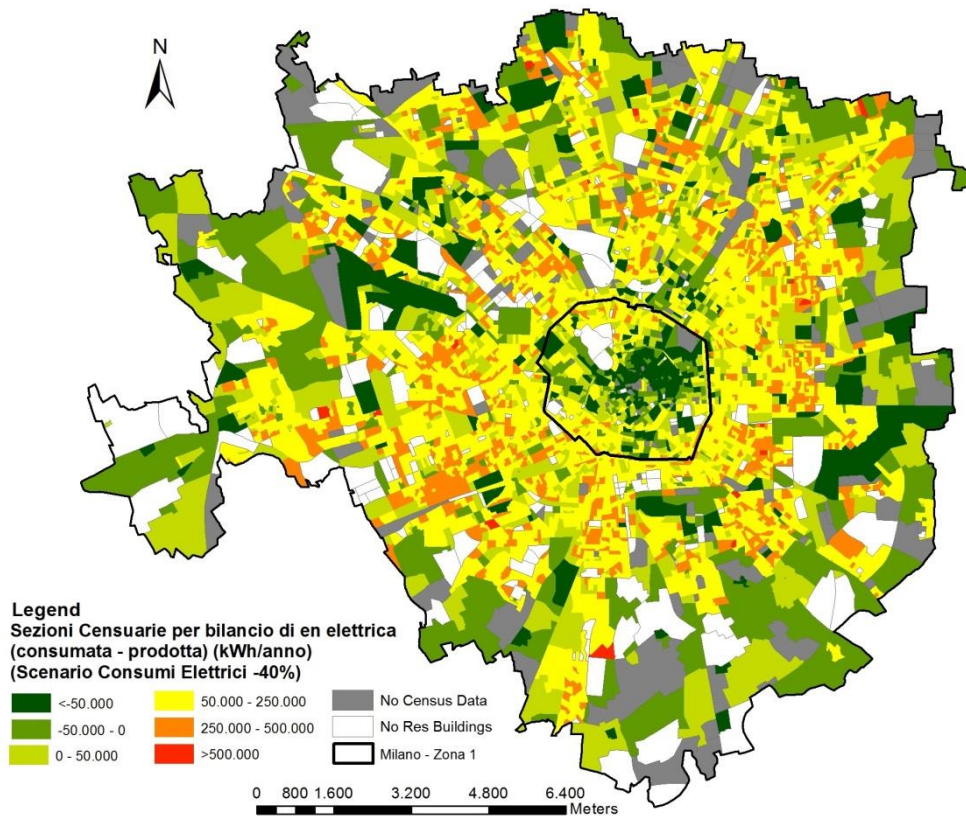


Figura 4.36 Sezioni censuarie di Milano classificate per bilancio di energia elettrica (en consumata – en prodotta) nello scenario autorizzativo teorico (in cui i tetti degli edifici centrali – zona 1 – ospitano pannelli fotovoltaici)(kWh/anno) (i consumi si riferiscono a quelli nello scenario -40%)

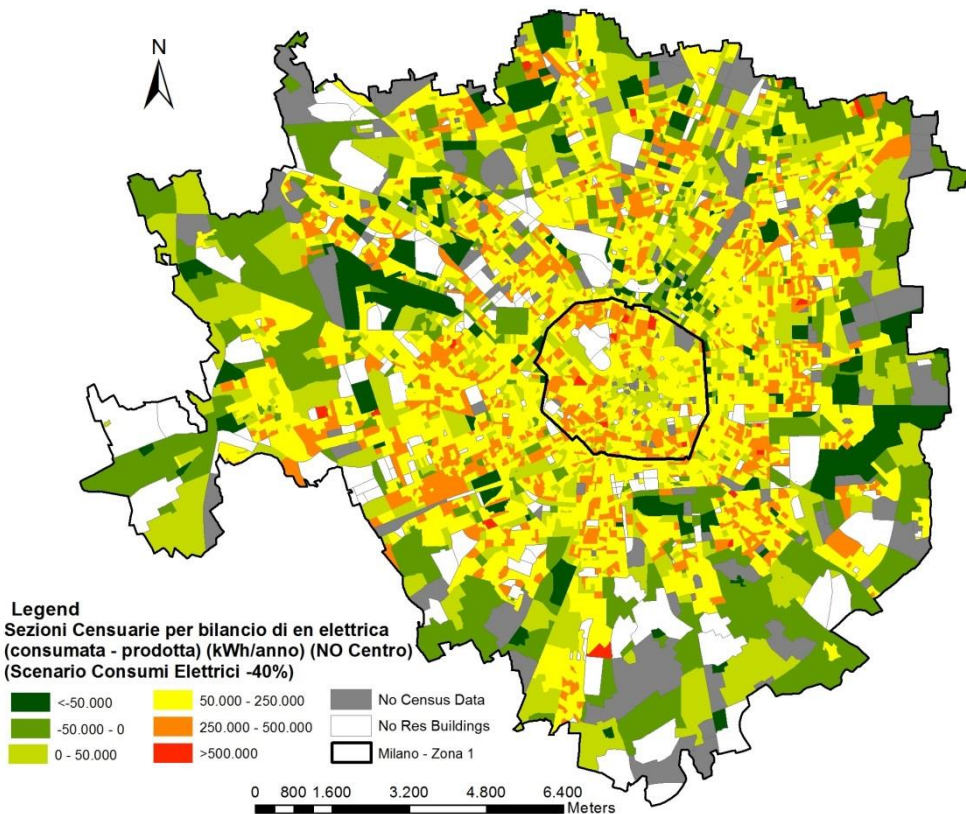


Figura 4.37 Sezioni censuarie di Milano classificate per bilancio di energia elettrica (en consumata – en prodotta) nello scenario autorizzativo teorico (in cui i tetti degli edifici centrali – zona 1 – ospitano pannelli fotovoltaici)(kWh/anno) (i consumi si riferiscono a quelli nello scenario -40%)

Si è passati quindi ai valori di soddisfacimento della domanda elettrica complessivi; per quest'analisi si fa riferimento allo scenario tecnologico che segue la distribuzione attuale dei pannelli fotovoltaici (*scenario mix*), in quanto lo si reputa maggiormente fedele alla realtà, mentre si sono considerati tutti gli scenari riferiti ai consumi elettrici. Si nota come le percentuali rispetto alla domanda complessiva di autoproduzione siano sempre superiori alla soglia del 20% ed arrivino, per lo scenario reale di produzione, al 35% nello scenario di consumi minori (*Scenario -40%*).

Tabella 4.22 Valori percentuali riguardo al soddisfacimento della domanda di energia elettrica da fotovoltaico nei vari scenari di produzione e di consumo

Scenari di consumo elettrico		Percentuali di soddisfacimento della domanda da fotovoltaico					
Nome scenario	Consumo comunale complessivo	Scenario teorico			Scenario reale		
		Scenario Si Mono	Scenario Si Poli	Scenario Mix	Scenario Si Mono	Scenario Si Poli	Scenario Mix
<i>Scenario attuale</i>	2.058 GWh/anno	28,3%	24,4%	25,4%	23,5%	18,8%	21,0%
<i>Scenario -20%</i>	1.646 GWh/anno	35,4%	30,5%	31,7%	29,4%	23,5%	26,2%
<i>Scenario -40%</i>	1.234 GWh/anno	47,2%	40,6%	42,3%	39,2%	31,4%	35,0%

Dalle stime effettuate, il solo solare fotovoltaico sembra riuscire a soddisfare un'ampia quota della domanda elettrica complessiva, in particolare se accompagnato con un generale efficientamento dell'impiantistica elettrica e di una maggiore tendenza alle cosiddette *buone pratiche* da parte degli utenti, in grado di ridurre i consumi, appunto, di un 40% al massimo. Tuttavia, non sembra essere né tecnicamente né fisicamente possibile una copertura più consistente dei consumi elettrici, ma si prospetta sul lungo periodo un necessario ulteriore decremento dei consumi delle utenze da un lato, e dall'altro l'implementazione di altre tipologie impiantistiche di produzione di energia da fonti rinnovabili nonché incrementi di efficienza della tecnologia fotovoltaica stessa.

Dalle analisi sul potenziale di energia elettrica da pannelli fotovoltaici installati sui tetti degli edifici residenziali di Milano è stato possibile arrivare a definire i seguenti punti:

- Il potenziale stimato è sicuramente molto interessante, tanto che potrebbe soddisfare in ogni scenario oltre il 20% dei consumi elettrici degli edifici residenziali
- Quanto all'autosufficienza elettrica, però, sono solamente circa il 10% le sezioni censuarie in grado di produrre più energia di quanta ne consumino

4.4.6 Analisi dei risultati della stima di energia elettrica da fotovoltaico per tessuti urbani

Come per l'analisi sui consumi di energia termica per riscaldamento ed acqua calda sanitaria, anche per quanto riguarda i consumi di energia elettrica e il relativo soddisfacimento da impianti fotovoltaici installati sui tetti degli edifici si conclude con un'analisi per tessuti urbani. Scopo di quest'analisi è quindi la valutazione dell'andamento della produzione di energia elettrica da solare fotovoltaico tra i diversi campioni di tessuti urbani selezionati. Per questo scopo sono stati valutati due parametri:

- *l'energia netta*, e cioè il bilancio tra energia elettrica consumata ed energia elettrica prodotta, calcolato appunto come differenza tra le due;
- *il grado di autoproduzione*, cioè la percentuale di energia elettrica autoprodotta da pannelli fotovoltaici rispetto all'energia elettrica consumata complessivamente.

Come scala di riferimento per tali parametri si sono tenute le sezioni censuarie dei vari campioni di tessuto urbano, mentre i parametri sono stati calcolati sia come media tra le varie sezioni componenti i 5 tessuti, sia dai valori complessivi di ogni tessuto, in modo tale da avere a disposizione un duplice dato per ogni analisi: i valori medi sono stati calcolati, appunto, come media tra i valori delle singole sezioni censuarie che vanno a comporre i 5 campioni per i 5 tessuti, mentre i valori complessivi sono stati calcolati sommando energia prodotta ed energia consumata per tutti i 5 tessuti a livello complessivo.

Si fa notare, infine, che per le successive analisi si è, cautelativamente, sempre considerata la tecnologia al silicio policristallino per il calcolo dell'energia prodotta dai pannelli fotovoltaici installati.

Innanzitutto, si vuole andare ad evidenziare i consumi di energia elettrica (medi rispetto alle sezioni censuarie) delle 5 tipologie di tessuto urbano (vedi Grafico 4.25 e Tabella 4.23). Si nota come il tessuto del tipo *Detached housing (DH)* presenti i consumi minori, data la bassissima densità abitativa, mentre i consumi maggiori si hanno in modo omogeneo per le tipologie di tessuto maggiormente dense. Può apparire strano il consumo molto ridotto del tessuto che fa riferimento alla parte più storica e centrale di Milano, addirittura all'incirca pari alla metà della tipologia di tessuto ad esso maggiormente affini (*RUB*). Tale fatto è semplice da spiegare, in quanto, oltre ad una minore quantità di abitazioni per edificio, dovuta alla minore altezza degli edifici stessi, per gli edifici più centrali si hanno solitamente ai piani inferiori utenze di tipo non residenziale, che non contribuiscono quindi ai consumi che si stanno analizzando.

Tabella 4.23 Valori dei consumi di energia elettrica medi per sezione censuaria per i cinque tessuti urbani considerati (kWh/anno/sezione)

Tessuti Urbani	Consumo di Energia Elettrica medio per sezione censuaria (GWh/anno/sezione)	
	Consumo Attuale	Consumo -40%
<i>Detached Housing (DH)</i>	0,13	0,08
<i>Regular Urban Block (RUB)</i>	0,47	0,28
<i>Slab Housing (SH)</i>	0,48	0,29
<i>Tower Block (TB)</i>	0,42	0,25
<i>Traditional Urban Block (TUB)</i>	0,24	0,14

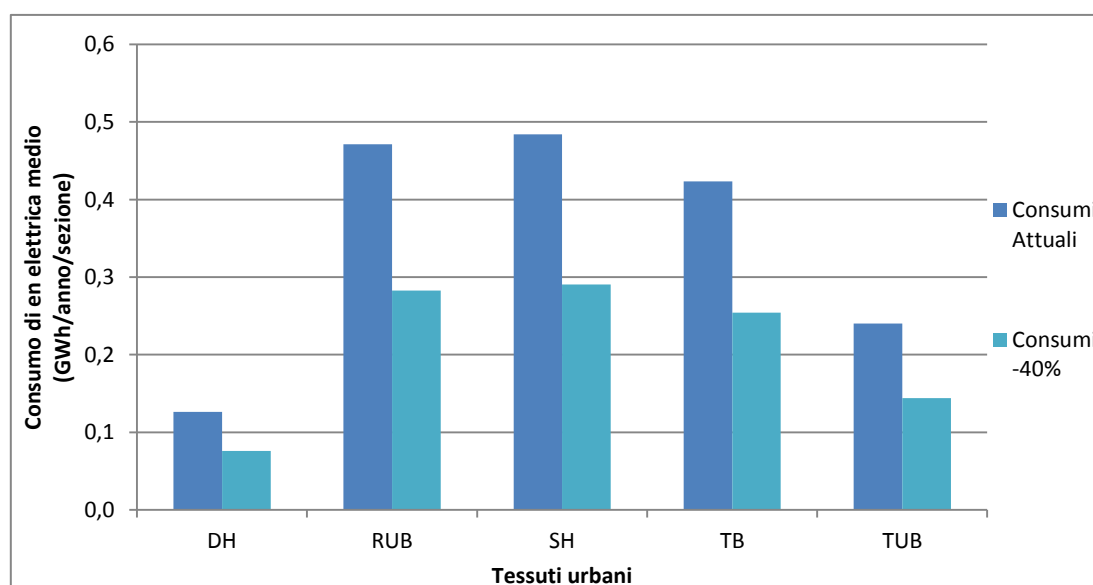


Grafico 4.25 Consumi di energia elettrica medi per le sezioni censuarie dei 5 campioni di tessuto urbano considerati (GWh/anno/sezione)

Introducendo nei consumi elettrici la riduzione della domanda generata dalla produzione di energia elettrica da pannelli fotovoltaici, si nota una generale diminuzione dell'energia elettrica richiesta dagli edifici (energia netta), riduzione che è contenuta, intorno al 20%, per i tessuti *RUB*, *SH* e *TB*, mentre è molto più consistente per i tessuti centrali (*TUB*), ipotizzando sia possibile installare impianti fotovoltaici sui rispettivi tetti; nel caso questo non sia possibile, i consumi elettrici degli edifici facenti capo al tessuto *TUB* risultano comunque essere di poco inferiori al fabbisogno elettrico netto dei tessuti *RUB*, *SH* e *TB* nonostante questi ultimi possano godere dell'installazione e quindi di una certa quota di autoproduzione di energia elettrica da fotovoltaico. A sé il caso delle sezioni appartenenti al tessuto *Detached housing*, le quali presentano addirittura valori medi di energia prodotta da FV superiori a quelli di energia consumata, ponendosi quindi come tessuti in grado di "esportare" l'energia elettrica in surplus. La stessa cosa si verifica anche per il tessuto *TUB* nel caso di riduzione dei consumi del 40%, per cui in tale scenario tali aree andrebbe a produrre più di quanto le rispettive utenze residenziali consumino (vedi Grafico 4.26).

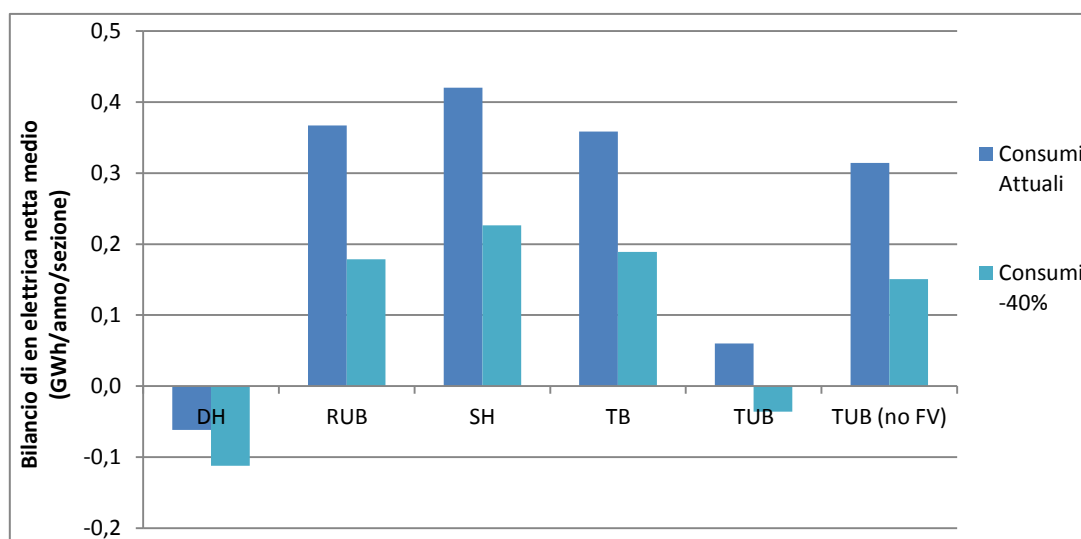


Grafico 4.26 Valori di bilancio di energia elettrica netta (consumata – prodotta) medi per le sezioni censuarie dei 5 campioni di tessuto urbano considerati (GWh/anno/sezione) (per il tessuto centrale si sono riportati i valori in entrambi gli scenari autorizzativi)

Guardando, infine, il dato che riporta la quota di autoproduzione (vedi Grafico 4.27 e Grafico 4.28), ovvero la percentuale di energia elettrica autoprodotta rispetto all'energia consumata, si nota come, per il campione a bassa densità (*DH*) si abbia un'eccedenza di energia autoprodotta, superando ampiamente tale valore il 100%, mentre gli altri valori percentuali vanno di fatto a seguire la densità e la numerosità di utenze "al di sotto del rispettivo tetto", nel senso che tessuti ad alta densità e ad alto sviluppo verticale (*SH* e *TB*) ospitano molte utenze residenziali in una superficie al terreno relativamente ridotta, per cui la superficie del tetto è proporzionalmente inferiore, così come la produzione di energia da fotovoltaico rispetto all'energia consumata; *Slab Housing* e *Tower Block* presentano infatti percentuali di autoproduzione inferiori al 20%, quindi al di sotto della media comunale, che varia tra il 24% (% rispetto ai consumi attuali) e il 38% (% rispetto ai consumi in uno scenario al -40%). Il tessuto di tipo *Regular Urban Block* avendo mediamente una minore quantità di utenze residenziali a causa del minor numero di piani rispetto ai tessuti precedenti e solitamente tetti piuttosto ampi, è caratterizzato da una maggiore quota di autoproduzione proprio rispetto a *TB* e *SH*, mentre per le sezioni censuarie facenti capo al tessuto più centrale (*TUB*), nel caso in cui fosse possibile installare pannelli fotovoltaici sui rispettivi tetti, le percentuali di autoproduzione sarebbero estremamente interessanti, arrivando anche oltre la completa autonomia elettrica (scenario -40%). Ribadiamo che tale dato è sicuramente sovrastimato, in quanto gli edifici più centrali sono raramente costituiti da sole utenze residenziali, ospitando di solito ai piani inferiori utenze commerciali o di natura diversa da quella domestica, che quindi non figurano all'interno del dato riguardante i consumi elettrici. Nonostante questo, il loro potenziale di autoproduzione elettrica, se sfruttato, dovrebbe risultare in ogni caso notevole.

Tabella 4.24 Valori (complessivi rispetto alle sezioni censuarie delle 5 tipologie di tessuto urbano) riassuntivi della produzione di energia elettrica da fotovoltaico e quindi di energia elettrica netta (MWh/anno/sezione)

Tessuti	En Elettrica Prodotta da FV (Si Policristallino)	Consumo Attuale			Consumo -40%		
		Consumo di energia elettrica	Energia netta	Quota autoproduzione	Consumo di energia elettrica	Energia netta	Quota autoproduzione
	(MWh/anno/sezione)	(MWh/anno/sezione)	%	(MWh/anno/sezione)	%		
DH	188	126	-62	98	75	-113	164
RUB	104	471	367	22	283	179	36
SH	64	484	420	13	290	226	22
TB	65	423	358	15	254	189	26
TUB	180	240	60	72	144	-36	120
TUB (no FV)	0	240	240	0	144	144	0

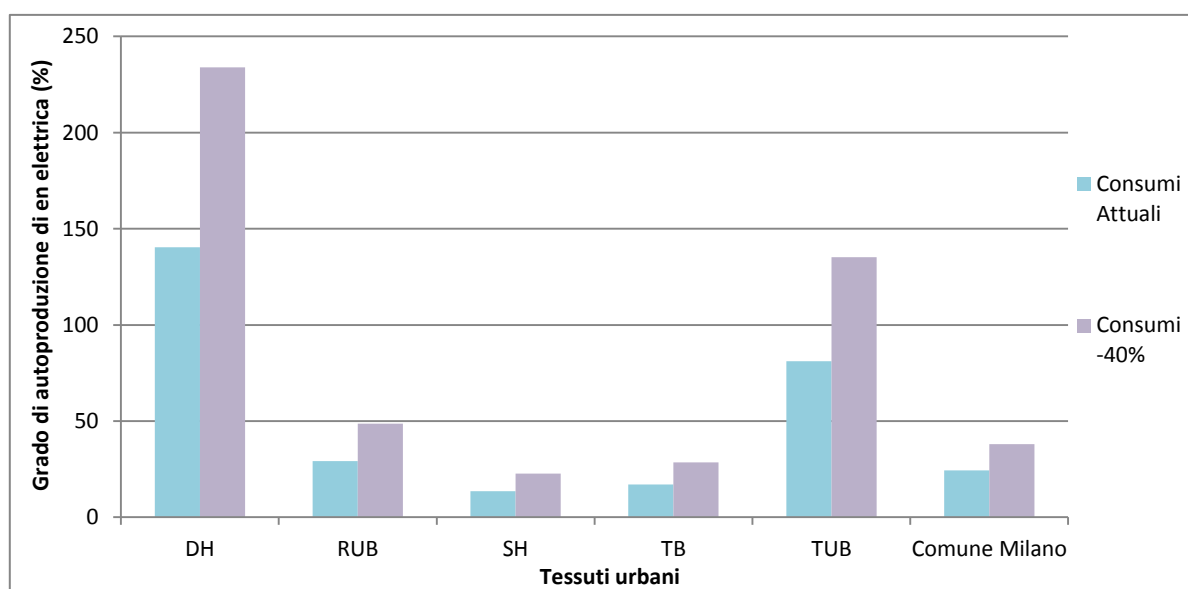


Grafico 4.27 Valori medi del grado di autoproduzione di energia elettrica per i 5 campioni di tessuto urbano considerati (%)

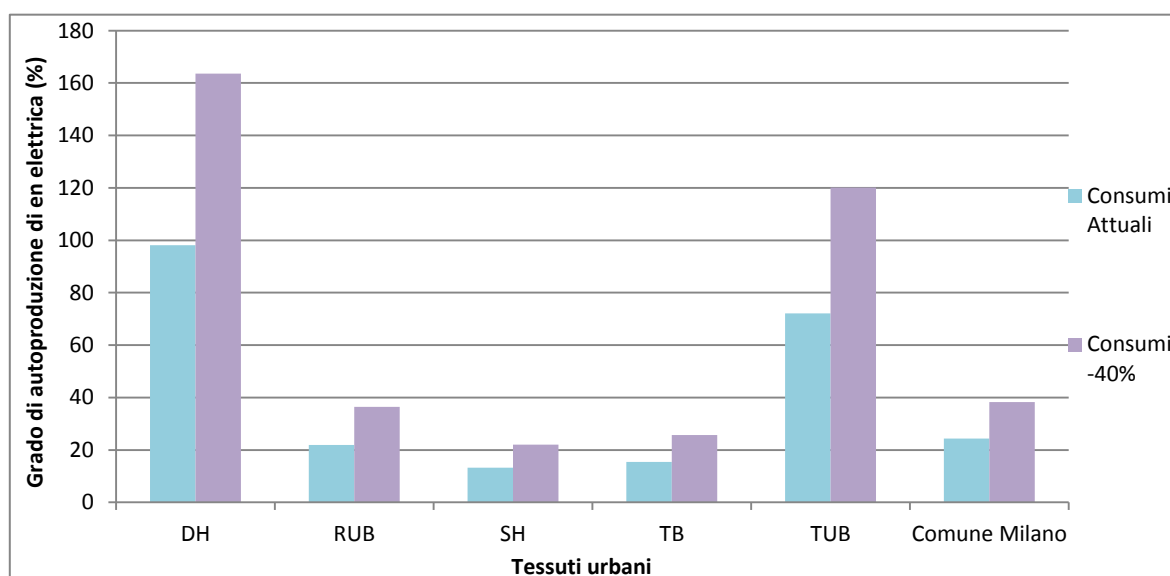


Grafico 4.28 Valori complessivi del grado di autoproduzione di energia elettrica per i 5 campioni di tessuto urbano considerati (%)

È possibile riassumere quanto emerso dall'analisi dei consumi elettrici e della loro riduzione mediante autoproduzione da pannelli FV per tessuti urbani nei punti che seguono:

- Gli edifici appartenenti al tessuto a densità minore (*DH*) risultano avere un bilancio di energia netta negativo, nel senso che producono più di quanto consumino, in quanto, "al di sotto" di una superficie di tetto discretamente ampia, sono costituiti da una o al massimo due utenze, quindi consumi elettrici ridotti
- I tessuti più centrali, nel caso in cui potessero ospitare pannelli fotovoltaici sui rispettivi tetti, avrebbero bisogno di un ridotto apporto di energia elettrica dall'esterno, in quanto sono mediamente più bassi rispetto agli edifici degli altri tessuti (*SH*, *TB* e *TUB*) quindi hanno consumi elettrici inferiori, ed una superficie disponibile solitamente maggiore.
- Quanto ad i restanti tessuti (*SH*, *TB* e *TUB*), la situazione è meno vantaggiosa, in quanto la quota di autoproduzione è molto inferiore, attestandosi a valori tra il 20% ed il 30%.

4.5 Validazione del modello

In questo paragrafo si è cercato di *validare* il modello, cercando di confrontare i risultati in output dal nostro modello con dati provenienti da lavori simili al nostro oltre che ad altri dati aggregati al livello del comune di Milano.

Consumi medi per unità di superficie

Andiamo innanzitutto a confrontare i dati sul consumo medio per edificio di energia termica stimato dal modello con i corrispondenti dati forniti dal CENED, dal Catasto Energetico Edifici Regionale (CEER), che riporta i dati acquisiti mediante gli Attestati di Certificazione Energetica (vedi Tabella 4.25). Da tale confronto, innanzitutto, si nota che i valori, cosa non trascurabile, sono assolutamente confrontabili, sia per riscaldamento che per acqua calda sanitaria. Il valore del modello riguardante il riscaldamento risulta sovrastimato, di quasi 60 kWh/mq/anno; tale discrepanza, tuttavia, può essere spiegata probabilmente con il fatto che il dato del CENED comprende una media dei consumi solo per gli edifici del comune di Milano già certificati dal CENED stesso, e si presume che gli edifici meno efficienti tendano a non venire certificati, abbassando, quindi, la media dei consumi. Un secondo motivo per cui il nostro dato risulta maggiore potrebbe essere probabilmente il fatto che TABULA, il database da cui si è partiti per la stima effettuata, non può considerare eventuali riqualificazioni nel frattempo già effettuate sugli edifici considerati. Inoltre, gli edifici più recenti (oltre il 2001), che avrebbero contribuito ad abbassare ulteriormente il valore medio, considerati da ISTAT e dal DB Topografico sono pochi.

Tabella 4.25 Confronto tra i dati in output dal modello ed i dati del CENED (kWh/m²/anno)

	<i>Fabbisogno di energia primaria per climatizzazione invernale</i>	<i>Fabbisogno di energia primaria per acqua calda sanitaria</i>	<i>Unità di misura</i>
Modello	258	48	kWh/m ² /anno
CENED	198,75	57,84	kWh/m ² /anno
<i>Scostamento</i>	<i>+59,25</i>	<i>-9,84</i>	<i>kWh/m²/anno</i>

Per quanto riguarda, invece, il fabbisogno per acqua calda sanitaria lo scostamento è meno evidente, data anche la diversa portata dei consumi, ed è di segno opposto, nel senso che i consumi stimati dal nostro modello risultano minori rispetto a quelli medi del CENED. In questo caso, è più complicato fornire una spiegazione dai dati e dalle informazioni a disposizione.

Consumi complessivi

Per quanto riguarda i consumi complessivi riferiti a tutto il parco edifici comunale, si è optato di confrontare i dati stimati dal nostro modello con un lavoro simile su Milano (Caputo et al., 2013) e con il database regionale SIRENA (Sistema Informativo Regionale Energia Ambiente).

Lo studio di Caputo et al. (2013) (si veda all'interno del Capitolo 2 per maggiori informazioni) oltre agli edifici residenziali considera anche edifici di tipo commerciale, e quindi a priori si pensa che i consumi stimati dovessero risultare maggiori rispetto ai consumi stimati dal nostro modello; tuttavia, questo accade solo per i consumi elettrici, mentre sia i consumi per riscaldamento che quelli per ACS risultano inspiegabilmente inferiori.

Tabella 4.26 Confronto dei dati risultanti dal modello oggetto del lavoro di tesi con quelli da Caputo et al. (2013)

	Caputo et al. (2013)	Modello	Unità di misura
Consumi elettrici	5.112	2.058	GWh/anno
Consumi per riscaldamento	9.589	12.917	
Consumi per ACS	1.768	2.448	

Per quanto riguarda, invece, i dati di SIRENA, non è stato possibile effettuare un confronto puntuale, in quanto in tale database, tra le altre cose, si hanno i consumi per ogni comune lombardo per il settore residenziale, ma complessivi di ogni vettore energetico (en elettrica, gas naturale, gasolio, ...), oppure i consumi per singolo vettore energetico, ma complessivi di ogni settore (residenziale, servizi, trasporti, ...). È risultato quindi impossibile un confronto significativo.

Detto questo, è bene far notare come questo modello non si prefigga lo scopo di stimare esattamente a livello numerico i consumi dei singoli edifici, né di stimare in modo preciso i consumi totali a livello urbano, ma si vuole invece rendere un'idea delle performance energetiche a scala urbana, e quindi dei consumi a livello medio, delle tipologie edilizie piuttosto che dei tessuti urbani più o meno energivori.

Consumi medi per i diversi tessuti

Per quanto concerne, invece, l'analisi dei consumi sulla base dei diversi tessuti urbani, è stato possibile confrontare i risultati del lavoro di Doni e Keim (2010), avendo utilizzato le loro stesse tipologie di tessuti urbani. È bene far notare che, però, i consumi stimati da Doni e Keim fanno riferimento al fabbisogno di energia netta, e cioè l'energia che un qualsiasi impianto di riscaldamento dovrebbe produrre per mantenere costante la temperatura nel periodo invernale, considerando sia le perdite che i guadagni energetici (vedi Tabella 4.27).

Tabella 4.27 Confronto tra il fabbisogno di energia primaria calcolato dal nostro modello ed il fabbisogno netto di energia stimato da Doni e Keim (kWh/mq/anno)

Tessuto	Fabbisogno di energia per riscaldamento (kWh/m ² /anno)	
	Modello	Doni e Keim
Detached Housing	320,3	195
Regular Urban Block	258,6	125
Slab Housing	231,9	115
Tower Block	186,9	105
Traditional Urban Block	251,2	110
MILANO	250,12	135

Piuttosto che confrontare quindi i valori in sé, è interessante analizzare le proporzioni tra i vari tessuti urbani, presentate nei successivi grafici (vedi Figura 4.38 e Grafico 4.29). Da questi si nota appunto come i consumi del tessuto a bassa densità siano nettamente i maggiori per entrambe le stime, mentre i tessuti *tower block* presentino quelli minori, con le altre tipologie di tessuto con consumi simili, leggermente superiori ai tessuti di

edifici a torre. Inoltre, nonostante il fatto che i fabbisogni di energia considerati da noi siano lordi, i consumi di Doni e Keim sembrano in ogni caso essere troppo inferiori; questo si spiega dal fatto che nel nostro lavoro non si sono considerati i guadagni solari gratuiti, cosa che Doni e Keim hanno fatto, e che rende quindi i loro valori in output ancora più bassi rispetto a quelli del presente lavoro di tesi.



Figura 4.38 Grafico dei consumi di energia netta risultanti dal lavoro di Doni e Keim per i vari tessuti urbani

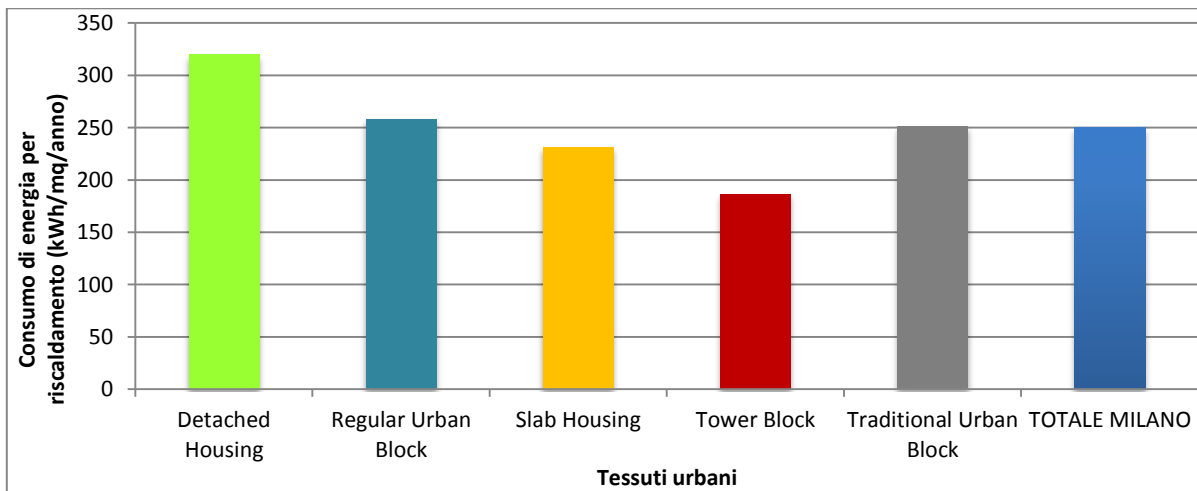


Grafico 4.29 Consumi medi attuali per riscaldamento dei 5 campioni di tessuto urbano analizzati (kWh/mq/anno)

È possibile riassumere quanto emerso dalla validazione del modello nei seguenti punti:

- i consumi medi per edificio sembrano essere ben stimati, in particolare quelli per riscaldamento, che risultano essere sì maggiori rispetto al valore medio del database CENED, database che però si presume sottostimare tale valore, in quanto considera solo gli edifici che possiedono già una classificazione energetica;
- di confronto col paper di Doni e Keim, possiamo inoltre dire che le considerazioni sui tessuti sono sicuramente compatibili;
- per quanto riguarda il confronto dei dati complessivi, rispetto al lo studio di Caputo et al., i consumi elettrici potrebbero essere compatibili, mentre quelli per energia termica risultano inspiegabilmente inferiori rispetto ai dati analoghi stimati da nostro modello.

Detto questo, è bene far notare come questo modello non si prefigga lo scopo di stimare esattamente a livello numerico i consumi dei singoli edifici, ma si vuole invece rendere un'idea dei consumi a livello medio, delle tipologie edilizie piuttosto che dei tessuti urbani più o meno energivori.

5 CONCLUSIONI

In questo ultimo capitolo sono raggruppate le considerazioni finali, emerse dalle molteplici analisi condotte durante tutto il lavoro di tesi. Verrà seguito il filo logico dell'elaborato, facendo risaltare per ogni capitolo, e quindi per ogni step dell'analisi complessiva, gli elementi salienti, interessanti ed innovativi che il presente lavoro ha suggerito; si passerà poi all'indicazione degli obiettivi raggiunti e di come il lavoro di tesi possa essere integrato alla pianificazione urbana ed energetica, per concludere con i limiti del modello e le potenziali prospettive di miglioramento.

Allo scopo di valutare le performance energetiche del parco edifici residenziali di un dato caso di studio e la rispettiva quota di energia autoprodotta da fonti rinnovabili locali, si è definita una metodologia semplificata, realizzata tra fogli di calcolo Excel e software GIS, mediante la quale si è stati in grado di stimare i consumi di energia per fini termici ed elettrici allo stato attuale, di definire i potenziali risparmi massimi di energia al seguito di interventi di retrofit energetico e di stimare il potenziale di energia che è possibile produrre da fonti energetiche rinnovabili all'interno di un'area di studio. Per testare il modello si sono implementate le suddette procedure agli edifici residenziali sul territorio del Comune di Milano.

5.1 Questioni emerse

Dalle analisi effettuate sono emerse molteplici questioni d'interesse, che vengono qui riportate seguendo la stesura dell'elaborato.

Il modello

Per quanto riguarda, innanzitutto, l'approccio modellistico per la definizione dei consumi di energia termica, si è seguito un approccio di tipo *bottom-up*, in quanto per definire i consumi totali si è partiti dall'analisi dei comportamenti dei singoli edifici (*dal basso ...*), per poi definire i consumi a scala via via più ampia (... *verso l'alto*).

Passando, invece, ai dati da cui sono partite tutte le successive stime dei consumi *termici*, è importante far emergere i seguenti punti:

- è risultato evidente come i consumi degli edifici maggiormente datati siano nettamente maggiori (all'incirca tra le 3 e 5 volte, per quanto riguarda i consumi per riscaldamento) rispetto ai consumi di edifici di più recente realizzazione, questo indipendentemente dalla tipologia edilizia degli stessi;
- la tipologia edilizia maggiormente efficiente risulta essere quella dei *blocchi di appartamenti*, mentre la meno efficiente quella delle *case monofamiliari*, a causa del diverso grado di compattezza, e quindi di dispersione termica, della rispettiva configurazione edilizia;
- la differenza dei consumi tra le diverse tipologie è andata riducendosi col passare del tempo, rendendo quindi i consumi progressivamente meno dipendenti dalla tipologia edilizia;
- riguardo i consumi relativi ad ACS, i valori sono meno omogenei, così come il trend di riduzione, che in ogni caso è presente.

Passando alla stima dei consumi di energia termica in scenari di riqualificazione energetica:

- i consumi possono essere ridotti per percentuali variabili tra l'80 ed il 90%, in dipendenza prima di tutto del livello di riqualificazione, ed in seconda battuta da tipologia edilizia e classe d'età;
- i consumi "riqualificati" subiscono meno l'influenza di tipologia edilizia e classe d'età;
- non si hanno differenze troppo importanti tra i due livelli di riqualificazione proposti nello studio, bensì tra lo stato attuale ed entrambi i consumi riqualificati, per cui non è particolarmente importante quale riqualificazione implementare, basterebbe anche un primo livello di riqualificazione per ottenere già ampi margini di miglioramento dei consumi.

Per quanto concerne la stima dei consumi di energia elettrica degli edifici residenziali, anche in questo caso, l'approccio modellistico è di tipo *bottom-up*, anche se meno dettagliato rispetto alla parte dei consumi termici. Il grado di dettaglio dipende anche dalla natura del vettore energetico, che, come detto, non dipende (o meglio, si è ipotizzato non dipendere), a differenza dei consumi termici, da tipologia edilizia o classe d'età dell'edificio.

Ultima parte del modello è la raccolta delle procedure di calcolo e dei relativi dati di partenza per la stima del potenziale di energia da FER. L'approccio modellistico è di tipo *top-down*, come tutti i modelli analizzati tra i riferimenti, per cui si è cercato di valutare il potenziale massimo teoricamente raggiungibile attraverso le procedure di calcolo, per poi valutare il potenziale effettivamente sfruttabile/sostenibile/realizzabile a seconda del contesto in esame.

L'applicazione al comune di Milano

Analisi dei consumi di energia

Come detto, la metodologia di stima è stata applicata come caso di studio al Comune di Milano. Per quanto riguarda la stima dei consumi attuali per energia termica è possibile condensare i risultati raggiunti nei seguenti punti:

- Il consumo medio per riscaldamento degli edifici di Milano è molto elevato, ed eccede di circa il 50% rispetto al limite della classe energetica G del CENED;
- Questo è principalmente dovuto, più che alla tipologia edilizia, all'età media degli edifici milanesi, che si concentrano infatti per circa il 91% prima del 1971, cioè prima di ogni riferimento legislativo nazionale all'efficienza energetica degli edifici;
- Per quanto riguarda l'acqua calda sanitaria, l'andamento dei consumi è meno lineare ed omogeneo rispetto a quello per riscaldamento al variare di classe d'età e tipologia edilizia.

Passando alla stima dei consumi in scenari di riduzione del fabbisogno per energia termica è stato possibile giungere alle seguenti conclusioni:

- Il potenziale di risparmio energetico stimato per la città di Milano è molto ampio, con percentuali tra l'80 ed il 90% per riscaldamento e tra il 50 e il 70% per ACS, rispettivamente per riqualificazione standard ed avanzata;
- Indipendentemente dal livello di riqualificazione, il risparmio è molto vantaggioso: per esempio, basterebbe anche una riqualificazione standard per ridurre dell'80% i consumi di energia termica per riscaldamento;
- Gli edifici più vecchi presentano il potenziale di risparmio maggiore, mentre, in termini percentuali, il risparmio resta omogeneo al variare della tipologia edilizia.

Per quanto riguarda la stima dei consumi elettrici, i dati ottenuti in output definiscono una situazione in cui:

- i consumi attuali elettrici stimati risultano essere in un rapporto all'incirca di 1:6 rispetto ai consumi attuali per riscaldamento;
- negli scenari di efficientamento tale proporzione passa all'incirca ad un rapporto di 1:1, ed i consumi diventano così dello stesso ordine di grandezza;

- in generale, non è molto significativo commentare questo tipo di consumi, in quanto, a differenza dei consumi termici, si sono ipotizzati essere del tutto omogenei tra le varie tipologie edilizie e classi d'età.

Come detto, oltre ad un'analisi più generale condotta alla scala urbana, si è andati ulteriormente nel dettaglio, eseguendo un'analisi per tessuti urbani riguardante in questo caso esclusivamente i consumi di tipo termico; da tale analisi è possibile concludere che:

- il tessuto meno denso, *Detached Housing*, (*DH*) presenta i consumi attuali per riscaldamento più elevati, mentre quello meno denso, *Tower Block*, (*TB*) i consumi minori; i restanti tessuti, invece, presentano consumi piuttosto omogenei tra loro;
- i risparmi netti seguono l'andamento dei consumi, mentre i risparmi percentuali, come si è visto a scala urbana, risultano essere costanti al variare delle tipologie di tessuto urbano;
- nello scenario finale (più realistico) in cui si ipotizza di arrivare ad una riqualificazione di tipo avanzato su tutti i tessuti tranne che per i tessuti storici, *Traditional Urban Block*, (*TUB*), che si fermano ad una riqualificazione di tipo standard, sono proprio questi ultimi a presentare i consumi per riscaldamento maggiori, seguiti dai tessuti *DH*, mentre i rimanenti tessuti si attestano a fabbisogni di energia termica inferiori di quasi la metà rispetto ai *TUB*.

Si fa presente che questo tipo di analisi è strettamente legata al caso di studio, in quanto, per esempio, in un altro comune il tessuto *DH* potrebbe essere caratterizzato da edifici interamente nuovi, mentre il tessuto *TB* da edifici molto vecchi, e quindi le cose probabilmente cambierebbero; detto questo, indipendentemente dall'età degli edifici, tessuti a bassa densità sono solitamente più energivori, secondo il modello all'incirca del 30%, di tessuti caratterizzati da densità maggiori.

Analisi del potenziale da FER

Per la stima del potenziale di energia da FER relativamente al caso di studio si sono considerate solo tipologie impiantistiche di tipo *elettrico*, in quanto quelle di tipo *termico* sono già implementate all'interno dei consumi degli scenari di riqualificazione energetica, e tra esse solamente potenzialmente compatibili con il contesto considerato, cioè impianti a digestione anaerobica da reflui e da colture dedicate ed impianti solari fotovoltaici.

Dall'analisi sul potenziale di energia elettrica da impianti a digestione anaerobica del comune di Milano è possibile concludere che:

- l'energia elettrica potenzialmente ottenibile dai suoli agricoli a seminativo del territorio comunale è all'incirca pari al 2-3% dei consumi elettrici attuali; tale percentuale è però raggiungibile utilizzando TUTTO il suolo agricolo a seminativo del comune per fini energetici; la cosa è chiaramente irrealistica. In uno scenario che si ipotizza maggiormente realizzabile, la superficie disponibile si riduce di circa un ordine di grandezza, così come la percentuale di consumi elettrici che riesce ad essere così soddisfatta;
- l'energia elettrica potenzialmente ottenibile, invece, da reflui zootecnici è praticamente nulla, in quanto il numero di allevamenti e quindi di capi sul territorio comunale è troppo contenuto.

Dalle analisi sul potenziale di energia elettrica da pannelli fotovoltaici installati sui tetti degli edifici residenziali di Milano è stato possibile arrivare a definire i seguenti punti:

- il potenziale stimato è sicuramente molto interessante, tanto che potrebbe soddisfare in ogni scenario oltre il 20% dei consumi elettrici degli edifici residenziali;
- quanto all'autosufficienza elettrica, però, sono solamente circa il 10% le sezioni censuarie in grado di produrre più energia di quanta ne consumino.

È stato quindi possibile affermare che quanto alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili il comune di Milano dovrà necessariamente rivolgersi verso l'esterno, considerando probabilmente non più il solo comune ma l'area metropolitana, in quanto gli impianti a digestione anaerobica, oltre che essere non sostenibili da un

punto di vista paesaggistico e ambientale, inciderebbero poco sulla quota di autoproduzione, mentre gli impianti fotovoltaici potrebbero arrivare al massimo ad una quota tra il 20 ed il 30% dei consumi elettrici totali.

All'interno delle analisi del potenziale di energia elettrica consumata ed energia elettrica erogabile da impianti fotovoltaici, si è condotta un'analisi anche alla scala dei tessuti urbani, dalla quale è possibile concludere che:

- gli edifici appartenenti al tessuto a densità minore (*DH*) risultano avere un bilancio di energia netta negativo, nel senso che producono più di quanto consumano, in quanto, "al di sotto" di una superficie di tetto discretamente ampia, sono costituiti da una o al massimo due utenze, quindi con consumi elettrici ridotti;
- i tessuti più centrali, nel caso in cui potessero ospitare pannelli fotovoltaici sui rispettivi tetti, avrebbero bisogno di un ridotto apporto di energia elettrica dall'esterno, in quanto sono mediamente più bassi rispetto agli edifici degli altri tessuti (*SH*, *TB* e *TUB*) quindi hanno consumi elettrici inferiori, ed una superficie disponibile solitamente maggiore;
- quanto ai restanti tessuti (*SH*, *TB* e *TUB*), la situazione è meno vantaggiosa, poichè la quota di autoproduzione è molto inferiore, attestandosi a valori tra il 20% ed il 30%.

Validazione del modello

Allo scopo di validare il modello, di valutarne, cioè, la precisione confrontandolo con dati analoghi, si sono confrontati i dati in output con due diversi dati, uno a livello quantitativo ed uno a livello qualitativo:

- i consumi medi per edificio sembrano essere, quantitativamente, ben stimati, in particolare quelli per riscaldamento, che risultano essere sì maggiori rispetto al valore medio del database CENED, il quale però si presume sottostimare tale valore, in quanto considera solo gli edifici che possiedono già una classificazione energetica;
- dal confronto con il lavoro di Doni e Keim (2010), possiamo dire che le considerazioni sui tessuti sono, a livello qualitativo, sicuramente compatibili.

Detto questo, è bene ribadire come questo modello non si prefigga di stimare esattamente a livello numerico i consumi dei singoli edifici, ma vuole invece rendere un'idea dei consumi a livello medio, delle tipologie edilizie e dei tessuti urbani più o meno energivori.

5.2 Possibili applicazioni

Alla luce delle considerazioni emerse, è possibile affermare di aver costruito un modello semplificato in grado di stimare i consumi di energia per fini termici ed elettrici allo stato attuale, di definire i potenziali risparmi massimi di energia al seguito di interventi di retrofit energetico e di stimare il potenziale di energia che è possibile produrre da fonti energetiche rinnovabili all'interno dell'area di studio, al fine di valutarne le performance energetiche del parco edifici residenziali e la rispettiva quota di energia autoprodotta da fonti rinnovabili locali.

È una metodologia replicabile su qualsiasi area di studio in presenza dei database necessari (solitamente disponibili per tutti i comuni italiani), e tuttavia piuttosto semplice e di realizzazione relativamente veloce ed economica, per cui potrebbe trovare applicazione, per esempio, all'interno delle amministrazioni pubbliche per valutare i consumi del rispettivo parco di edifici residenziali, oppure supportare professionisti del settore nella realizzazione di piani energetici alla scala urbana. La conoscenza dello stato dei consumi attuali, del loro potenziale di riduzione e del potenziale di energia da FER locali potrebbe così consentire scelte maggiormente consapevoli in termini di sostenibilità energetica, ambientale ed economica.

5.3 Limiti e prospettive di miglioramento

Come tutti i modelli di stima, anche quello oggetto di questo lavoro di tesi presenta necessariamente varie ipotesi ed assunzioni semplificative, che costituiscono i principali limiti di ogni modello; lavorando al superamento di tali limiti ed allo smussamento di tali semplificazioni è sicuramente possibile incrementarne la precisione e le applicazioni.

Il limite più importante del presente modello riguarda il grado di dettaglio e di precisione dei database che si forniscono in input alla metodologia di stima, in quanto è necessario prima di tutto superare alcuni gap dovuti principalmente alla scarsa disponibilità di dati reali, da ricondursi principalmente a database topografico e censimento ISTAT. Il database topografico è da un lato ricco di errori ed imprecisioni di tipo geometrico, mentre dall'altro è povero di informazioni riguardanti, per esempio, la tipologia edilizia o l'età degli edifici a livello puntuale. Passando al censimento ISTAT, sebbene le rispettive sezioni censuarie abbiano consentito di definire l'epoca di costruzione degli edifici, l'elevato livello di aggregazione e la successiva disaggregazione di natura statistica semplifica oltremodo l'analisi degli edifici. Pertanto i limiti principali del modello sono probabilmente da attribuirsi alla poca disponibilità di dati in input, o perlomeno alle scarse informazioni puntuali che questi possiedono.

Quanto all'integrazioni possibili, una prima ipotesi semplificativa effettuata è l'analisi del solo settore residenziale, che sarebbe da integrare anche con altri settori (commerciale, servizi, ...), al fine di rendere maggiormente completa la stima, in modo da avere una validità per l'intera area considerata, e non solo per una parte, seppur consistente, di edifici.

Oltre a considerare ulteriori tipologie di settori di edifici, si potrebbe integrare l'analisi con altre tipologie di consumi, per esempio consumi per usi culinari o consumi per raffrescamento (attualmente inclusi nei consumi elettrici), per rendere maggiormente completa la stima.

Insieme ad ulteriori settori e consumi, si potrebbero dettagliare maggiormente le tipologie edilizie considerate, in particolare per contesti come quello del comune di Milano, che presenta una grande variabilità quanto ad edifici alti, che nel presente modello sono stati attribuiti ad un'unica classe (*Blocchi di appartamenti*).

La prospettiva di miglioramento più conveniente potrebbe essere la simulazione diretta del comportamento energetico degli edifici, mediante software di simulazione come CASAnova o EnergyPlus, in quanto, attingendo i consumi "prestabiliti" dal database TABULA, non è stato possibile, per esempio, scindere la quota di consumi risparmiati dal solo efficientamento di involucro edilizio ed impiantistica dalla quota di energia fornita da FER termiche, ed inoltre sarebbe possibile addentrarsi in interessanti analisi di sensitività per valutare gli interventi maggiormente efficaci dal punto di vista del risparmio energetico, avendo maggiori margini di personalizzazione del modello.

In questo tipo di analisi sarebbe, inoltre, interessante l'integrazione del modello con informazioni riguardanti l'irraggiamento solare sugli edifici, ed in particolare i dati dell'irraggiamento delle facciate per poter considerare l'apporto energetico "passivo" derivante dai guadagni solari gratuiti all'interno dei consumi dei rispettivi edifici per riscaldamento. Questa integrazione sarebbe particolarmente utile, poi per l'analisi per tessuti urbani, in quanto tra i vari tessuti si hanno solitamente differenze importanti sotto questo punto di vista. Per esempio tessuti molto densi e relativamente alti (vedi *Traditional urban block* e *Regular urban block*) sono generalmente caratterizzati da ampie zone in ombra, e quindi con guadagni solari ridotti al minimo, mentre tessuti altrettanto densi da un punto di vista abitativo, ma meno dal punto di vista costruttivo (vedi *Tower block housing*) presentano solitamente guadagni solari maggiori, che rendono ancor più efficiente tale tipologia costruttiva. Inoltre, conoscendo oltre all'irraggiamento sugli edifici anche la geometria reale delle falde dei tetti da modello 3D da volo LIDAR, sarebbe possibile calcolare in modo più preciso la produzione "attiva" di energia elettrica da pannelli fotovoltaici e di energia termica da collettori solari termici.

BIBLIOGRAFIA

IEA (2008), *Promoting energy efficiency investments. Case studies in the residential sector*, OECD/IEA and AFD, Paris.

IEA, Energy Technology Perspective, *Pathways to a Clean Energy System*, 2012.

IEA, World Energy Outlook, 2011.

Rapporto Annuale Efficienza Energetica – 2011, ENEA, 2012.

Rapporto Energia Ambiente - 2011, ENEA, 2012

Modi V. et al., *Spatial distribution of urban building energy consumption by end use*. Energy and buildings 45 (2012): 141-151.

Swan L.G., Ugursal V.I., *Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: a review of modeling techniques*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009): 1819-1835.

Yamaguchi Y., Shimoda Y., Mizuno M., *Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management*, Energy and Buildings 39 (2007): 580–592.

Caputo P. et al., *A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale*, Energy Policy 55 (2013) 261-270

Dall'O' G., Galante A., Torri M., *A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale*. Energy and Buildings 48 (2012) 211–219.

Doni M., Keim C. (2010), *Performances energetiche della morfologia urbana: le tipologie edilizie urbane della città di Milano in rapporto al fabbisogno energetico*, XXXI Conferenza AISRE, Aosta, 20-22 September, 2010.

Jones P.J., Lannon S., Williams J., *Modeling building energy use at urban scale*, Building Simulation, 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 2001.

Fabbri K. et al., *Heritage buildings and energy performance: Mapping with GIS tools*, Energy and buildings 48 (2012) 137-145.

Reiter S., Marique A., *Toward low energy cities – A case study of the urban area of Liège, Belgium*, : Journal of Industrial Ecology, 16 (2012) 829-838.

Troglio, E., Doni, M., Haas, T.: *Urban typologies and heat energy demand. A case-study in the Italian context*. In: Proceedings of the 51st Congress of the European Regional Science Association, Barcelona, pp. 1–17 (2011)

Vettorato D., et al., *Spatial comparison of renewable energy supply and energy demand for low-carbon settlements*, Cities 28 (2011) 557-586.

Biberacher M, Gadocha S. GIS based model to optimize the utilization of renewable energy carriers and related energy flows. In: Anderssen RS, Braddock RD, Newham LTH, editors. 18th world IMACS congress and MODSIM09 International congress on modelling and simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation; 2009. p. 1915 – 1921.

Fiorese G., Guariso G., *A GIS-based approach to evaluate biomass potential from energy crops at regional scale*, Environmental Modelling & Software, 25 (2010) 702-711.

Fiorese G. et al., *Optimizing biogas production: an application to an Italian farming district*, iEMSs (International Environmental Modelling and Software Society) 2008: International Congress on Environmental Modelling and Software.

Mourmouris J.C., Potolias C., *A multi-criteria methodology for energy planning and developing renewable energy source at a regional level: A case study Thassos, Greece*, Energy Policy 52 (2013) 522-530.

Bergamasco L., Asinari P., *Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: application to Piedmont Region (Italy)*, Solar Energy 85 (2011) 1041-55.

Regione Lombardia, Sezione Territorio e Urbanistica, *Specifiche di contenuto e schema fisico di consegna del Database Topografico, versione 4.0 - marzo 2009*

ISTAT, Censimento generale della popolazione e delle abitazioni - Anno 2001

Corrado V., Ballarini I., Corgnati S.P., Talà N., *Building Typology Brochure - Italy. Fascicolo sulla tipologia edilizia italiana*, Politecnico di Torino, Torino, 2011.

MICENE, Misure dei Consumi di ENERGiA Elettrica in 110 abitazioni italiane, eERG, end-use Efficiency Research Group, Dipartimento di Energetica - Politecnico di Milano, settembre 2004.

Project EURECO, Demand-side management, end-use metering campaign in 400 households of the European Community, Assessment of the Potential Electricity Savings, January 2002.

REMODECE, Residential Monitoring to Decrease Energy Use and Carbon Emissions in Europe, IEEA Programme, Intelligent Energy Europe.

Brunori A., *Legno ed energia. Come produrre energia con le biomasse legnose*, Edagricole, 2008.

Caputo P., *Impianti a biomassa. Dal riscaldamento alla trigenerazione*, Edizioni Ambiente, Milano, 2011.

Caserini S. et al., *LCA of domestic and centralized biomass combustion: The case of Lombardy (Italy)*, Biomass and bioenergy 34 (2010), 474-482.

Paniz A., Pettenella D., *Il mercato del pellet in Italia. Da prodotto di nicchia a biocombustibile di massa?*, AIEL, 2004.

Energia dalle biomasse. Le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, i valori economici e ambientali, Consorzio per l'AREA di ricerca scientifica e tecnologica di Trieste, AREA Science Park, Padriciano (Trieste), 2006.

Ragazzoni A., *Biogas. Normative e biomasse: le condizioni per fare credito*, Edizioni L'informatore agrario, 2011.

IEA, *Technology Roadmap. Solar Heating and Cooling*, OECD/IEA, 2012.

Ferrari S., *Solare termico negli edifici. Guida al dimensionamento e alla progettazione degli impianti*, Edizioni Ambiente, Milano, 2008.

Sconamiglio A., *Fotovoltaico negli edifici. Dimensionamento, progettazione e gestione degli impianti*, Edizioni Ambiente, Milano, 2013.

Basta S., Minchio F., *Geotermia e pompe di calore. Guida pratica agli impianti di climatizzazione*, Associazione Geotermia. Org, 2008.

Caleffi, *Idraulica*, n.38, giugno 2010.

Andreolli F., *Impianti mini e micro eolici. Guida alla progettazione e realizzazione*, Dario Flaccovio Editore, 2011.

SITOGRAFIA

Sistema Informativo Regionale ENergia Ambiente (SIRENA) , 2012. <http://sirena.cestec.eu/sirena/index.jsp>

Progetto TABULA, Typology Approach for Building Stock Energy Assessment, www.building-typology.eu

CENED, Catasto Energetico Edifici Regionali (CEER), Regione Lombardia, www.cened.it

ISTAT, Istituto nazionale Statistica, www.istat.it

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, www.enea.it

International Energy Agency, www.iea.org

Intergovernmental Panel on Climate Change, www.ipcc.ch.

APPENDICE I

Il progetto TABULA

Introduzione

In quest'appendice si parlerà del progetto TABULA, grazie al quale è stato possibile attribuire ai cluster di edifici definiti i rispettivi consumi. Verrà presentata prima di tutto un'introduzione generale sui contenuti e gli obiettivi del lavoro, per poi entrare nel dettaglio della metodologia che hanno seguito i redattori per i vari step della stima. Si farà riferimento al report *TABULA - Building Typology Brochure - Italy*, a cura di Corrado, Ballarini, Corgnati e Talà, Gruppo di Ricerca *TEBE*, Politecnico di Torino – Dipartimento di Energetica, 2012.

Cos'è TABULA

Il progetto TABULA (*Typology Approach for BUiLding stock energy Assesment*), finanziato dal programma europeo *Intelligent Energy Europe*, mira a creare una struttura armonizzata delle tipologie edilizie europee, con un particolare focus sugli edifici residenziali.

Ogni tipologia nazionale è costituita da un insieme di edifici residenziali modello con tipiche caratteristiche energetiche. Ciascun edificio rappresenta un determinato periodo di costruzione e una specifica dimensione. Gli edifici-tipo vengono utilizzati in ciascun paese come mezzo per rendere nota la prestazione energetica ed i potenziali di risparmio energetico raggiungibili attraverso azioni di riqualificazione dell'involucro edilizio e degli impianti termici. Si prevedono due livelli di riqualificazione dell'edificio-tipo: una riqualificazione tipica, mediante l'applicazione di misure comunemente utilizzate all'interno del paese, ed una riqualificazione avanzata, attraverso l'introduzione di interventi che riflettono le migliori tecnologie disponibili.

Le potenzialità di risparmio energetico sono valutate utilizzando la metodologia di calcolo fornita dalle norme tecniche europee a supporto della *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD, 2002/91/CE) e confrontando la prestazione energetica prima e dopo la riqualificazione. Informazioni aggiuntive sulla frequenza delle tipologie edilizie ed impiantistiche renderanno possibile l'utilizzo della classificazione tipologica come modello per la stima della prestazione energetica del parco edilizio globale su scala nazionale.

Il progetto è rivolto agli esperti che lavorano su analisi di scenario, così come a chi prende le decisioni politiche a vari livelli (regionale, nazionale, comunitario). Anche i consulenti energetici possono utilizzare le tipologie per le fasi iniziali di una consulenza.

Definizione della tipologia edilizia

Con riferimento alla classificazione delle "tipologie edilizie, poiché il progetto di ricerca TABULA è strettamente rivolto alla valutazione e al miglioramento della prestazione energetica di edifici esistenti, il concetto tipologico si focalizza sui parametri edilizi correlati al consumo energetico. La tipologia edilizia nazionale è classificata secondo le seguenti categorie:

- regione/zona climatica;
- classe di epoca di costruzione;
- classe di dimensione edilizia.

Il territorio nazionale è caratterizzato da sei zone climatiche secondo il D.P.R. n. 412/1993 (dalla A alla F) sulla base del numero dei gradi-giorno; per la classificazione della tipologia edilizia si sono individuate tre aree climatiche che risultano dal raggruppamento di alcune zone (vedi Figura A.1.1):

- *area climatica media* che si è ipotizzata coincidente con le zona climatica E;
- *area climatica alpina* che si è ipotizzata coincidente con la zona climatica F;
- *area climatica mediterranea-costiera* che si è ipotizzata coincidente con le zone climatiche A, B, C, D.

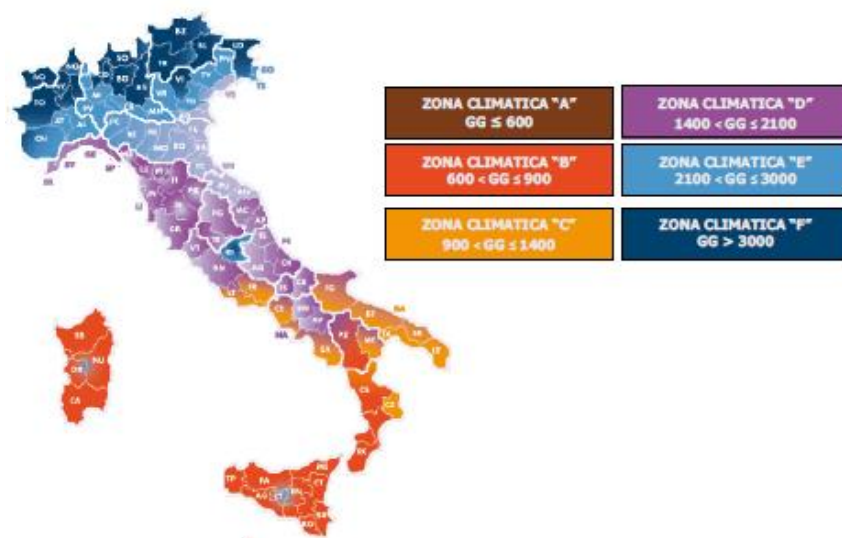


Figura A.1.1 Indicazione delle zone climatiche all'interno del territorio nazionale

Per ogni area climatica sono individuate otto classi che definiscono l'epoca di costruzione. Ciascuna classe rappresenta un determinato periodo storico che riflette specifiche tipologie dimensionali e costruttive, significative dal punto di vista energetico. Le classi di epoca di costruzione sono le seguenti:

- *classe 1*, fino al 1900, rappresentata dal diciannovesimo secolo;
- *classe 2*, dal 1901 al 1920, identificata dall'inizio del ventesimo secolo;
- *classe 3*, dal 1921 al 1945, compresa tra le due Guerre Mondiali;
- *classe 4*, dal 1946 al 1960, caratterizzata dal Dopoguerra e dalla Ricostruzione;
- *classe 5*, dal 1961 al 1975, definita dal periodo della crisi petrolifera;
- *classe 6*, dal 1976 al 1990, contraddistinta dalle prime disposizioni legislative in materia di efficienza energetica negli edifici;
- *classe 7*, dal 1991 al 2005, caratterizzata dalle più recenti regolamentazioni sulla prestazione energetica degli edifici (dalla Legge n. 10 del 1991 al Decreto Legislativo n. 192 del 2005);
- *classe 8*, dopo il 2005, rappresentata da più restrittivi requisiti di prestazione energetica richiesti alle nuove costruzioni (decreti attuativi del Decreto Legislativo n. 192 del 2005 e successive deliberazioni regionali).

Ciascuna classe di epoca di costruzione è rappresentata da classi di dimensione edilizia; esse si riferiscono a specifiche tipologie dimensionali, ovvero costruzioni caratterizzate da una specifica estensione e geometria. Si individuano le seguenti classi:

- *casa monofamiliare*, caratterizzata da un'unica unità immobiliare, su uno o due piani, di tipo isolato o confinante con un altro edificio;
- *casa a schiera*, costituita da un'unica unità immobiliare, su uno o due piani, confinante con altre unità abitative (complesso a schiera);
- *edificio multifamiliare*, edificio di ridotte dimensioni caratterizzato da un numero limitato di unità immobiliari (da 2 a 5 piani e fino a 20 appartamenti);

- *blocco di appartamenti*, edificio di grandi dimensioni caratterizzato da un numero elevato di unità immobiliari (più di 4 piani e più di 15 appartamenti).

Gli elementi che concorrono a classificare la tipologia edilizia costituiscono gli assi della cosiddetta *Matrice della Tipologia Edilizia*. Ogni area climatica è contraddistinta da una matrice ed ogni matrice è costituita da righe, che rappresentano le classi di epoca di costruzione, e da colonne, che rappresentano le classi di dimensione edilizia. Ogni cella della matrice è sede di un edificio-tipo da considerarsi rappresentativo di quella specifica condizione (area climatica/epoca di costruzione/dimensione).

La "Matrice della Tipologia Edilizia" italiana è stata sviluppata per la zona climatica E (*area climatica media*) che rappresenta 4.250 comuni italiani su un totale di 8.100 e viene presentata in Figura A.1.3.

Definizione degli "edifici-tipo"

La definizione degli edifici-tipo, appartenenti ad una specifica area climatica e utili a rappresentare una specifica dimensione edilizia all'interno di una data epoca di costruzione, avviene mediante tre diversi approcci metodologici:

- Secondo il *primo approccio*, la definizione dell'edificio rappresentativo, denominato "Example Building" (*ReEx*), si basa sulla scelta operata in base all'esperienza; l'edificio-tipo è selezionato all'interno di una dato contesto climatico come maggiormente rappresentativo di una specifica dimensionale e di un'epoca di costruzione. Questo approccio si utilizza in assenza di dati statistici attendibili.
- Il *secondo approccio* identifica l'edificio-tipo, denominato "Real Building" (*ReAv*), mediante un'analisi statistica. I dati raccolti vengono elaborati statisticamente al fine di individuare un edificio reale che abbia caratteri geometrici e costruttivi coincidenti con la media del campione di edifici analizzato.
- Il *terzo approccio* identifica l'edificio-tipo, ovvero il "Theoretical Building" (*SyAv*), come un archetipo, che è definito come "a statistical composite of the features found within a category of buildings in the stock" (ECBCS, 2004). L'archetipo non è un edificio reale, ma è un edificio virtuale, caratterizzato da un insieme di proprietà individuate statisticamente all'interno di una categoria di edifici.

Ciascuno di questi approcci può tuttavia essere applicato separatamente per definire l'edificio-tipo nelle sue proprietà geometriche (volume, rapporto di forma, ...), da un lato, e nelle sue caratteristiche costruttive e impiantistiche, dall'altro, definendo, quindi, molteplici combinazioni di classificazione possibili.

Nella Matrice delle tipologie edilizie italiana si sono utilizzate le due combinazioni della seguente figura:

		EDIFICI-TIPO (CARATTERISTICHE GEOMETRICHE)		
		Edificio reale (scelto secondo l'esperienza)	Edificio reale (scelto da analisi statistica)	Edificio teorico (scelto da analisi statistica)
TIPOLOGIE COSTRUTTIVE E IMPIANTISTICHE	Tecnologia reale presente nell'edificio reale scelto			
	Tecnologia scelta secondo l'esperienza	<i>Edifici multifamiliari e Blocchi di appartamenti (classi da 1 a 7)</i>		<i>Case monofamiliari e Case a schiera (classi da 1 a 8), Edifici multifamiliari e Blocchi di appartamenti (classe 8)</i>
	Tecnologia definita da analisi statistica			

Figura A.1.2 Schema relativo alla definizione degli edifici-tipo appartenenti all'area climatica media

per cui gli edifici-tipo all'interno della matrice per le classi di edifici multifamiliari e di blocchi di appartamenti, per le epoche da 1 a 7, sono considerati dal punto di vista geometrico degli Example Buildings (ReEx), quindi i loro principali dati tipologico-dimensionali (volume lordo riscaldato, rapporto di forma, superficie lorda di pavimento, numero di piani, numero di appartamenti) sono dati reali; le case monofamiliari e le case a schiera, per tutte le epoche di costruzione, e gli edifici multifamiliari e i blocchi di appartamenti per l'ottava epoca di costruzione (dopo il 2005), invece, i rispettivi edifici-tipo sono stati individuati geometricamente mediante l'approccio teorico, ovvero si caratterizzano come archetipi (SyAv): gli archetipi sono caratterizzati da proprietà dimensionali (volume lordo riscaldato, rapporto di forma, superficie utile di pavimento, numero di piani, numero di appartamenti) medie di un campione di edifici determinate mediante analisi statistica. In riferimento all'area climatica media, l'analisi è stata sviluppata su un campione rappresentativo di edifici della regione Piemonte di cui si posseggono i certificati energetici (database dei certificati energetici regionali).

		CLASSE DI DIMENSIONE EDILIZIA			
<i>Area climatica media</i>		CASE MONOFAMILIARI	CASE A SCHIERA	EDIFICI MULTIFAMILIARI	BLOCCHI DI APPARTAMENTI
CLASSE DI EPOCA DI COSTRUZIONE	1 Fino al 1900				
	2 1901-1920				
	3 1921-1945				
	4 1946-1960				
	5 1961-1975				
	6 1976-1990				
	7 1991-2005				
	8 Dopo il 2005				

Figura A.1.3 "Matrice della tipologia edilizia" italiana (area climatica media) con l'illustrazione degli edifici-tipo; gli archetipi sono illustrati attraverso un volumetrico semplificato, mentre degli edifici reali utilizzati come edificio-tipo si riporta la fotografia

Tipologie costruttive

Le tipologie costruttive nazionali sono individuate secondo l'esperienza con il supporto della letteratura e della normativa tecnica. Esse riguardano le tecnologie d'involucro che si considerano tipiche all'interno di un dato periodo storico. Di ciascun componente edilizio sono forniti una descrizione, il periodo di massima diffusione e il valore di trasmittanza termica per i componenti opachi e trasparenti, e la trasmittanza di energia solare totale per i componenti trasparenti.

Involucro edilizio

Per quanto riguarda l'involucro edilizio, vengono riportate le tipologie costruttive maggiormente diffuse con i rispettivi valori di trasmittanza ed il periodo di maggiore diffusione, sia per l'involucro opaco che per l'involucro trasparente. Di seguito alcune figure a titolo di esempio.




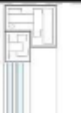
	DESCRIZIONE	IMMAGINE	PERIODO DI MAGGIORE DIFFUSIONE		U [W/(m ² K)]
Chiusura opaca superiore	Tetto a falde con struttura e tavolato in legno, basso livello di isolamento		1976	1990	0,95
Chiusura opaca verticale	Muratura di pietra intonacata (45 cm)		-	1920	2,40
	Muratura in calcestruzzo (anche prefabbricata, 30 cm), basso livello di isolamento		1976	1990	0,79
Chiusura trasparente (finestra)	Vetro-camera basso-emissivo con intercapedine d'aria o di altri gas, telaio in metallo con taglio termico		2000	-	2,4

Figura A.1.4 Presentazione di alcune tipologie costruttive per l'involucro edilizio così come sono riportate da TABULA

Tipologie impiantistiche

Le tipologie impiantistiche nazionali sono individuate secondo l'esperienza con il supporto della letteratura e della normativa tecnica. Esse riguardano le tecnologie di impianto di riscaldamento e di impianto di produzione di acqua calda sanitaria che si considerano tipiche all'interno di un dato periodo storico.

La tipologia impiantistica è definita attraverso la combinazione dei tipi di sottosistemi impiantistici (emissione/distribuzione, accumulo, generazione, ausiliari elettrici); di essi è fornita una descrizione, l'epoca caratteristica di installazione/costruzione e il valore medio del parametro prestazionale di riferimento (efficienza, perdita di energia termica, etc.). L'insieme dei tipi di sottosistemi impiantistici forniti non è da considerarsi esaustivo di tutti quelli presenti nella realtà, ma significativo per rappresentare le tecnologie più diffuse sul territorio nazionale. Ciascun tipo di sottosistema impiantistico può essere riferito separatamente ad una specifica classe di dimensione edilizia oppure a tutte le classi dimensionali. Si indica con SUH (*single-unit housing*) l'attribuzione specifica alle *case monofamiliari* e alle *case a schiera*, con MUH (*multi-unit housing*) l'attribuzione specifica agli *edifici multifamiliari* e ai *blocchi di appartamenti*, con Gen l'attribuzione a tutte le classi dimensionali indistintamente.

Essendo davvero molte le varie tipologie impiantistiche considerate, vista anche la complessità dei vari sottosistemi relativi all'energia termica (di emissione, di distribuzione, di accumulo, di generazione e relativo agli ausiliari elettrici) sia per climatizzazione invernale che per riscaldamento, si riporta a titolo di esempio alcune parti delle tabelle presentate nel report principale di TABULA, significative per dare al lettore una comprensione globale dei dati utilizzati.

Sottosistema di emissione	CLASSE DI EPOCA DI COSTRUZIONE	TIPO DI SOTTOSISTEMA DI EMISSIONE	SPECIFICHE (rif. UNI/TS 11300-2)	$\eta_{H,e}$ [-]
	1 – fino al 1900	Radiatori	parzialmente su parete esterna non isolata – carico termico medio annuo compreso tra 4 e 10 W/m ³	0,925
	2 – dal 1901 al 1920			
	3 – dal 1921 al 1945			
	4 – dal 1946 al 1960			
	5 – dal 1961 al 1975			
6 – dal 1976 al 1990	Radiatori	parzialmente su parete esterna isolata – carico termico medio annuo compreso tra 4 e 10 W/m ³	0,945	
7 – dal 1991 al 2005	Pannelli radianti	annegati a pavimento – carico termico medio annuo compreso tra 4 e 10 W/m ³	0,960	
8 – dopo il 2005	Pannelli radianti	isolati/annegati – inferiore a 4 W/m ³	0,98-0,99	

Sottosistema di distribuzione	CAMPO DI APPLICAZIONE	DESCRIZIONE	PERIODO	$\eta_{H,d}$ [-]				
				numero piani				
				1	2	3	4	≥ 5
MUH	Distribuzione centralizzata a colonne montanti verticali, collegamenti orizzontali in ambienti non riscaldati (es. cantina o terreno)	-	1960	-	0,876	0,889	0,901	0,913
		1961	1976	-	0,901	0,913	0,913	0,925
		1977	1993	-	0,913	0,927	0,938	0,943
		1994	2005	-	0,925	0,939	0,949	0,955
		2005	-	-	0,947	0,958	0,969	0,980

Sottosistema di accumulo	CAMPO DI APPLICAZIONE	DESCRIZIONE		PERIODO	$Q_{h,H,s}$ [kWh/m ²]	
		Tipo di accumulo	Livello di isolamento			
		MUH	Serbatoio di accumulo di acqua calda per riscaldamento centralizzato			basso
			medio	-	-	2,2
			alto	-	-	0,8

Sottosistema di generazione	CAMPO DI APPLICAZIONE	DESCRIZIONE		VETTORE ENERGETICO	PERIODO	PARAMETRO PRESTAZIONALE					
		Tipo di generatore	Ubicazione			$\eta_{H,gn}$ [-]					
		SUH	caldaia standard, bruciatore atmosferico, camino < 10 m				ambiente non climatizzato	gas	-	1995	0,73
									1996	-	0,79
									-	1995	0,82
1996	-			0,88							
		ambiente climatizzato									

Sottosistema relativo agli ausiliari elettrici	CAMPO DI APPLICAZIONE	DESCRIZIONE	PERIODO		$Q_{aux,H}$ [kWh/m ²]			
			MUH	Pompa di circolazione per impianto centralizzato - ausiliario elettrico per caldaia con bruciatore ad aria soffiata		-	-	2,6
			MUH	Pompa di circolazione per impianto centralizzato - ausiliario elettrico per caldaia a condensazione		1990	-	2,6

Figura A.1.5 Tabelle esemplificative delle varie tipologie impiantistiche relative al riscaldamento

Stima dei consumi in scenari di efficientamento energetico

In riferimento alle misure di riqualificazione energetica da applicarsi agli edifici-tipo per migliorare la loro prestazione energetica, si considerano separatamente interventi sull'involucro edilizio e interventi sull'impianto termico (riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria). Tali misure di riqualificazione sono valutate su due livelli:

- riqualificazione standard, volta all'applicazione di misure di intervento comunemente utilizzate sul territorio italiano
- riqualificazione avanzata, che prevede l'introduzione di interventi che riflettono le migliori tecnologie disponibili (scenario BAT, *Best Available Technologies*)

In questi due scenari, per ogni tipologia edilizia e per ogni classe d'età, vengono proposte delle misure di riduzione dei consumi di energia termica unite a proposte per l'efficientamento degli impianti di produzione; perciò questi possono definirsi come scenari di riduzione integrata della domanda, che lavora infatti sia a livello di riduzione globale dei consumi, agendo sull'involucro edilizio, sia a livello di incremento dell'efficienza, riducendo il consumo di energia primaria per kWh termico utile, agendo sull'impiantistica.

Le misure adottate per l'involucro edilizio sono volte all'utilizzo di materiali maggiormente efficienti dal punto di vista dell'isolamento termico, caratterizzati, cioè, da valori di trasmittanza termica (U [W/mq*K]) minori, sia per l'involucro opaco (tetto, pareti, pavimenti) che per l'involucro trasparente (porte e finestre). Si considera di rispettare un valore limite di trasmittanza termica dei componenti d'involucro edilizio, attraverso l'applicazione

dei requisiti minimi di prestazione energetica richiesti dalla recente legislazione in materia di efficienza energetica in edilizia. La scelta è rivolta all'applicazione della D.G.R. n. 46-11968 (4 agosto 2009) della Regione Piemonte che individua valori limite di trasmittanza termica più restrittivi rispetto al D. Lgs. n. 311/2006 a livello nazionale. Considerando un livello *standard* di riqualificazione si ipotizza di conseguire, a seguito dell'intervento di coibentazione termica, i seguenti valori di trasmittanza termica delle strutture edilizie:

- chiusure opache verticali: $U = 0,33 \text{ W/mq}\cdot\text{K}$
- chiusure opache orizzontali e inclinate: $U = 0,30 \text{ W/mq}\cdot\text{K}$
- chiusure trasparenti: $U = 2,00 \text{ W/mq}\cdot\text{K}$.

Considerando, invece, un livello *avanzato* di riqualificazione si ipotizza di conseguire, a seguito dell'intervento di coibentazione termica, i seguenti valori di trasmittanza termica delle strutture edilizie:

- chiusure opache verticali: $U = 0,25 \text{ W/mq}\cdot\text{K}$;
- chiusure opache orizzontali e inclinate: $U = 0,23 \text{ W/mq}\cdot\text{K}$;
- chiusure trasparenti: $U = 1,70 \text{ W/mq}\cdot\text{K}$.

Per quanto riguarda l'efficientamento impiantistico, gli interventi di riqualificazione energetica sono rivolti separatamente all'impianto di riscaldamento e a quello di acqua calda sanitaria. Per quanto riguarda la riqualificazione dell'impianto di riscaldamento, sia *standard* che *avanzata*, si ipotizzano i seguenti interventi:

- sostituzione dei radiatori con pannelli radianti;
- coibentazione della rete di distribuzione del fluido termovettore;
- sostituzione o eventuale nuova installazione di un accumulo termico (alto livello di isolamento);
- intervento di trasformazione dell'impianto di riscaldamento da autonomo a centralizzato.

Per quanto riguarda la riqualificazione *standard* dell'impianto di riscaldamento, si ipotizza inoltre il seguente intervento:

sostituzione del generatore di calore tradizionale con:

- caldaia a condensazione,
- collegamento alla rete di teleriscaldamento,
- pompa di calore aria-acqua.

Per quanto riguarda la riqualificazione *avanzata* dell'impianto di riscaldamento, si ipotizza invece il seguente intervento:

sostituzione del generatore di calore tradizionale con:

- pompa di calore geotermica,
- pompa di calore geotermica in associazione all'impianto solare termico,
- caldaia a condensazione in associazione all'impianto solare termico,
- pompa di calore ad aria in associazione all'impianto solare termico.

Per quanto riguarda la riqualificazione dell'impianto di acqua calda sanitaria, sia *standard* che *avanzata*, si ipotizzano i seguenti interventi:

- coibentazione della rete di distribuzione dell'acqua calda;
- sostituzione o eventuale nuova installazione di un accumulo termico (alto livello di isolamento);
- in alcuni casi, intervento di trasformazione dell'impianto di produzione di acqua calda sanitaria da autonomo a centralizzato.

Per quanto riguarda la riqualificazione *standard* dell'impianto di acqua calda sanitaria, si ipotizza inoltre il seguente intervento:

sostituzione del generatore di calore tradizionale con:

- caldaia a condensazione (produzione di ACS individuale per appartamento);
- caldaia a condensazione (produzione di ACS centralizzata);
- impianto solare termico e bollitori elettrici ausiliari ad accumulo (individuali);
- pompa di calore aria-acqua.

Per quanto riguarda la riqualificazione *avanzata* dell'impianto di acqua calda sanitaria, si ipotizza invece il seguente intervento:

sostituzione del generatore di calore tradizionale con:

- pompa di calore geotermica, oppure
- pompa di calore geotermica in associazione all'impianto solare termico, oppure
- caldaia a condensazione in associazione all'impianto solare termico.

Determinazione della prestazione energetica

Di ciascun edificio-tipo rappresentato all'interno della "Matrice della Tipologia Edilizia" per l'*area climatica media* viene determinata la prestazione energetica in termini di fabbisogno annuo di energia primaria per il riscaldamento e per la produzione di acqua calda sanitaria. All'edificio-tipo, geometricamente definito, è associata una tipologia costruttiva (componenti d'involucro opaco e trasparente) e una tipologia impiantistica (sottosistemi degli impianti di riscaldamento e acqua calda sanitaria), coerentemente con l'epoca di costruzione e la classe dimensionale. Inoltre, si ipotizza di applicare all'edificio una riqualificazione standard e una riqualificazione avanzata dell'involucro e degli impianti e si determina la prestazione energetica conseguente agli interventi. Le riqualificazioni non vengono applicate agli edifici appartenenti all'ottava classe di epoca di costruzione (costruiti dopo il 2005). La prestazione energetica viene determinata applicando la procedura di calcolo della serie delle specifiche tecniche UNI/TS 11300, in particolare, la parte 1 per il calcolo del fabbisogno di energia netta per il riscaldamento e la parte 2 per il calcolo del fabbisogno di energia netta per l'acqua calda sanitaria e l'energia primaria per il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria.

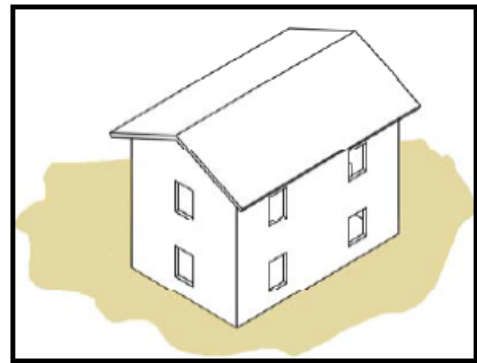
Schede illustrative degli edifici tipo

I risultati di TABULA vengono riassuntivi per ogni edificio-tipo in apposite schede riassuntive, in cui vengono presentate le seguenti informazioni:

- informazioni generali sull'edificio-tipo (area climatica, epoca di costruzione, dati geometrici significativi, ...),
- le caratteristiche dell'edificio-tipo nel suo stato originario (tipologie costruttiva ed impiantistica),
- le indicazioni delle misure di riqualificazione standard e avanzata (misure di riqualificazione sull'involucro e sugli impianti)
- i risultati del calcolo della prestazione energetica degli edifici-tipo nello stato originario e con l'applicazione delle misure di riqualificazione.

Riportiamo qui di seguito una scheda tipo di TABULA a titolo esemplificativo.

Regione/Zona climatica: **Area climatica media**
 Classe di epoca di costruzione: **3 (1921-1945)**
 Classe di dimensione edilizia: **Casa monofamiliare**



V [m ³]	S/V [m ⁻¹]	A _{f,n} [m ²]	Numero di appartamenti	Numero di piani climatizzati
455	0,81	116	1	2

STATO ORIGINARIO

TIPOLOGIA COSTRUTTIVA

COPERTURA	PARETE	SOLAIO (inferiore, su terreno)	SERRAMENTI
			
Tetto a falde con struttura e tavolato in legno	Muratura in mattoni pieni (38 cm)	Basamento in calcestruzzo su terreno	1. Vetro singolo, telaio in legno 2. Porta in legno

COPERTURA	PARETE	SOLAIO (inferiore)	SERRAMENTI			
U [W/(m ² K)]	U [W/(m ² K)]	U [W/(m ² K)]	U_1 [W/(m ² K)]	$g_{d,n1}$ [-]	U_2 [W/(m ² K)]	$g_{d,n2}$ [-]
1,80	1,48	2,00	4,90	0,85	3,00	-

TIPOLOGIA IMPIANTISTICA

IMPIANTO DI RISCALDAMENTO

GENERAZIONE	$\eta_{H,gn} = 0,85$	ACCUMULO	$Q_{ls,H,s} = 0$ kWh/m ²	DISTRIBUZIONE	$\eta_{H,d} = 0,81$	AUSILIARIO	$Q_{aux,H} = 4,4$ kWh/m ²
caldaia standard a gas, bruciatore ad aria soffiata, installata in centrale termica, antecedente al 1996	-	-	-	distribuzione centralizzata a colonne montanti verticali, collegamenti orizzontali in ambienti non riscaldati (es. cantina o terreno) / fino al 1960	-	pompa di circolazione per impianto centralizzato - ausiliario elettrico per caldaia con bruciatore ad aria soffiata	-

IMPIANTO DI PRODUZIONE DI ACQUA CALDA SANITARIA

GENERAZIONE	$\eta_{W,gn} = 0,77$	ACCUMULO	$Q_{ls,W,s} = 0$ kWh/m ²	DISTRIBUZIONE	$Q_{ls,W,d} = 0,99$ kWh/m ²	AUSILIARIO	$Q_{aux,W} = 0$ kWh/m ²
caldaia standard a gas per la produzione istantanea di acqua calda sanitaria, a camera aperta senza pilota permanente	-	-	-	distribuzione di ACS senza ricircolo, rete affacciata all'interno - fino al 1975	-	produzione di ACS per appartamento o separata/individuale	-

RIQUALIFICAZIONE STANDARD

INTERVENTI SULL'INVOLUCRO

ELEMENTO	U_{ex} W/(m ² K)	U_{new} W/(m ² K)	TIPO DI INTERVENTO
COPERTURA	1,80	0,30	Inserimento isolante (11 cm)
PARETE	1,48	0,33	Inserimento isolante (9 cm)
SOLAIO (inferiore)	2,00	0,30	Inserimento isolante (11 cm)
SERRAMENTI	4,90 ($g_{v,n}$ 0,85) 3,00	2,00 ($g_{v,n}$ 0,67) 2,00	Sostituzione

INTERVENTI SUGLI IMPIANTI

RISCALDAMENTO

GENERAZIONE COP = 2,50	ACCUMULO $Q_{k,Hs} = 1,4$ kWh/m ²	DISTRIBUZIONE $\eta_{Hd} = 0,93$	AUSILIARIO $Q_{aux,H} = 2,7$ kWh/m ²
pompa di calore ad aria	serbatoio di accumulo di acqua calda per riscaldamento - alto livello di isolamento	distribuzione centralizzata a colonne montanti verticali, collegamenti orizzontali in ambienti non riscaldati (es. cantina o terreno) / livello di isolamento elevato	pompa di circolazione per impianto centralizzato

ACQUA CALDA SANITARIA

GENERAZIONE $\eta_{Wp} = 0,90$	ACCUMULO $Q_{k,Ws} = 0$ kWh/m ²	DISTRIBUZIONE $Q_{k,Wd} = 0,66$ kWh/m ²	AUSILIARIO $Q_{aux,W} = 0$ kWh/m ²
caldaia a condensazione a gas per la produzione di acqua calda sanitaria	-	distribuzione di ACS senza ricircolo, rete affacciata all'interno - dopo il 1975	produzione di ACS per appartamento o separata/individuale

RIQUALIFICAZIONE AVANZATA

INTERVENTI SULL'INVOLUCRO

ELEMENTO	U_{ex} W/(m ² K)	U_{new} W/(m ² K)	TIPO DI INTERVENTO
COPERTURA	1,80	0,23	Inserimento isolante (15 cm)
PARETE	1,48	0,25	Inserimento isolante (13 cm)
SOLAIO (inferiore)	2,00	0,23	Inserimento isolante (15 cm)
SERRAMENTI	4,90 ($g_{v,n}$ 0,85) 3,00	1,70 ($g_{v,n}$ 0,5) 1,70	Sostituzione

INTERVENTI SUGLI IMPIANTI

RISCALDAMENTO

GENERAZIONE COP _{PR} = 3	ACCUMULO $Q_{k,Hs} = 1,4$ kWh/m ²	DISTRIBUZIONE $\eta_{Hd} = 0,94$	AUSILIARIO $Q_{aux,H} = 2,7$ kWh/m ²
solare termico (20%)	serbatoio di accumulo di acqua calda per riscaldamento - alto livello di isolamento	distribuzione centralizzata a colonne montanti verticali, collegamenti orizzontali in ambienti non riscaldati (es. cantina o terreno) / livello di isolamento elevato	pompa di circolazione per impianto centralizzato
pompa di calore geotermica (80%)			

ACQUA CALDA SANITARIA

GENERAZIONE COP _{PR} = 3	ACCUMULO $Q_{k,Ws} = 3,6$ kWh/m ²	DISTRIBUZIONE $Q_{k,Wd} = 2,4$ kWh/m ²	AUSILIARIO $Q_{aux,W} = 4,1$ kWh/m ²
solare termico (60%)	serbatoio di accumulo di acqua calda, in ambiente non climatizzato - alto livello di isolamento	distribuzione di ACS con ricircolo, porzione di rete affacciata all'esterno, dopo il 1991	produzione di ACS centralizzata con impianto solare termico, con pompa di circolazione
pompa di calore geotermica (40%)			

PRESTAZIONE ENERGETICA

Stato originario (SO)

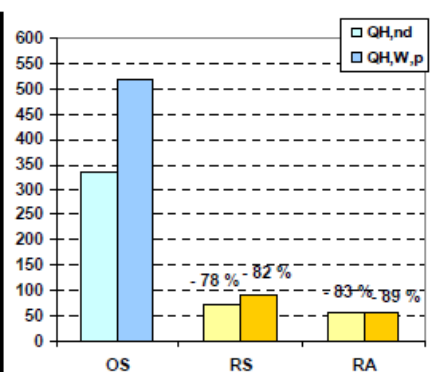
$Q_{H,nd}$ [kWh/m ²]	335
$Q_{W,nd}$ [kWh/m ²]	15,6
$Q_{H,p}$ [kWh/m ²]	496
$Q_{W,p}$ [kWh/m ²]	21,6
$Q_{H,W,p}$ [kWh/m ²]	518

Riqualificazione standard (RS)

$Q_{H,nd}$ [kWh/m ²]	72,3
$Q_{W,nd}$ [kWh/m ²]	15,6
$Q_{H,p}$ [kWh/m ²]	74,7
$Q_{W,p}$ [kWh/m ²]	18,1
$Q_{H,W,p}$ [kWh/m ²]	92,8

Riqualificazione avanzata (RA)

$Q_{H,nd}$ [kWh/m ²]	55,7
$Q_{W,nd}$ [kWh/m ²]	15,6
$Q_{H,p}$ [kWh/m ²]	41,0
$Q_{W,p}$ [kWh/m ²]	15,2
$Q_{H,W,p}$ [kWh/m ²]	56,2



APPENDICE II

Cenni teorici sugli impianti a FER considerati

Produzione di energia da biomasse

Definizione di biomassa

Con il termine biomassa si intende una quantità ampia ed eterogenea di materiali di natura organica, di origine vegetale o animale. Essa viene definita dal decreto legislativo del 29 Dicembre 2003, n.387 come “la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall’agricoltura (comprendente sostanze vegetali ed animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali ed urbani”. Rientrano quindi nella definizione le seguenti categorie di materiali:

- colture energetiche dedicate sia arboree che erbacee (per esempio Short e Medium Rotation Forestry, SRF e MRF);
- residui forestali, legna da ardere, sfalci, patate e altri prodotti lignocellulosici puri;
- residui agricoli e agroindustriali (per esempio paglia, sansa di oliva, gusci di frutta secca, stocchi di mais, lolla di riso, sottoprodotti dell’industria conserviera, ecc.);
- residui dell’industria (per esempio residui agroalimentari, fibre tessili, mobili, ecc.);
- prodotti organici derivanti dall’attività biologica di uomo e animali, inclusi gas, reflui e frazioni organiche di RSU.

Nel seguente schema di Figura A.2.6 sono stati riassunti vantaggi e svantaggi dell’utilizzo delle biomasse per la produzione di energia:



Figura A.2.6 Vantaggi e svantaggi delle biomasse come fonte di energia rinnovabile

Tecnologie di conversione energetica della biomassa

La conversione energetica delle biomasse viene condotta attraverso due differenti processi: *termochimici* e *biochimici*.

I primi permettono di ottenere energia sfruttando l’azione del calore, che trasforma la biomassa di partenza o direttamente in energia termica, attraverso un comune processo di combustione, o in altri prodotti (solidi, liquidi

o gassosi), successivamente impiegabili come biocombustibili. Sono utilizzabili quelle biomasse di natura ligno-cellulosica in cui il rapporto carbonio su azoto (C/N) abbia valori superiori a 30 e il contenuto di umidità non superi il 30%. Le biomasse più adatte a subire tali processi sono la legna e tutti i suoi derivati (segatura, trucioli, ecc.), i più comuni sottoprodotti colturali di tipo ligno-cellulosico (paglia di cereali, residui di potatura della vite e dei fruttiferi, ecc.) e alcuni scarti di lavorazione (lolla, pula, gusci, noccioli, ecc.). Sono compresi in questa categoria impianti di combustione, gassificazione, pirolisi, e loro combinazioni.

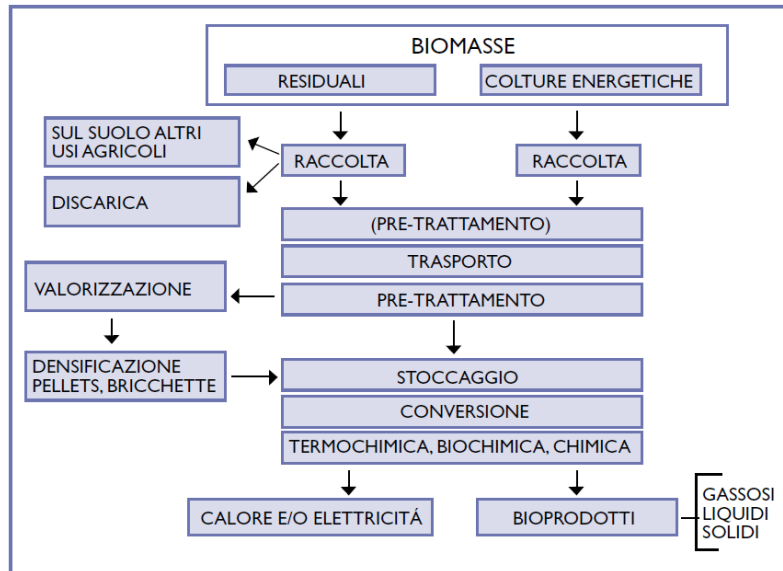


Figura A.2.7 Filiera delle biomasse dalla raccolta alla trasformazione (fonte: Energia dalle biomasse, AREA Science Park)

I processi di conversione biochimica permettono, invece, di ottenere energia grazie alle reazioni chimiche dovute al contributo di enzimi, funghi e micro-organismi, che si formano nella biomassa sotto particolari condizioni, e vengono impiegati per quelle biomasse in cui il rapporto C/N sia inferiore a 30 e l'umidità superiore al 30%. Risultano idonei alla conversione biochimica le colture acquatiche, alcuni sottoprodotti colturali ma anche vere e proprie colture energetiche dedicate, i reflui zootecnici ed alcuni scarti di lavorazione, nonché alcune tipologie di reflui urbani ed industriali. Rientrano in questa tipologia gli impianti a biogas.

Ai fini del presente lavoro, verranno considerati gli impianti a combustione tra quelli a processo termochimico e gli impianti a digestione anaerobica (a biogas) tra i secondi. Qui di seguito una loro breve illustrazione.

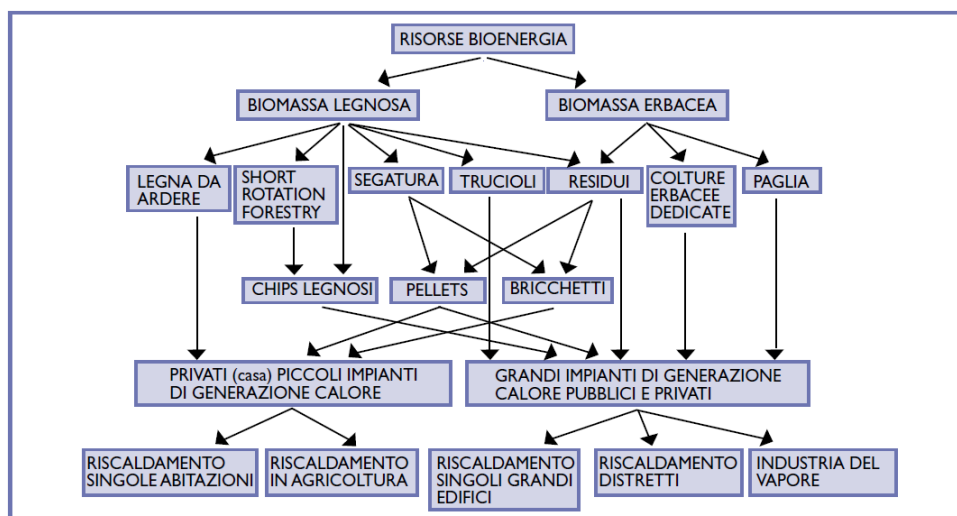


Figura A.2.8 Possibili e praticabili percorsi tecnologici delle biomasse lignocellulosiche finalizzati alla generazione di energia (fonte: Energia dalle biomasse, AREA Science Park)

Impianti di combustione a biomassa

La combustione costituisce il processo di conversione termochimica della biomassa più semplice e tecnologicamente più maturo e consolidato ai fini della generazione termica ed elettrica. Il processo implica una reazione chimica esotermica di rapida ossidazione, in eccesso di ossigeno. La combustione della biomassa può avvenire in dispositivi molto semplici e tradizionali come camini e stufe a legna, o mediante dispositivi più sofisticati e potenti, come caldaie, forni a griglia (fissa, mobile, inclinata, ecc.), a cono, a tamburo rotante e a letto fluido.

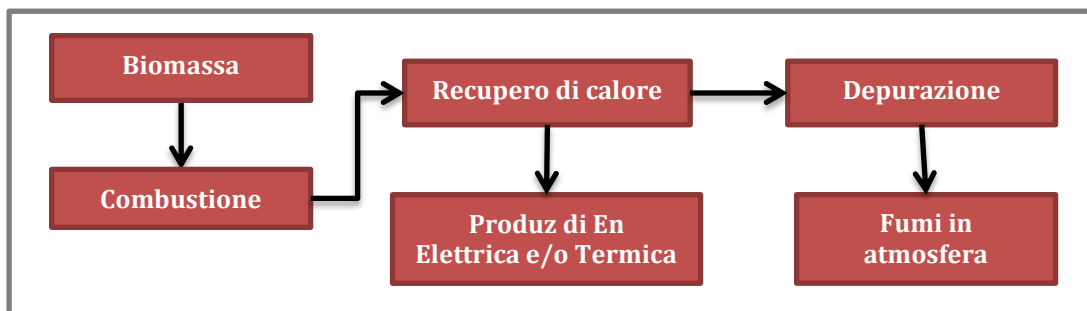


Figura A.2.9 Schema semplificato del processo di combustione con produzione di elettricità e/o calore

Come detto, il principale impiego delle biomasse di origine agricola e forestale è sotto forma solida, a valle di trattamenti di tipo meccanico. Per arrivare ad ottenere un materiale di partenza sufficientemente omogeneo e secco, in modo tale che sia idoneo al processo di conversione previsto, sono possibili diversi trattamenti, tra i più comuni:

- legna da ardere in ciocchi e tronchetti;
- legno sminuzzato (cippato);
- pastiglie di legno macinato e pressato (pellet).

In questo lavoro verranno considerati impianti atti alla combustione di cippato e pellet.

Per cippato si intende la biomassa ridotta in scaglie omogenee di piccole dimensioni (*chips*), mediante il processo di cippatura, applicata indifferentemente a biomassa legnose o erbacee, provenienti sia da colture dedicate (e.g. SRF, miscanto, ecc.), che da residui agroforestali (sfalci, potature, ecc.), che da scarti dell'industria del legname.

Per pellet si intende, invece, un biocombustibile densificato, di forma cilindrica (tipicamente 6-10 per 10-20 mm), ottenuto comprimendo biomassa polverizzata. Come si vede dalla Figura A.2.10, le materie prime utilizzate sono quasi interamente scarti della lavorazione del legno, impiegando quindi in misura estremamente contenuta se non nulla colture appositamente dedicate.

Sia pellet che cippato vengono sempre più spesso preferiti alla legna da ardere data la maggiore praticità della pezzatura piccola ed omogenea, che oltretutto permette un elevato grado di automazione degli impianti.

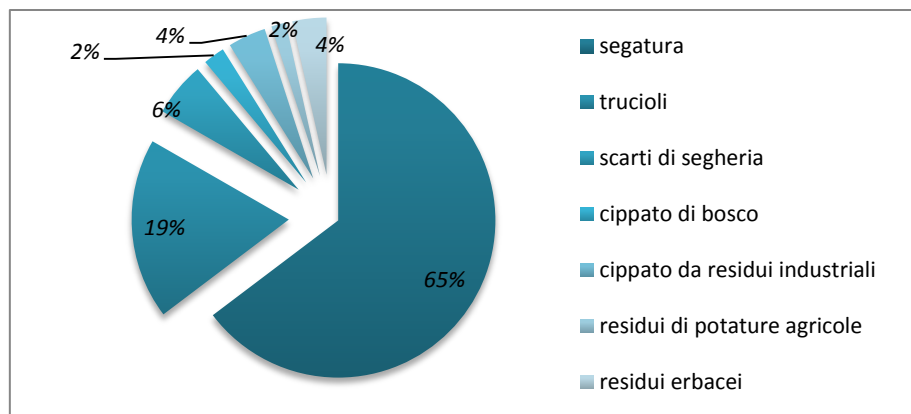


Figura A.2.10 Percentuale relativa alle varie tipologie di materia prima sul totale del materiale pellettizzato da imprese italiane (fonte: Il mercato del pellet in Italia, AIEL, 2005)

Tabella A.2.1 Confronto tra le specifiche tecniche di pellet e cippato considerate nei calcoli (fonte: Brunori, Legno ed energia)

	Pellet di legno	Chip di legno
Potere calorifico netto	17,0 GJ/t	13,4 GJ/t
	4,7 kWh/kg	3,7 kWh/kg
	3080 kWh/mc	750 kWh/mc
Contenuto d'acqua (%peso t.q.)	8%	25%
Densità	650 kg/mc	200 kg/mc
Contenuto ceneri (%peso t.q.)	0,5%	1%

<p>PELLET</p> <ul style="list-style-type: none"> • Semplicità di stoccaggio • Elevata automazione e ridotta necessità di operazioni di pulizia e manutenzione degli impianti • Facilità di approvvigionamento per il consumatore • Combustibile proveniente generalmente da residui di segheria e materiali di scarto • Affidabilità della combustione grazie all'elevata omogeneità del prodotto • Combustibile economico (costo in €/MJ inferiore rispetto combustibili fossili) <p>CIPPATO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caricamento completamente automatizzato • Prezzo più basso rispetto altri combustibili legnosi • Combustibile proveniente in buone percentuali da residui di segheria • Valorizzazione del patrimonio boschivo tramite manutenzione necessaria qualora si usi cippato di bosco 	+	<p>PELLET</p> <ul style="list-style-type: none"> • Emissioni inquinanti non sempre inferiori rispetto ai combustibili fossili • Scarse informazioni sulla filiera produttiva, non sempre <i>locale</i> • Produzione necessita elevato dispendio energetico • Prezzi più elevati rispetto a quelli degli altri combustibili legnosi <p>CIPPATO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Necessità di spazi dedicati allo stoccaggio • Maggiore necessità di operazioni di pulizia e smaltimento delle ceneri • Filiera di approvvigionamento più complessa (non esistono aziende che producono cippato come avviene invece per il pellet)
---	---	---

Figura A.2.11 Confronto tra vantaggi e svantaggi dell'uso di pellet o cippato come combustibili

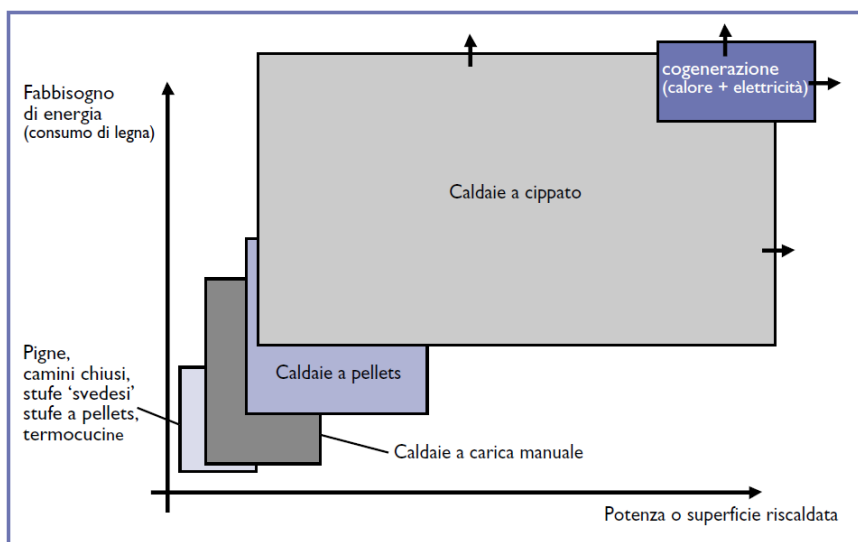


Figura A.2.12 Campi di applicazione delle tecnologie di combustione della biomassa lignocellulosica
(fonte: Energia dalle biomasse, AREA Science Park)

Tabella A.2.2 Tabella riassuntiva delle caratteristiche degli impianti a piccola e media taglia qui considerati
(fonte: Caputo, Impianti a biomassa)

	Stufa a pellet	Caldaia a pellet	Caldaia a cippato
<i>Applicazione principale</i>	Riscaldamento ambienti	Riscaldamento ambienti e produzione di ACS	Riscaldamento ambienti e produzione di ACS
<i>Luogo di installazione</i>	Luoghi maggiormente vissuti	Locale caldaia	Locale caldaia
<i>Area riscaldata</i>	Locale in cui è collocata e/o locali adiacenti	Edificio	Edificio, rete di teleriscaldamento
<i>Modalità di scambio termico</i>	Irraggiamento e/o convezione	Scambio termico con fluido vettore (acqua)	Scambio termico con fluido vettore (acqua)
<i>Range di potenza</i>	3 - 11 kW	3 - 35 kW	35 - 500 kW (edificio) 0.5 - 5 MW (teleriscald.)
<i>Rendimento</i>	80 - 90 %	80 - 85 %	75 - 85 %

In questo lavoro sono stati considerati sia impianti di combustione per la produzione di energia termica che impianti di cogenerazione, in grado, cioè, di produrre allo stesso tempo energia termica ed elettrica. Questi verranno illustrati qui di seguito seguendo una logica di potenza, e quindi di fabbisogno termico soddisfabile crescente.

Stufa a pellet

La stufa a pellet è la prima tipologia impiantistica presa in considerazione in questo lavoro. Essa è in grado di soddisfare il fabbisogno di riscaldamento invernale sia di un singolo locale, che di un'intera abitazione, se ben isolata termicamente e non eccessivamente ampia, mediante semplici sistemi di ventilazione del calore. Funziona in un range di potenze di 3-11 kW, e può raggiungere rendimenti che sfiorano il 90%.

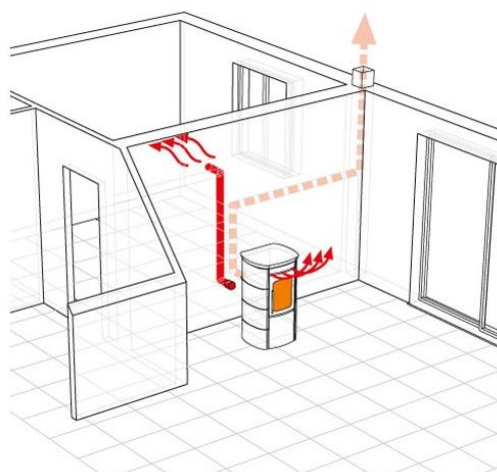


Figura A.2.13 Funzionamento di una stufa a pellet, in grado di riscaldare il locale in cui è posizionata, ma anche locali adiacenti mediante sistemi di ventilazione

Caldaia a pellet

Impianto in grado di soddisfare la domanda di calore ed acqua calda sanitaria di case monofamiliari, bifamiliari o di piccoli condomini, fino ad edifici di dimensioni maggiori, sempre se ben isolati termicamente. Esattamente come le classiche caldaie a combustibili fossili, il calore viene distribuito per via idraulica. I rendimenti sono simili a quelli delle stufe a pellet, mentre la potenza varia tra 5 e 35 kW. Questo tipo di impianti necessita di un locale appositamente dedicato, e possono essere alimentati in automatico.

<ul style="list-style-type: none"> • Efficienze elevate • Praticità dell'uso del combustibile • Discreto range di potenze • Possibilità di integrazione con sistemi di distribuzione del calore tradizionali • Ridotti costi di manutenzione 	+	<ul style="list-style-type: none"> • Emissioni inquinanti non sempre inferiori rispetto ai combustibili fossili • Necessità di pulizia periodica • Difficoltà nel monitoraggio delle emissioni (rispetto a impianti di dimensioni maggiori)
---	---	--

Figura A.2.14 Vantaggi e svantaggi di stufe e caldaie a pellet come fonte di energia termica

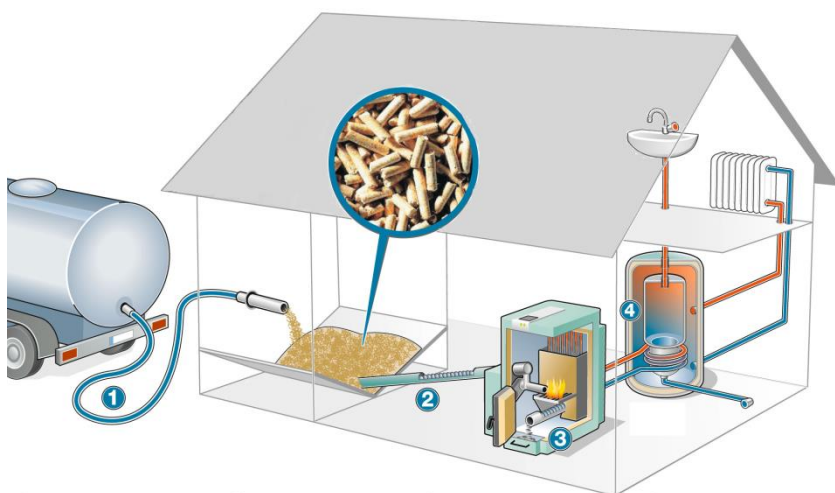


Figura A.2.15 Schematizzazione di un impianto a caldaia a pellet (3), con ricarica tramite cisterna 1/2 volte l'anno (1), approvvigionamento automatico della caldaia (2), e distribuzione per via idraulica del calore da una caldaia (4)

Caldaia a cippato

Sono generatori di piccola e media potenza, in grado di fornire sia calore che acqua calda sanitaria, impiegabili sia per l'uso domestico (anche a livello condominiale) che per piccole reti di teleriscaldamento, con potenze che variano quindi dai 35 kW fino anche ai 2-3 MW. Le caldaie a cippato presentano diverse caratteristiche analoghe a quelle a pellet, ma essendo alimentate con un combustibile meno denso e meno omogeneo, sono generalmente più robuste e più grandi, necessitando quindi di locali appositamente dedicati, anche per il deposito del combustibile.

<ul style="list-style-type: none">• Efficienze elevate• Elevata automazione impianti• Ampio range di potenze (dal piccolo condominio alla rete di teleriscaldamento) <p>CON RETE DI TELERISCALDAMENTO:</p> <ul style="list-style-type: none">• Maggiore controllo delle emissioni grazie alla centralità del sistema• Elevati confort e praticità per le utenze		<ul style="list-style-type: none">• Ampii spazi per stoccaggio del cippato• Maggiore necessità di operazioni di pulizia e smaltimento ceneri rispetto a sistemi a pellet• Costo degli impianti ancora elevato <p>CON RETE DI TELERISCALDAMENTO:</p> <ul style="list-style-type: none">• Elevati costi (in particolare per la rete)• Sistemi impiantistici piuttosto complessi
---	---	---

Figura A.2.16 Vantaggi e svantaggi di caldaie a cippato come fonte di energia termica

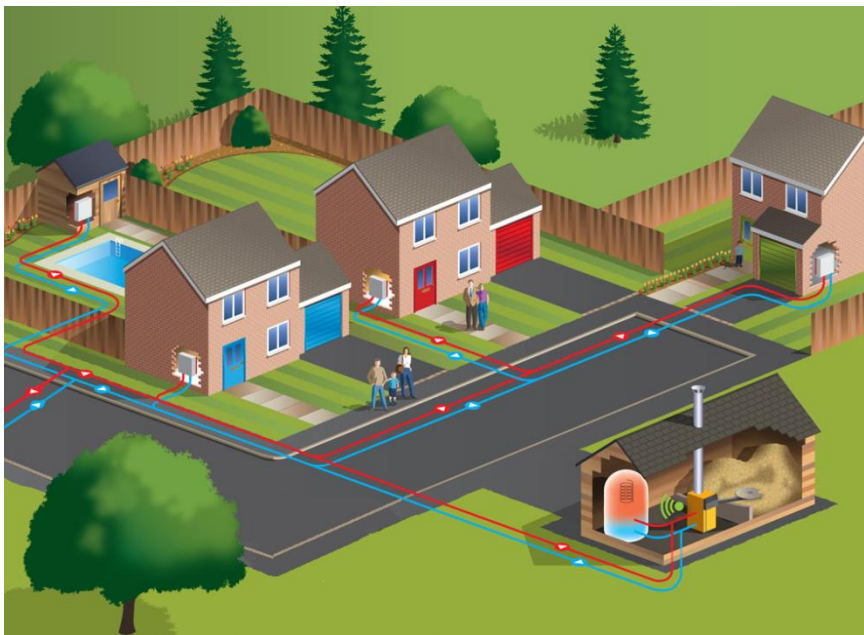


Figura A.2.17 Schematizzazione qualitativa di una piccola rete di teleriscaldamento servita da una caldaia a cippato

Impianto di cogenerazione a biomassa

La cogenerazione unisce in un unico impianto la produzione di energia elettrica e calore, sfruttando in maniera ottimale l'energia primaria del combustibile: dopo che l'energia a temperatura più alta viene convertita in energia pregiata (elettrica), la parte residuale di energia a temperatura più bassa, anziché essere dissipata nell'ambiente, viene resa disponibile per le tipiche applicazioni termiche. La cogenerazione trova applicazione sia in ambito civile che industriale. Per quanto concerne il calore, esso può essere utilizzato sotto forma di vapore o acqua calda. Per quanto riguarda, invece, l'energia elettrica, grazie all'ampia diffusione delle reti di distribuzione non sussistono particolari problematiche. È invece opportuno sottolineare che per poter utilizzare l'energia termica prodotta è necessario che gli impianti di cogenerazione siano posti nelle vicinanze delle utenze termiche, cui il calore viene veicolato tramite teleriscaldamento. Per gli scopi di questo lavoro, si sono

considerati impianti con potenze al massimo di pochi MW, con rendimenti complessivi tra il 70% e l'85% (fino a superare il 90% con alcuni impianti a ciclo Rankine organico - ORC).

Tabella A.2.3 Tabella riassuntiva delle caratteristiche generali degli impianti a cogenerazione (fonte: Caputo, Impianti a biomassa)

	Motori a combustione interna	Turbina a gas	Turbina a vapore	Turbina ORC
Range di potenza (MWel)	0,03 - 5	1 - 500 (0,01 - 2 microturbine)	0,2 - 250	0,4 - 3
Rendimento elettrico (%)	25 - 50	20 - 35	20 - 40	17 - 19
Rendimento termico (%)	30 - 45	60 - 75	35 - 50	78 - 80
Rendimento complessivo (%)	60 - 80	70 - 80	60 - 80	85 - 95
Rapporto tipico elettricità/calore	0,5 - 1	0,5 - 1	0,1 - 0,3	0,1 - 0,2

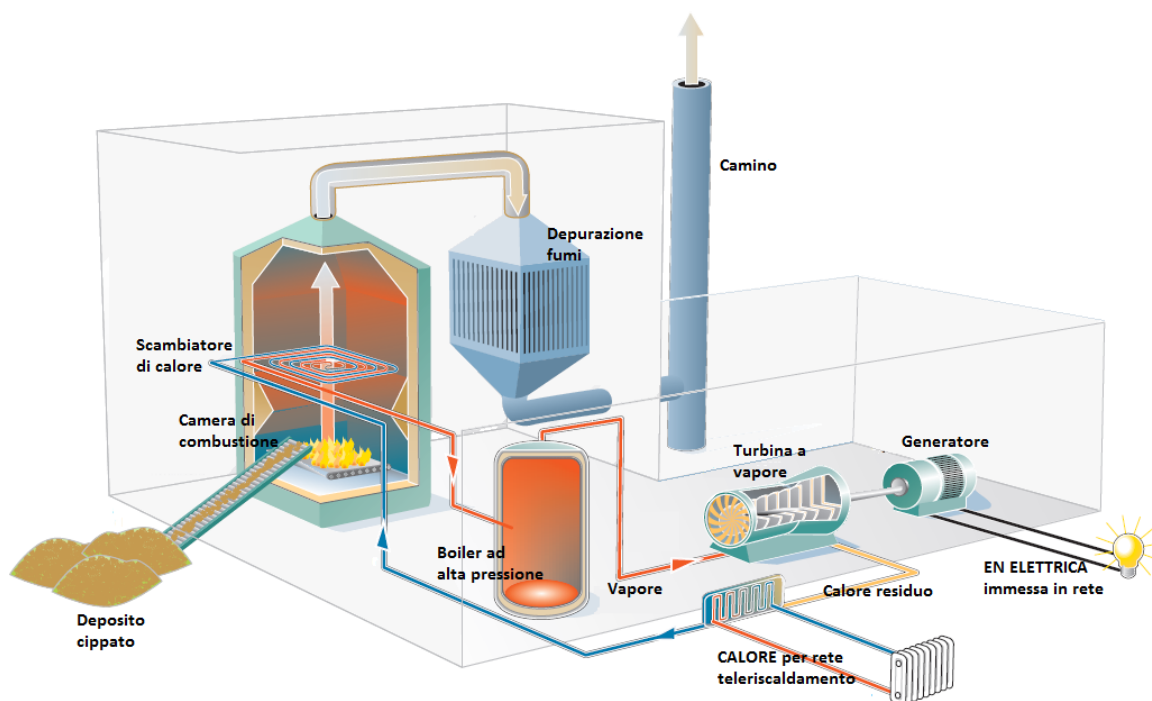


Figura A.2.18 Schema di funzionamento di un impianto a cogenerazione di biomassa



	<ul style="list-style-type: none"> • Efficienze elevate (fino a oltre il 95%) • Elevata automazione impianti • Ampio range di potenze • Monitoraggio completo degli inquinanti • Minori emissioni e combustibile consumato a parità di energia prodotta 		<ul style="list-style-type: none"> • Sindrome NIMBY • Sostenibilità ambientale ed economica decresce con la distanza di approvvigionamento della biomassa • Necessità integrazione con fonti fossili per periodi di manutenzione o di pulizia • Difficoltà realizzazione economica di impianti nel caso in cui vengano meno incentivi finanziari
---	--	---	--

Figura A.2.19 Vantaggi e svantaggi di impianti di cogenerazione a biomassa come fonte di energia

Impianti di digestione anaerobica della biomassa

Il processo di digestione anaerobica

La digestione anaerobica è un processo biochimico che, in assenza di ossigeno (condizioni anaerobiche), porta alla degradazione della sostanza organica per mezzo di microrganismi batterici, che la trasformano in una miscela di gas, composta principalmente da anidride carbonica e metano, denominata *biogas*.

Il processo di digestione anaerobica avviene in diverse fasi successive che degradano la matrice in ingresso:

1. *idrolisi*: le molecole organiche complesse (proteine, carboidrati e lipidi) vengono scisse in sostanze organiche più semplici (monosaccaridi, amminoacidi e acidi grassi) attraverso i batteri idrolitici;
2. *acidogenesi*: avviene un'ulteriore scissione delle molecole in acidi grassi volatili con produzione di ammoniaca, anidride carbonica e acido solforico come sottoprodotti;
3. *acetogenesi*: i batteri acetogeni digeriscono le molecole prodotte nello stadio precedente producendo acido acetico e idrogeno, con produzione di biossido di carbonio;
4. *metanogenesi*: l'ultima fase del processo consente di trasformare le molecole ottenute in biogas, principalmente costituito da metano e anidride carbonica, con produzione di acqua.

La digestione anaerobica viene realizzata e controllata in volumi di processo denominati digestori, e avviene a temperature variabili tra i 10 e i 65°C. Il processo permette di trasformare in biogas una percentuale di componente organica variabile tra il 30 e l'80% circa, a seconda dei volumi di stoccaggio, delle condizioni di processo, dei tempi di ritenzione e della matrice organica.

Configurazione impiantistica

Sul territorio nazionale gli impianti di biogas vengono progettati e costruiti da varie società di impiantisti, ognuna delle quali utilizza le proprie tecnologie, ma la struttura dell'impianto segue sempre uno schema generale, riconducibile al seguente schema a blocchi:

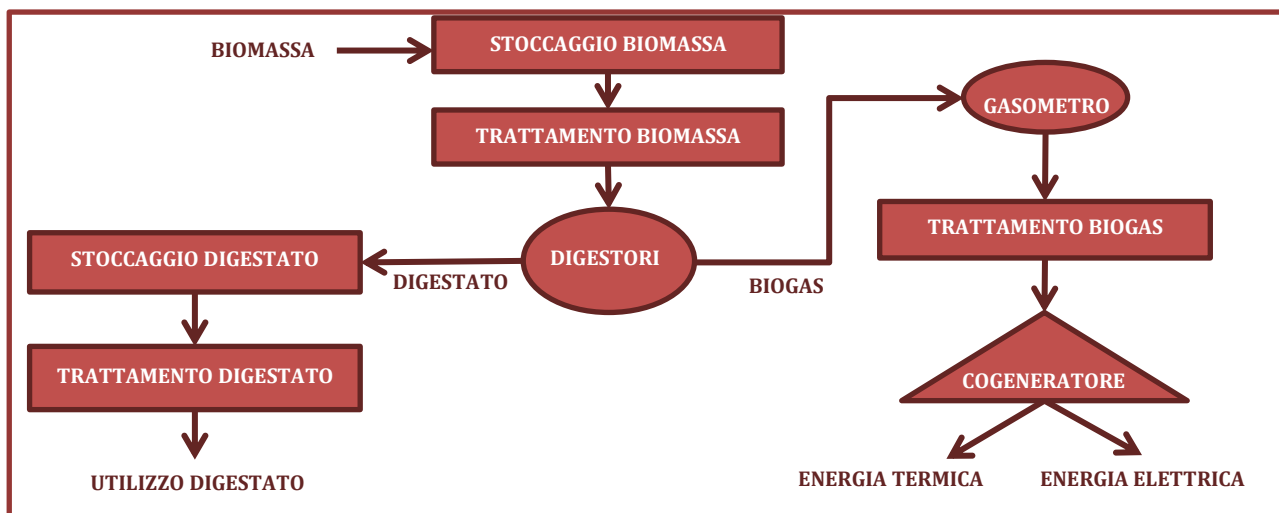


Figura A.2.20 Schema a blocchi di un impianto per il processo di digestione anaerobica

Le matrici organiche sottoponibili a digestione anaerobica

Un aspetto fondamentale è quello relativo alla biomassa utilizzata nell'impianto per produrre biogas. In linea di massima tutta la sostanza organica può essere utilizzata come substrato. A seconda della matrice ci si deve comportare diversamente, in quanto ognuna necessita di pretrattamenti e trattamenti finali diversi a seconda delle proprie caratteristiche. Inoltre, ogni sostanza trattata ha una resa, una reperibilità e un costo differenti. Le biomasse utilizzate in input possono essere raggruppate in classi:

Reflui zootecnici

Tutti i reflui zootecnici sono adatti all'utilizzo come biomassa per impianti di biogas, anche se la resa non è molto elevata, mentre la loro reperibilità è sicuramente alta in paesi, come l'Italia, che sviluppano in particolar modo l'allevamento zootecnico. I reflui più utilizzati sono *liquame suino*, *liquame bovino* e *deiezioni avicole*, e rispetto a colture dedicate hanno il vantaggio della valorizzazione di un rifiuto e del minimo consumo di suolo agricolo.

Colture energetiche

Si tratta delle colture prodotte espressamente per il loro utilizzo in questo tipo di impianti. Tra le più utilizzate troviamo il mais, il sorgo, il triticale, il frumento, la segale, ecc., biomasse caratterizzate ad elevato contenuto di sostanza secca. Questa categoria presenta il grosso svantaggio di essere in diretta competizione con le colture di tipo alimentare.

Residui colturali

Sono i residui ottenuti dalle produzioni agricole, in particolare foraggi, paglia, frutta di scarto, ecc. Si tratta generalmente di materiali caratterizzati da tenori di secco relativamente elevati (15-35%), e da un'alta reperibilità in quanto, essendo questa matrice costituita da scarti, non trova altri impieghi.

Scarti agroindustriali

Si tratta degli scarti originati dalla lavorazione industriale di prodotti agricoli: sia di prodotti liquidi come il siero di latte, sia solidi, come i residui dell'industria della frutta e olearia o gli scarti di macellazione

Fanghi di depurazione

Sono il residuo del processo di depurazione delle acque reflue urbane e industriali, e sono costituiti da biomassa batterica e sostanza organica e inorganica. Perché questa matrice venga utilizzata è necessaria la stabilizzazione della sostanza organica e la riduzione della carica patogena. Dal punto di vista della resa, questa matrice è una delle peggiori a causa delle concentrazioni di metalli pesanti, antibiotici e sostanze chimiche dannose. La reperibilità è buona, anche se è opportuno pensare alla digestione nei pressi di impianti di depurazione di acque civili a causa degli alti costi dei trasporti di queste sostanze.

Frazione organica dei rifiuti solidi urbani

La FORSU è il materiale derivante dalla raccolta differenziata dei rifiuti solidi urbani (il cosiddetto "umido"), e sarà quindi composto grossomodo dagli scarti alimentari provenienti dalle nostre case. A causa, in genere, della presenza di materiali inerti come sabbie, gusci, plastiche o altri materiali non digeribili, l'utilizzo della Forsu in impianti a biogas deve essere preceduto da particolari sistemi di pretrattamento.

Tra tutte queste categorie, considereremo in particolare le prime due, sicuramente più indicate per aree agricole. Di seguito una tabella riassuntiva delle caratteristiche di tali substrati.

Tabella A.2.4 Produzione potenziale di biogas e metano di varie biomasse agricole (fonte: Ragazzoni A., Biogas)

Biomassa	Solidi totali	Solidi volatili	Biogas	Metano	
	(% su biomassa)	(% su ST)	(m ³ /tSV)	(%)	(m ³ /tTQ)
<i>Liquami di vacche da latte</i>	10,5	83	325	65	18
<i>Liquami bovini da carne</i>	12	80	280	65	17
<i>Liquame suino</i>	2,5	85	450	67	6
<i>Letame fresco</i>	23	78	290	63	33
<i>Letame maturo</i>	45	60	240	62	40
<i>Lettiera avicola</i>	60	68	350	65	93
<i>Contenuto ruminale</i>	16	85	360	65	32
<i>Melasso</i>	81	90	850	60	372
<i>Scarti frumento</i>	80	92	490	55	198
<i>Siero di latte</i>	11	90	700	60	42
<i>Residuo distillazione frutta</i>	3	92	470	58	8
<i>Residuo distillazione patate</i>	7	90	580	60	22
<i>Residuo produzione succo di mele</i>	35	92	630	60	122
<i>Residuo produzione succo di frutta</i>	23	92	635	60	72
<i>Scarti ortofrutticoli</i>	13	92	450	55	30
<i>Grasso di flottazione</i>	15	96	960	65	90
<i>Pane di scarto</i>	73	96	790	56	310
<i>Silomais</i>	35	95	640	52	111
<i>Insilato di triticale</i>	30	92	550	52	79
<i>Insilato di frumento</i>	30	92	520	52	75
<i>Insilato di segale</i>	30	92	535	54	80
<i>Insilato di sorgo zuccherino</i>	20	95	510	52	50

Prodotti del processo di digestione anaerobica

Il processo di digestione anaerobica determina in uscita due prodotti principali: il biogas e il digestato:

Energia da biogas

Il biogas viene utilizzato (ovviamente) per fini energetici e rappresenta per ogni impianto il contributo da massimizzare.

Una volta prodotto all'interno del digestore, il biogas viene prima stoccato all'interno di gasometri, e quindi purificato da quei composti che, a causa delle loro proprietà ossidanti o di incombustibilità, devono essere eliminati per favorire un buon processo di combustione. Dopo essere stato trattato, il biogas viene condotto al cogeneratore, che ha il compito di bruciare il biogas in input generando in modo combinato energia elettrica e termica.

Solitamente l'energia elettrica viene messa in rete, mentre il calore viene utilizzato per l'autoconsumo dell'impianto, fornendo l'energia necessaria per il riscaldamento dei digestori. Alcuni impianti possono però sfruttare tale calore per una piccola rete di teleriscaldamento per soddisfare alcune utenze vicine all'impianto.

Mediamente con 1 m³ di biogas è possibile produrre 1,8-2 kWh di energia elettrica e 2-3 kWh di energia termica.

Digestato

Il digestato è costituito dalla materia organica digerita durante il processo di digestione anaerobica e viene indicato come il principale sottoprodotto; esso rappresenta una quantità importante, corrispondente a circa il 96% della biomassa in ingresso. La sua composizione chimica dipende dalla matrice in entrata impoverita di

carbonio, idrogeno e ossigeno, mentre l'unica componente a restare invariata è l'azoto. Esso comporta un problema non trascurabile, in quanto impedisce lo smaltimento del digestato tal quale tramite spandimento sui terreni agricoli come concime, rendendo invece necessari dei trattamenti preliminari di rimozione dell'azoto in eccesso.

Una volta, infatti, che il digestato è stato separato in solido e liquido può essere riutilizzato. La frazione solida è riutilizzata come ammendante agricolo, è infatti un ottimo fertilizzante; per quanto riguarda la parte liquida, in molti casi questa viene riciclata nell'impianto stesso oppure utilizzata come ammendante agricolo esattamente come la frazione solida.


<ul style="list-style-type: none"> • Emissioni nette di CO₂ nulle • Riduzione emissioni inquinanti • Trasformazione in energia delle emissioni (CO₂ e CH₄) climalteranti che altrimenti gli allevamenti convogliano direttamente in atmosfera • Inserimento paesistico limitato • Valorizzazione di sottoprodotti (residui, reflui, ecc.) • Valorizzazione zone rurali, differenziazione del reddito agricolo e creazione di occupazione <i>locale</i> • Elevati rendimenti sia elettrici che termici • Tempi di ritorno brevi ed alta redditività 		<ul style="list-style-type: none"> • Competizione nell'uso dei suoli, in particolare le colture energetiche con produzioni per fini alimentari • Necessità di ampie superfici per la ridotta densità energetica • Necessità di grandi volumi di fertilizzanti ed irrigazione per produzione • Sistema complesso di gestione impianto
---	---	--

Figura A.2.21 Vantaggi e svantaggi del biogas come fonte di energia rinnovabile

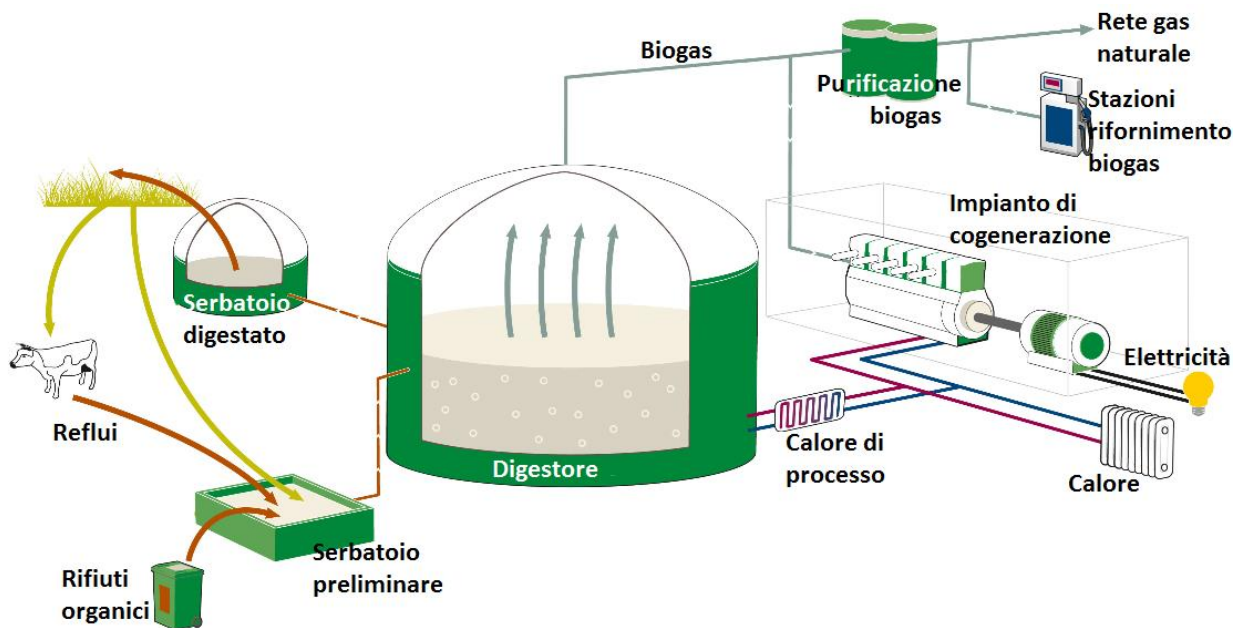


Figura A.2.22 Schematizzazione di un impianto a biogas

Energia dal sole

L'energia solare è l'energia associata alla radiazione del sole, e rappresenta la fonte primaria di energia sulla Terra che rende possibile la vita; da questa energia, inoltre, derivano praticamente tutte le altre fonti energetiche disponibili all'uomo, quali i combustibili fossili, l'energia eolica, l'energia dalle biomasse e l'idroelettrica.

La radiazione solare

Il sole emette, infatti, una potenza pari a circa 175 miliardi di MW, tanto che in meno di 15 secondi fornisce alla Terra l'energia che sarebbe sufficiente a soddisfare i consumi per un giorno intero. Di tale potenza circa 1350 W/mq raggiungono l'atmosfera terrestre (vedi Figura A.2.23), mentre causa della dispersione proprio in atmosfera, la superficie terrestre viene raggiunta mediamente da circa 1000 W/mq (potenza di irraggiamento). La quantità di energia solare che arriva sul suolo terrestre è quindi estremamente ampia, ma poco concentrata, nel senso che è necessario raccogliere energia da aree molto vaste per averne quantità significative.

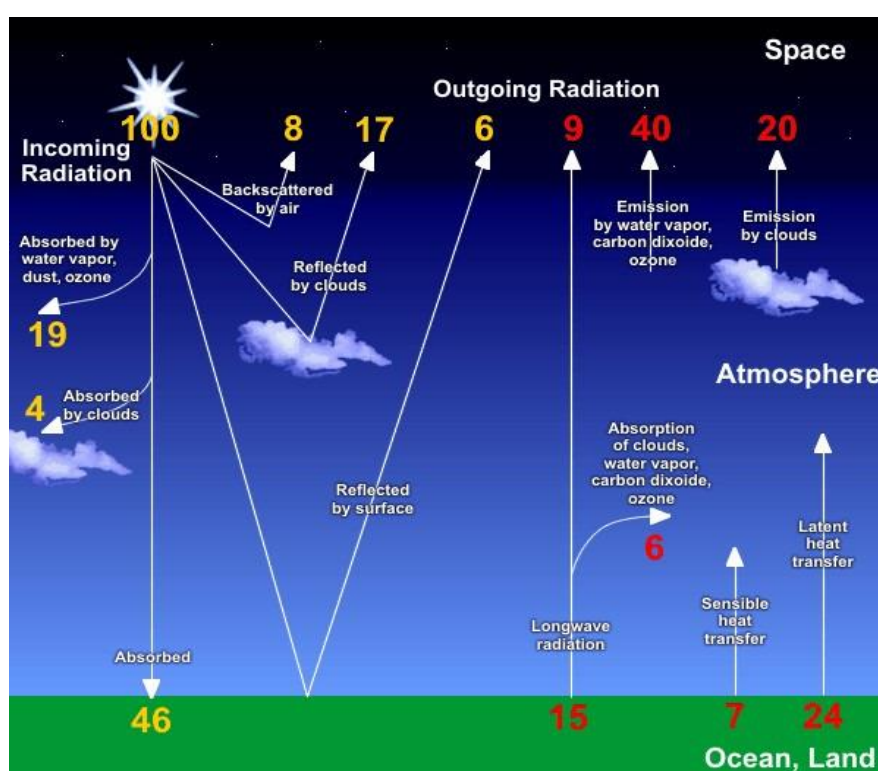


Figura A.2.23 Percorso della radiazione solare verso la superficie terrestre

L'energia solare non raggiunge la superficie terrestre in maniera costante: essa varia durante il giorno, da stagione a stagione e dipende dalle condizioni meteorologiche, dall'angolo d'incidenza e dalla riflettanza delle superfici.

La quantità di energia solare che arriva sulla superficie terrestre e che può essere utilmente "raccolta" da un dispositivo fotovoltaico o solare dipende dall'irraggiamento del luogo. L'irraggiamento è, infatti, la quantità di energia solare incidente su una superficie unitaria in un determinato intervallo di tempo, tipicamente un giorno (kWh/m²/giorno). Il valore istantaneo della radiazione solare incidente sull'unità di superficie viene invece denominato *radianza* (kW/m²). L'irraggiamento è influenzato dalle condizioni climatiche locali (nuvolosità, foschia ecc..) e dipende dalla latitudine del luogo, cresce cioè quanto più ci si avvicina all'equatore.

La produzione media di un impianto solare (di qualsiasi tipologia) è necessariamente proporzionale alla radiazione solare annuale in arrivo nel luogo in cui l'impianto stesso è posizionato. Sono, quindi, di grande interesse le mappe di irraggiamento annuale medio ricavate sulla base di misure relative ad intervalli di tempo pluriennali (e quindi più robuste statisticamente, cioè meno dipendenti dall'aleatorietà delle condizioni

meteorologiche). In questo lavoro ci si è basati sul database del Joint Research Center, che contiene dati di questo tipo, basati su ampie serie temporali (vedi Figura A.2.24). In Italia, l'irraggiamento medio annuale varia dai circa 1300 kWh/m²/anno della Pianura Padana, ai 1700 kWh/m²/anno del centro Sud e ai 1900 kWh/m²/anno della Sicilia.



Figura A.2.24 Mappa dell'irradiazione solare su superficie orizzontale (fonte JRC - PVGIS)

Le tecnologie di trasformazione della radiazione solare in energia sfruttabile si distinguono in 4 tipologie impiantistiche:

- **Impianti fotovoltaici**, che producono energia elettrica sfruttando le proprietà fotoelettriche di particolari elementi semiconduttori, costituenti i pannelli fotovoltaici, in grado di generare elettricità se colpiti dalla radiazione solare;
- **Impianti a solare termico**, che forniscono energia termica mediante un liquido termovettore, contenuto all'interno dei pannelli, che cede calore tramite uno scambiatore all'acqua contenuta in un serbatoio d'accumulo;
- **Impianti solari ibridi**, in grado cioè di fornire sia energia elettrica che termica, sfruttando sistemi di raffreddamento delle celle fotovoltaiche per incrementarne l'efficienza e allo stesso tempo produrre calore;
- **Impianti a solare termodinamico**, che concentrano mediante un sistema di specchi la radiazione solare verso un tubo (o un serbatoio) contenente un liquido che viene scaldato a temperature tali da riuscire a produrre vapore e quindi energia elettrica mediante turbine.

In questo lavoro si sono considerate le prime due tipologie impiantistiche, che verranno quindi maggiormente approfondite in seguito.

Impianti fotovoltaici

Il generatore fotovoltaico

Un impianto fotovoltaico è in grado di trasformare l'energia della radiazione solare incidente direttamente in energia elettrica, grazie, come detto, a un fenomeno detto *effetto fotovoltaico*, che avviene nella cella fotovoltaica, costituita tipicamente da una sottile lamina di un materiale semiconduttore.

Quando un fotone dotato di energia sufficiente colpisce la superficie della cella (vedi Figura A.2.25), esso viene assorbito e nel materiale semiconduttore viene a costituirsi una coppia di cariche elettriche di segno opposto (elettrone e lacuna). Tali cariche danno luogo a una circolazione di corrente quando il dispositivo viene connesso ad un carico; la corrente è tanto maggiore quanto maggiore è la quantità di luce incidente.

La cella può, inoltre, utilizzare solo una parte della radiazione solare in entrata, in quanto la radiazione con lunghezza d'onda maggiore di $1,15 \mu\text{m}$ (circa il 25% della radiazione incidente) è troppo poco energetica; d'altra parte, però, al di sotto di $0,4 \mu\text{m}$ i fotoni posseggono troppa energia rispetto a quella necessaria per liberare una coppia elettrone-lacuna. Si arriva quindi ad una quota di energia solare che è teoricamente possibile convertire in energia elettrica che non supera il 44%.

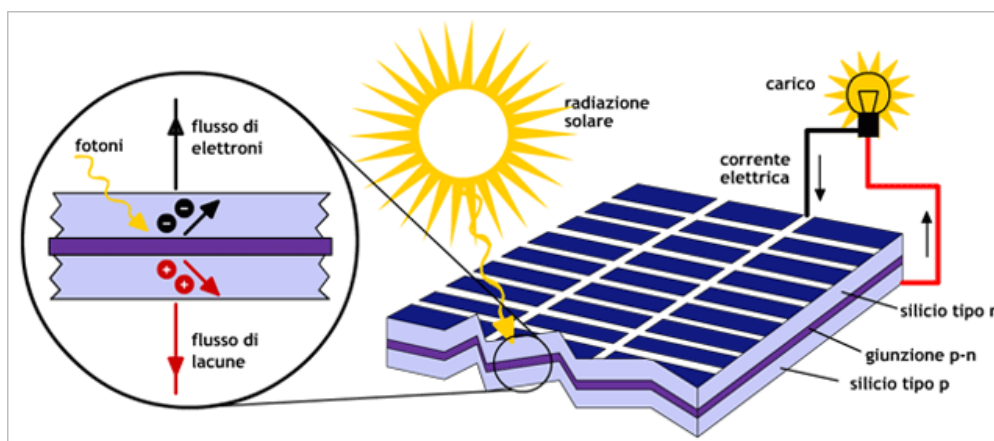


Figura A.2.25 Schema di funzionamento della cella fotovoltaica

Quindi, l'efficienza di conversione (intesa come la percentuale di energia luminosa trasformata in energia elettrica) disponibile per celle commerciali è in genere compresa tra il 12% e il 18%.

Come detto, la cella fotovoltaica è il componente elementare dell'impianto: più celle collegate tra loro formano un modulo FV, più moduli formano un singolo pannello FV, più pannelli connessi tra loro per fornire la potenza richiesta costituiscono il generatore fotovoltaico (vedi Figura A.2.26).

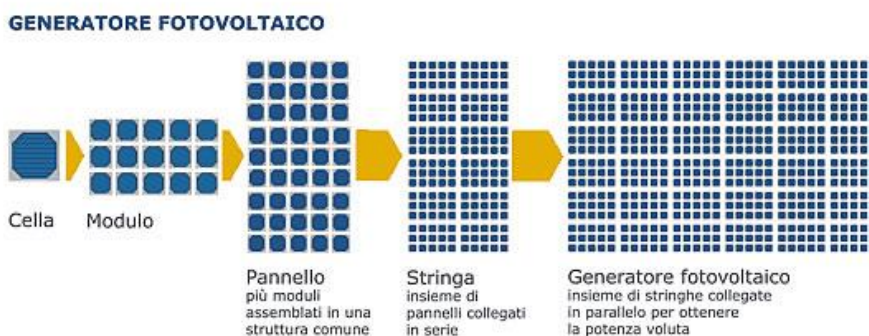


Figura A.2.26 Componenti del generatore fotovoltaico

Tipologie di impianti fotovoltaici

Un impianto fotovoltaico può essere sostanzialmente di due tipi (vedi Figura A.2.27):

- Impianti *grid connected*, e cioè impianti connessi alla rete elettrica di distribuzione esistente, per cui l'energia elettrica prodotta viene utilizzata dall'utenza che la produce (per esempio dall'abitazione sul cui tetto è collocato l'impianto) oppure immessa direttamente in rete e utilizzata in caso di bisogno
- Impianti *stand alone*, cioè impianti isolati e quindi non connessi alla rete, che sfruttano (costosi) sistemi di accumulo per stoccare l'energia elettrica prodotta.

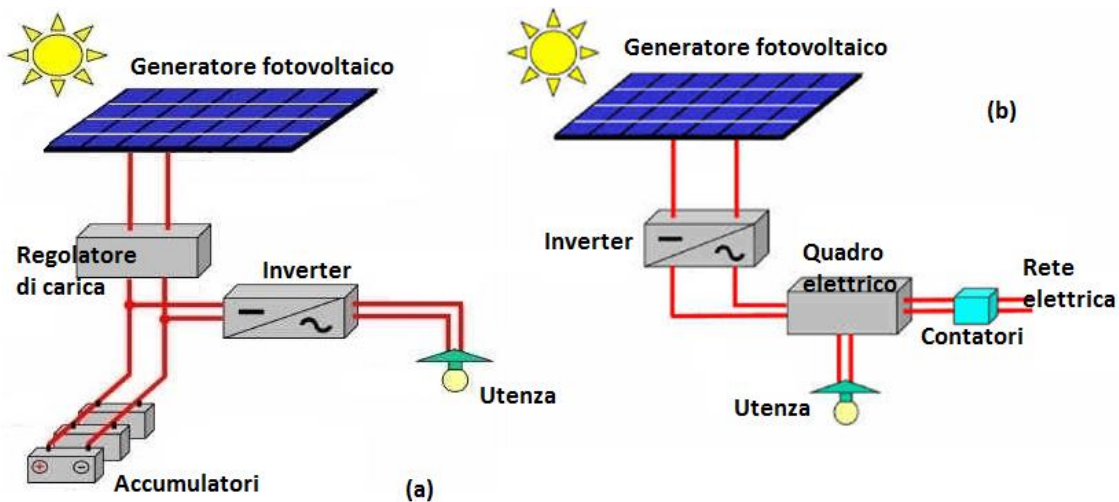


Figura A.2.27 Schema di un impianto isolato (a) e di un impianto connesso alla rete (b)

Un'ulteriore distinzione può essere fatta a seconda della possibilità di inseguimento solare:

- impianti *ad inclinazione fissa*
- impianti *ad inseguimento* (su uno o due assi), forniti cioè di sistemi automatici per la regolazione dell'esposizione dei moduli al fine di ottenere una maggiore producibilità energetica dal sistema

In questo lavoro si sono considerati impianti ad inclinazione fissa e connessi alla rete, sicuramente più diffusi e di più facile (ed economica) realizzazione in un contesto urbano.

I componenti principali di un impianto fotovoltaico di questo tipo sono:

- *Moduli fotovoltaici*
- *Inverter*, che converte l'energia elettrica in corrente continua prodotta dall'impianto in corrente alternata, compatibile con l'immissione in rete
- *Quadri Elettrici*
- *Contatore*
- *Strutture di sostegno* dei moduli al tetto

<ul style="list-style-type: none"> • Riduzione emissioni (per esempio per kWh prodotto si risparmiano 250g di olio combustibile e 700g di CO₂) • Ridotti interventi e costi di manutenzione • Ridotti tempi di ritorno dell'investimento, grazie incentivi statali (4-5 anni per impianto familiare) • Fonte solare gratuita e illimitata • Vita utile superiore ai 20 anni • Modularità degli impianti • Possibilità di micro-generazione e generazione diffusa 	<ul style="list-style-type: none"> • Costi d'investimento iniziale ancora elevati • Intermittenza e aleatorietà della fonte solare, quindi necessità di approvvigionamento dalla rete in assenza di sole • Necessità di superfici con esposizione e inclinazione favorevoli
--	--

Figura A.2.28 Vantaggi e svantaggi della tecnologia solare fotovoltaica

Impianti solari termici

Un impianto solare termico è un dispositivo in grado di trasformare la radiazione solare incidente in energia termica, e al suo trasferimento ad un accumulatore per successivi usi, tipicamente acqua calda sanitaria o riscaldamento degli ambienti.

Questi impianti sono generalmente costituiti dai seguenti componenti:

- il *pannello solare termico* (solitamente chiamato collettore), in cui avviene l'assorbimento della radiazione solare ed il conseguente riscaldamento del fluido termovettore
- lo *scambiatore di calore*, che trasferisce il calore dal fluido termovettore all'acqua
- il *serbatoio* di accumulo dell'acqua riscaldata, che viene stoccata in attesa di essere utilizzata.

Il collettore solare

Il collettore solare è l'elemento chiave di tutto l'impianto; esso basa il proprio funzionamento sul principio dell'effetto serra che si produce attraverso un elemento captatore in grado di assorbire la maggior quantità possibile di energia solare ed una copertura trasparente in grado di contenerne l'effetto di re-irraggiamento (vedi Figura A.2.29). L'energia solare, infatti, arriva ad una piastra assorbente attraverso il vetro posto sopra di essa con una radiazione di lunghezza d'onda inferiore ai 3 μm e viene in parte assorbita ed in parte riflessa, attraverso radiazioni con una lunghezza d'onda superiori. Se ne deduce che un buon collettore solare dovrà essere caratterizzato da un sistema di captazione ad elevato assorbimento e bassa emissività e di un sistema di copertura il più possibile trasparente alle radiazioni con lunghezza d'onde inferiori ai 3 μm ed opaco per onde di lunghezza superiore.

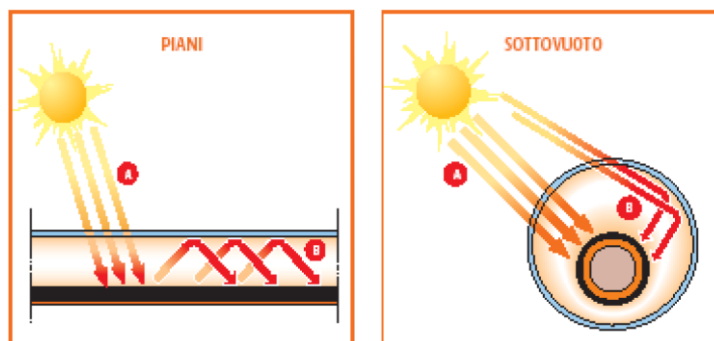


Figura A.2.29 Principio di captazione della radiazione solare per le due tipologie di collettori solari

L'efficienza di un pannello solare è il rapporto tra l'energia termica utile e quella solare incidente. Essa dipende dalle caratteristiche dell'elemento captante, la qualità della copertura e la capacità dell'isolante di limitare le perdite per conduzione e convezione.

I collettori solari sono generalmente costituiti da tre componenti:

- la superficie captante, che assorbe i raggi solari,
- la superficie isolante al di sotto di essa, che evita le perdite di calore verso l'esterno
- la (eventuale) superficie di copertura, che impedisce la riflessione verso l'esterno della radiazione solare

Il mercato offre oggi diverse tipologie di pannelli solari, ma la quasi totalità delle installazioni è realizzata con due tipologie di collettori: *piano (vetrato o meno)* e *a tubi sottovuoto*.

Collettori piani

Nei collettori piani la superficie captante è solitamente composta da una piastra di rame, sulla quale sono saldati dei tubi in rame, a loro volta collegati ai collettori di mandata e ritorno del fluido termovettore. La piastra captante così composta viene trattata con vernici selettive di colore nero opaco o processi di ossidazione chimica per ottimizzarne la capacità assorbente della radiazione solare. La bontà di un captatore per collettori solari è tanto maggiore quanto più è alto il valore di assorbimento al di sotto della soglia dei 3 μm di lunghezza d'onda della radiazione.

La superficie di copertura non è sempre presente: esistono pannelli solari vetrati e non vetrati. Tale superficie, quando presente ha lo scopo di proteggere il sistema dagli agenti naturali, ma soprattutto va ad innalzare l'efficienza del sistema, andando a creare l'effetto serra di cui sopra. D'altra parte, i pannelli piani di tipo *non vetrato* (scoperti) hanno il vantaggio di essere meno costosi e di avere un buon rendimento in condizioni ottimali di irraggiamento quando la temperatura esterna è alta. Ovviamente, però, a causa della mancanza dell'isolamento il loro rendimento diminuisce rapidamente all'allontanarsi dalle condizioni ottimali.

Infine, al di sotto dell'assorbitore, viene posto del materiale ad alto grado di isolamento termico al fine di ridurre al minimo le perdite dalla parte posteriore del pannello.

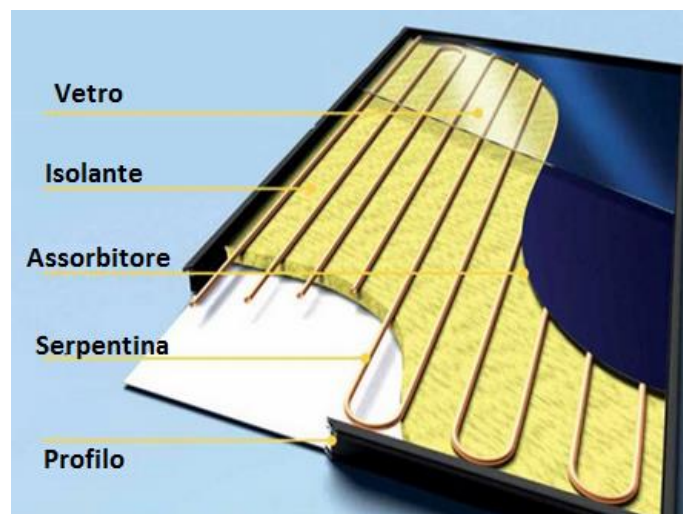


Figura A.2.30 Sezione di un collettore solare piano vetrato

Collettore a tubi sottovuoto

Il principio di captazione dei collettori sottovuoto è analogo a quello dei collettori piani. La differenza tra i due sistemi è che l'assorbitore del collettore sottovuoto è costituito da un tubo di vetro la cui superficie è coperta da un trattamento selettivo. La captazione solare è affidata ad un sistema composto da una batteria di tubi coassiali di vetro borosilicato, chiusi a formare una camera nella quale viene realizzato il vuoto ed inserito l'elemento costituito dai condotti che convogliano il fluido termovettore, con eccellenti caratteristiche di assorbimento e di minima riflessione di calore. La forma cilindrica dell'assorbitore consente una maggiore esposizione al sole, al variare delle condizioni di irraggiamento. Al fine di migliorare le prestazioni del sistema viene posto sotto l'assorbitore un riflettore di forma parabolica in grado di catturare e convogliare l'irradiazione riflessa, sull'elemento captante.

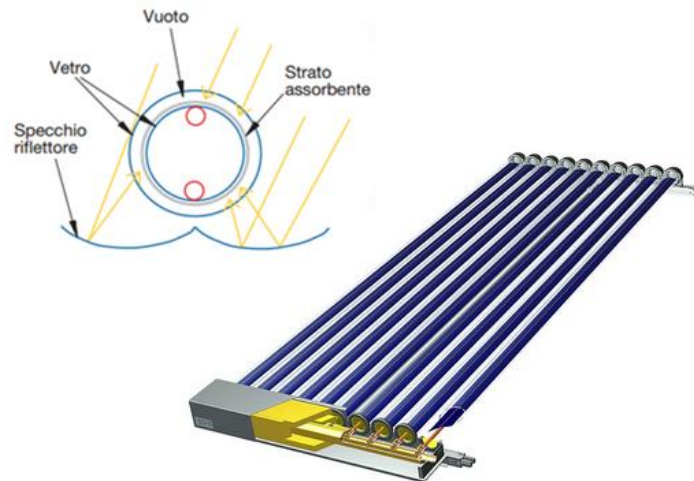


Figura A.2.31 Schema di un collettore a tubi sottovuoto

Sistemi impiantistici e loro applicazioni

Per quanto riguarda il funzionamento, gli impianti solari si distinguono a seconda del sistema di circolazione:

- *circolazione naturale*, che sfrutta la gravità per far circolare l'acqua
- *circolazione forzata*, che si avvale di un sistema di sonde termiche e pompe

Nei primi la circolazione tra collettore e serbatoio di accumulo viene determinata dal principio di gravità, senza energia addizionale: il fluido termovettore si riscalda all'interno del collettore; quello caldo all'interno del collettore è più leggero del fluido freddo all'interno del serbatoio; tale differenza di densità instaura una circolazione naturale: il fluido riscaldato cede il suo calore all'acqua contenuta nel serbatoio e ricade nel punto più basso del circuito del collettore. Negli impianti a circolazione naturale il serbatoio si deve trovare quindi in un punto più alto del collettore, ed è solitamente posto all'esterno (vedi Figura A.2.32).

Un impianto a circolazione forzata è formato da un collettore solare a sé stante, connesso attraverso un circuito con un serbatoio localizzato nell'edificio. All'interno del circuito solare si trova acqua o un fluido termovettore antigelo. La pompa di circolazione del circuito solare è attivata da un regolatore differenziale di temperatura quando la temperatura all'interno del collettore è superiore alla temperatura di riferimento impostata nel serbatoio di accumulo. Il calore viene quindi trasportato al serbatoio di accumulo e ceduto all'acqua sanitaria mediante uno scambiatore di calore (vedi Figura A.2.33).

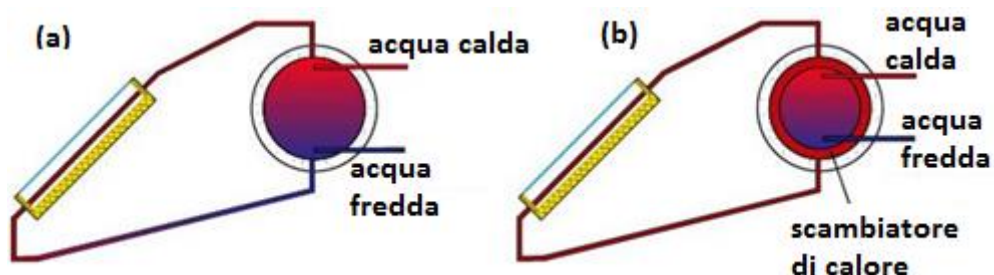


Figura A.2.32 Schema di funzionamento di un impianto a circolazione naturale a singolo (a) e a doppio (b) circuito

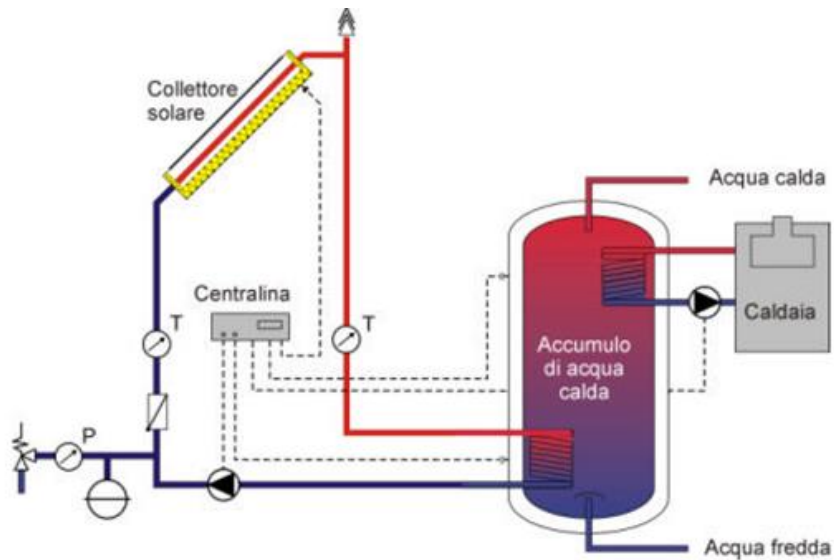


Figura A.2.33 Schema di un impianto solare termico a circolazione forzata

Confronti prestazionali

Come detto, l'efficienza di un collettore varia in relazione alle condizioni di funzionamento, che sono determinate dalla temperatura dell'ambiente esterno e da quella raggiunta dal fluido termovettore nel collettore (che a sua volta dipende dalle caratteristiche prestazionali di quest'ultimo). Un confronto immediato ed esauriente delle prestazioni e delle applicazioni a seconda delle condizioni di funzionamento si ha dai grafici delle figure seguenti. Dal primo si nota come i collettori piani non vetrati abbiano i rendimenti più elevati, ma solo in condizioni ben precise, in cui cioè il livello di temperatura del fluido termovettore richiesto dall'utenza sia prossimo a quello dell'aria esterna. La tecnologia a tubi sottovuoto presenta la minore efficienza massima ma la più contenuta riduzione di efficienza al crescere della differenza di temperatura con l'esterno, risultando dunque la soluzione più efficace per raggiungere livelli di temperatura più elevati, o più lontani dalle condizioni ambientali esterne (e.g. riscaldamento invernale ambienti, ACS in località con condizioni climatiche sfavorevoli). I collettori piani vetrati si collocano in una situazione intermedia, adeguata per produrre ACS e per il riscaldamento degli ambienti in località temperate.

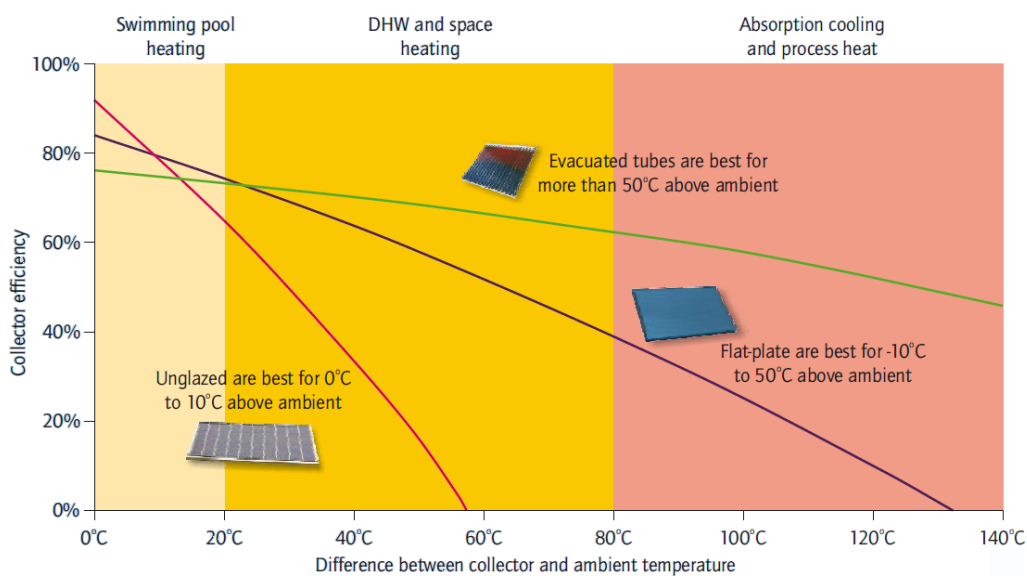


Figura A.2.34 Curve di efficienza dei diversi tipi di collettore

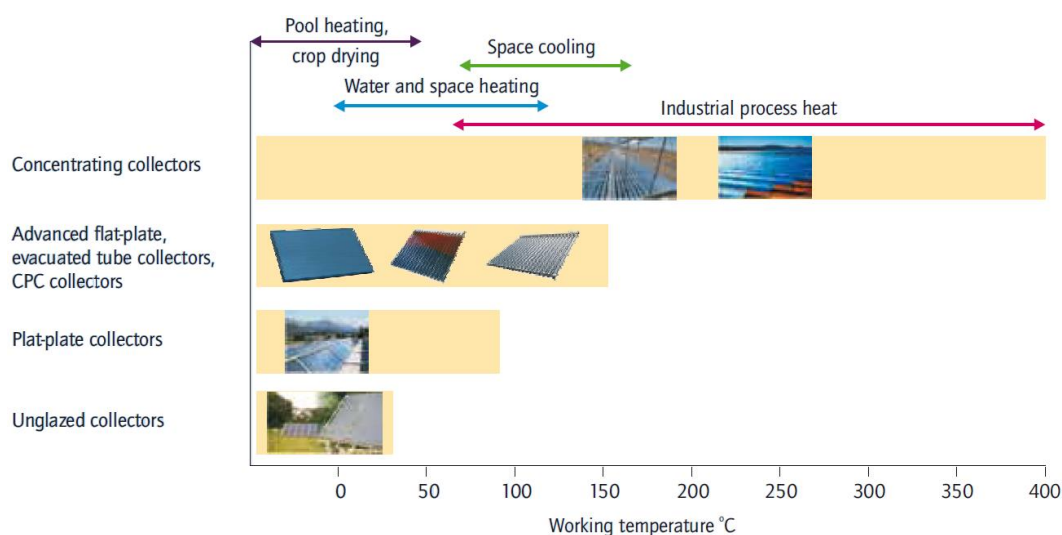


Figura A.2.35 Applicazioni tipiche per le principali tecnologie solari

- Riduzione emissioni (circa 70%) rispetto sistema tradizionale (circa -2,5 t_{CO2}/anno rispetto scaldabagno elettrico, -2 t_{CO2}/anno rispetto scaldabagno a gas)
- Ridotti interventi e costi di manutenzione
- Ridotti tempi di ritorno dell'investimento, grazie incentivi statali (4-5 anni per impianto familiare)
- Fonte solare gratuita e illimitata
- Tecnologia ormai matura e affermata
- Modularità degli impianti

- Costi d'investimento iniziale ancora elevati
- Intermittenza e aleatorietà della fonte solare, quindi necessità di integrazione con sistemi tradizionali
- Necessità di superfici con esposizione e inclinazione favorevoli

Figura A.2.36 Vantaggi e svantaggi della tecnologia a solare termico

Pompe di calore ed energia geotermica

La pompa di calore

La pompa di calore è una macchina in grado di trasferire calore da un ambiente a temperatura più bassa ad un altro a temperatura più alta.

Essa rappresenta una tecnologia ormai consolidata e di uso comune nella climatizzazione, anche se i dati di mercato degli ultimi anni, mostrano come l'incremento delle vendite di pompe di calore di piccola potenza sia più rapido nei paesi del centro-nord Europa rispetto all'incremento che si è registrato in Italia, dove questo tipo di tecnologia è ancora poco diffusa, rappresentando quindi un grosso potenziale.

L'efficienza energetica, infatti, che queste macchine possono garantire sia in termini di prestazioni nominali che di prestazioni stagionali è molto elevata e consente di ottenere un risparmio di energia primaria significativo rispetto anche alle migliori tecnologie a combustione (caldaie a condensazione), nel caso di accoppiamento con impianti a bassa o media temperatura.

Il termine "pompa di calore" ha un chiaro significato: essa è infatti una macchina termica che permette di "pompare" il calore da un livello termico più basso ad uno più alto; ciò non può avvenire in maniera spontanea altrimenti sarebbe violato il secondo principio della termodinamica. Per ottenere questo risultato è quindi necessario compiere del lavoro, consumare cioè dell'energia, esattamente come per una pompa idraulica. Definendo il tutto in modo più formale, le pompe di calore basano il loro funzionamento sul ciclo termodinamico

inverso (vedi Figura A.2.37), una combinazione di trasformazioni termodinamiche mediante le quali una macchina operante in modo ciclico è in grado di trasferire calore da un livello di temperatura inferiore ad uno superiore, grazie all'apporto di energia dall'ambiente esterno al sistema che opera il ciclo.

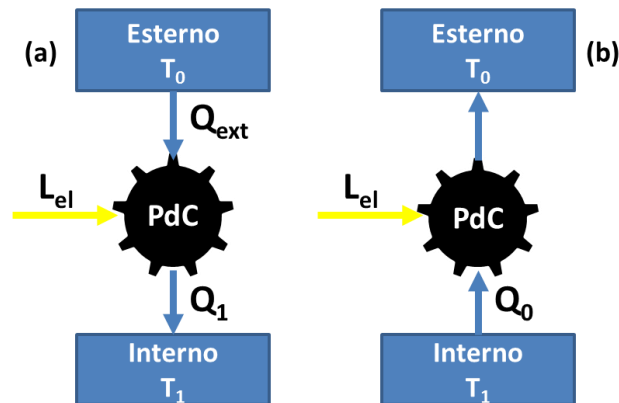


Figura A.2.37 Schema del principio di funzionamento della pompa di calore, in modalità riscaldamento (a) e raffrescamento (b)

Le pompe di calore sono di norma reversibili, funzionando quindi, oltre che per il riscaldamento invernale, anche per il raffrescamento estivo come condizionatori.

La pompa di calore è costituita da un circuito chiuso, percorso da uno speciale fluido (frigorifero) che, a seconda delle condizioni di temperatura e di pressione in cui si trova, assume lo stato di liquido o di vapore. Tale circuito è costituito da 4 elementi:

- compressore
- condensatore
- valvola di espansione
- evaporatore

Il funzionamento di tali componenti è ben riassunto in Figura A.2.38:

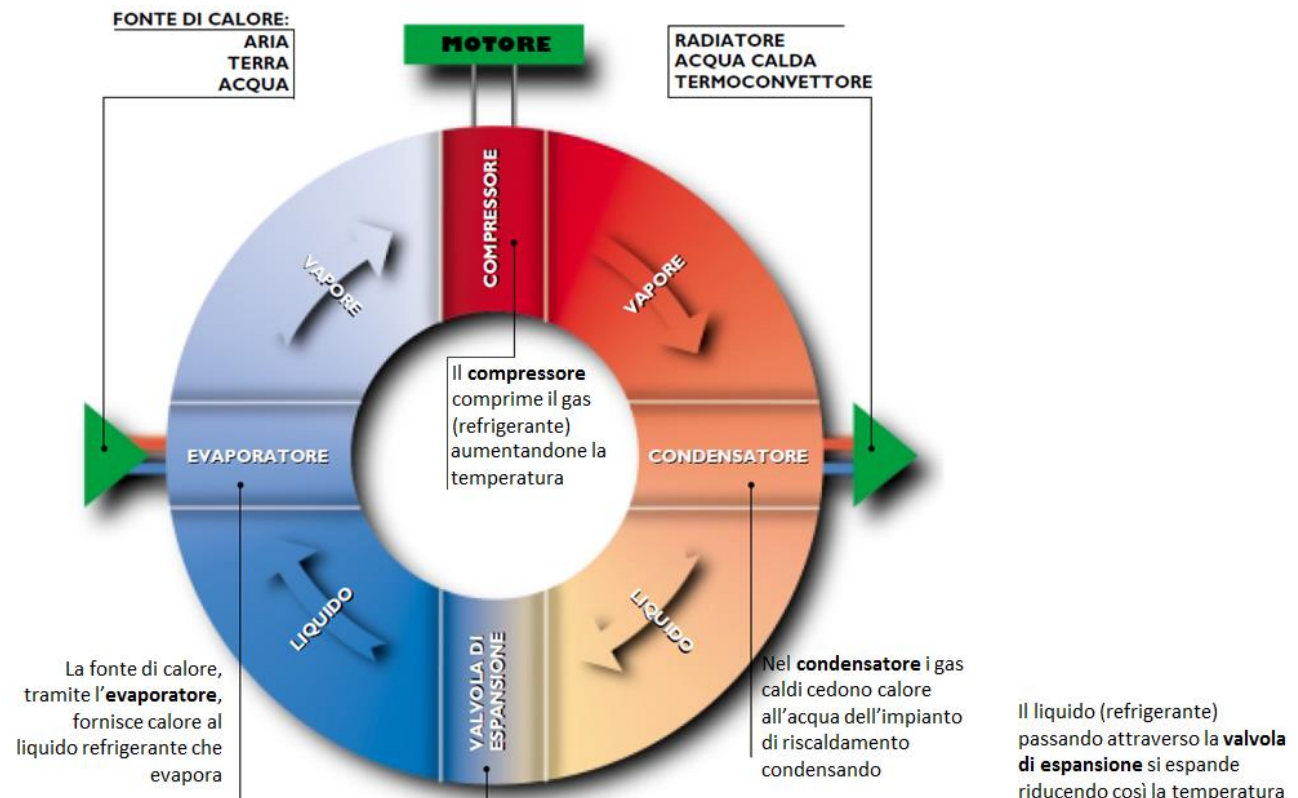


Figura A.2.38 Schema di funzionamento della pompa di calore

Efficienza della pompa di calore

Nel corso del suo funzionamento, la pompa di calore:

- consuma energia elettrica nel compressore
- assorbe calore nell'evaporatore, dal mezzo circostante (*sorgente fredda*), che può essere aria, acqua o terreno
- cede calore al mezzo da riscaldare (*pozzo caldo*) nel condensatore (aria o acqua)

Il vantaggio dell'uso della pompa di calore deriva dalla capacità di fornire più energia (calore) di quella elettrica impiegata per il suo funzionamento, in quanto estrae calore dall'ambiente esterno.

L'efficienza di una pompa di calore (in modalità riscaldamento) è misurata dal coefficiente di prestazione *COP*, calcolato come il rapporto tra energia fornita (calore ceduto al mezzo da riscaldare) ed energia elettrica consumata (vedi anche Figura A.2.37):

$$COP = \frac{Q_1 [kW]}{L [kW]} = \frac{T_1}{T_1 - T_0}$$

Esso è variabile a seconda del tipo di pompa di calore e delle condizioni di funzionamento, ed ha generalmente valori prossimi a 3, il che significa che per 1 kWh di energia elettrica consumato l'impianto fornirà 3 kWh di calore al mezzo da riscaldare.

Il COP sarà tanto maggiore quanto più bassa è la temperatura a cui il calore viene ceduto (nel condensatore) e quanto più alta quella della sorgente da cui viene assorbito (nell'evaporatore). Inoltre, va tenuto conto che la potenza termica resa dalla pompa di calore dipende dalla temperatura a cui la stessa assorbe calore.

In modalità raffrescamento, si utilizza, invece, l'EER (Energy Efficiency Ratio), che in modo del tutto analogo è pari al rapporto tra la potenza frigorifera fornita all'ambiente climatizzato e l'energia elettrica assorbita (vedi anche Figura A.2.37):

$$EER = \frac{Q_0 [kW]}{L [kW]} = \frac{T_1}{T_0 - T_1}$$

Le pompe di calore possono distinguersi a seconda delle tipologie di sorgente fredda utilizzata; le principali sorgenti fredde sono:

- l'aria esterna al locale dove è installata la pompa.
- l'acqua di falda, di fiume o di lago, quando queste sono presenti e disponibili in prossimità dei locali da riscaldare e a ridotta profondità.
- il terreno, nel quale vengono inserite particolari tubazioni, che fanno capo all'energia geotermica

Il calore può essere ceduto all'ambiente da riscaldare (*pozzo caldo*) attraverso:

- *ventilconvettori*, costituiti da armadietti nei quali l'aria viene fatta circolare sopra corpi scaldanti;
- *serpentine* inserite nel pavimento, nelle quali circola acqua calda;
- *canalizzazioni*, che trasferiscono direttamente il calore prodotto dalla pompa ai diversi locali.

Le diverse taglie della pompa di calore

- Piccola potenza: fino a 5 kW, adatte a monolocali e piccoli appartamenti, utilizzabili anche per il riscaldamento di ACS
- Media potenza: da 10 a 25 kW, adatte a servire più locali e appartamenti
- Grande potenza: oltre 30 kW, per più appartamenti, per uffici ed esercizi commerciali

Pompe di calore ad aria esterna

L'aria esterna costituisce una fonte sempre disponibile e illimitata, ma il suo utilizzo è legato all'impiego di opportuni ventilatori per movimentarla e alla variabilità della sua temperatura: la potenza resa dalla pompa di calore, infatti, diminuisce con la temperatura della sorgente. Un altro fattore da considerare nell'uso dell'aria esterna come sorgente calda è quello del sistema di sbrinamento automatico, che si rende necessario qualora le condizioni climatiche del luogo comportino lunghi periodi di funzionamento nell'intorno degli 0 °C. Il COP medio per impianti di questo tipo si attesta su valori compresi tra 2 e 3,5.

Pompe di calore ad acqua

Considerando la temperatura alla quale l'acqua è normalmente disponibile e considerando la ridotta variazione di temperatura che presenta al variare delle condizioni climatiche stagionali, l'utilizzo dell'acqua come sorgente calda consente prestazioni più stabili ed efficienti. L'acqua utilizzata può essere di falda o superficiale (di fiume, di lago o di mare) e le variazioni di temperatura nel corso dei mesi si riducono in base al volume d'acqua complessivo. In particolare le acque di falda sono disponibili a temperature tra i 10 e 15 °C e rimangono pressoché costanti durante l'anno. L'utilizzo dell'acqua consente di ottenere COP medi stagionali superiori a 3 e per questo è evidente la miglior resa in termini di efficienza energetica delle pompe di calore acqua-acqua rispetto a quelle aria-aria.

D'altra parte, però, questi sistemi richiedono costi addizionali non indifferenti relativi ai sistemi di captazione dell'acqua: mentre le acque di falda possono essere captate ed utilizzate direttamente, vista la loro temperatura praticamente costante, le relativamente elevate variazioni della temperatura dell'acqua di superficie normalmente non permettono un impiego diretto. Quindi nella maggior parte dei casi avviene un utilizzo indiretto: la fonte di calore cede la propria energia ad uno scambiatore, collegato alla pompa di calore mediante un circuito intermedio.

Per gli impianti a captazione di acque superficiali per ogni kW di fabbisogno energetico sono necessari indicativamente 300 – 400 l/h d'acqua, mentre 150 – 200 l/h per gli impianti ad acqua di falda.

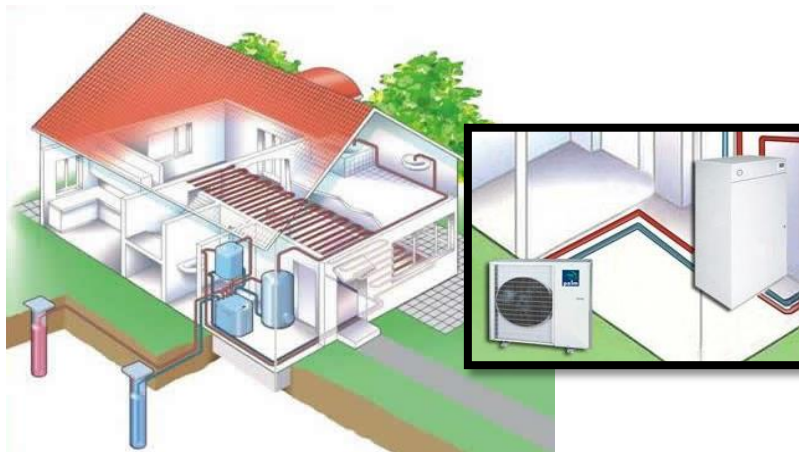


Figura A.2.39 Sezione di una casa con impianto a PdC ad acqua di falda, e (nel riquadro) ad aria

Pompe di calore ed energia geotermica

L'energia geotermica è l'energia che si trova nel sottosuolo sotto forma di calore. All'interno della terra sono immagazzinate enormi quantità di calore, che derivano in maggior parte dal decadimento delle sostanze radioattive contenute negli strati più profondi della superficie terrestre.

Il flusso geotermico totale attraverso la superficie terrestre è di una quantità enorme, pari a 40 miliardi kW, di cui, attraverso varie tecnologie per lo sfruttamento dell'energia geotermica, è tecnicamente possibile usare solo una piccola frazione.

Vicino alla superficie terrestre la temperatura è una combinazione della radiazione solare e del flusso geotermico. In confronto alla radiazione solare che ha un valore di circa 200 W/m^2 , il flusso geotermico è molto piccolo con valori intorno a 50 a 100 mW/m^2 . Il sistema geotermico può essere paragonato ad una batteria che viene caricata con una corrente molto bassa. L'estrazione dell'energia geotermica di conseguenza deve essere fatta con una certa cautela, evitando l'estrazione di quantità troppo elevate in poco tempo.

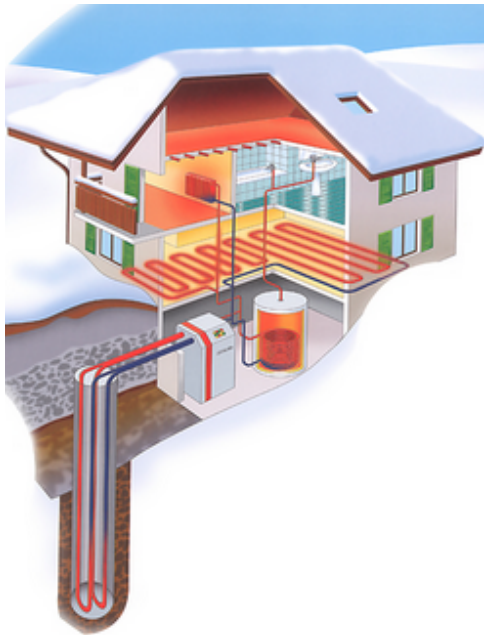
Il più comune criterio di classificazione delle risorse geotermiche si basa sull'entalpia dei fluidi, che trasferiscono il calore dalle rocce calde profonde (o più semplicemente dal suolo) alla superficie:

- energia geotermica *ad elevata entalpia*, che consente l'uso di acqua surriscaldata e vapori a più di 180°C . È adatta alla generazione di energia elettrica;
- energia geotermica *a media entalpia*, che consente l'uso di acqua surriscaldata e vapori a temperature comprese fra 100 e 180°C . Adatta alla produzione sia di elettricità che per usi diretti del calore;
- energia geotermica *a bassa entalpia*, che consente l'uso di fluidi a temperature inferiori a 30°C . Le principali applicazioni riguardano la climatizzazione degli edifici e la produzione di ACS grazie alle pompe di calore.

In questo lavoro considereremo esclusivamente quest'ultima categoria, in quanto meno dipendente dalle condizioni del luogo (i primi richiedono siti caratterizzati da condizioni termiche ed idrologiche ben precise) e maggiormente compatibili anche con ambienti urbani. Tra gli impianti geotermici a bassa entalpia considereremo, quindi, le seguenti tipologie di scambiatori a elevata e a bassa profondità:

Le sonde geotermiche sono scambiatori di calore verticali ad elevata profondità (vedi Figura A.2.40), con lunghezze da 50 a oltre 200 m (solitamente intorno ai 100 m), costituite da tubi a U (o a doppia U) ad elevata trasmittanza, contenenti un fluido termovettore, che "trasporta" in superficie il calore assorbito dal terreno. Per un unico impianto sono richiesti più pozzi a seconda del fabbisogno termico da soddisfare e della resa del sottosuolo. Alle profondità suddette il terreno mantiene una temperatura che si aggira intorno ai 15°C , senza risentire delle variazioni climatiche esterne.

Gli *scambiatori a bassa profondità* sono degli scambiatori di calore in materiale plastico messi orizzontalmente nel terreno a $1 - 4 \text{ m}$ di profondità, che possono essere disposti secondo diverse forme: a serpentine, ad anelli, a spirale e a canestri (vedi Figura A.2.41). Gli scambiatori geotermici captano dal terreno principalmente il calore ceduto al terreno stesso tramite l'irraggiamento solare e la pioggia. Questa soluzione richiede minori investimenti iniziali rispetto alla soluzione precedente, a causa delle mancate spese di perforazione; d'altra parte è una soluzione meno efficiente poiché gli strati più superficiali risentono maggiormente delle variazioni climatiche esterne. Sono richieste inoltre superfici di terreno molto ampie, fino anche a due volte la superficie da climatizzare.



Tipo sottosuolo	Resa (W/m)
Sottosuolo povero e sedimenti secchi	20
Sottosuolo roccioso e sedimenti poveri d'acqua	50
Roccia consolidata con elevata conducibilità	70
Ghiaia e sabbie secche	<20
Ghiaia e sabbie sature d'acqua	55-65
Ghiaia e sabbia con notevole flusso di acqua di falda	80-100
Argilla	30-40
Calcare	45-60
Arenaria	55-65
Rocce magmatiche silicee (granito)	55-70
Rocce magmatiche basiche (basalto)	35-55

Figura A.2.40 Spaccato di un impianto a sonda geotermica e tabella dei valori con le rese delle principali tipologie di sottosuolo per sonde geotermiche verticali (fonte: Caleffi, Idraulica)

Scambiatori a serpentini e a chiocciola		Scambiatori ad anello		Scambiatori a spirale	
Rendimenti specifici		Rendimenti specifici (anello singolo)		Rendimenti specifici	
Tipo sottosuolo	(W/m ²)	Tipo sottosuolo	(W/m)	Tipo sottosuolo	(W/m ²)
Sabbioso secco	10-15	Sabbioso secco	4-6	Sabbioso secco	7-10
Sabbioso umido	15-20	Sabbioso umido	6-8	Sabbioso umido	10-13
Argilloso secco	20-25	Argilloso secco	8-10	Argilloso secco	13-16
Argilloso umido	25-30	Argilloso umido	10-12	Argilloso umido	16-20
Saturo d'acqua	30-40	Saturo d'acqua	12-16	Saturo d'acqua	20-26

Figura A.2.41 Rendimenti per unità di superficie o di lunghezza dei principali scambiatori a bassa profondità (fonte: Caleffi, Idraulica)

Infine, si ha la possibilità di combinare impianti a pompa di calore con impianti ad energia solare, adottando per esempio un impianto fotovoltaico per la produzione dell'energia elettrica necessaria alla pompa, oppure un impianto solare termico per pre-riscaldare l'acqua come fonte di calore in ingresso alla pompa, incrementando l'efficienza e diminuendo i costi di produzione dell'energia termica.

<ul style="list-style-type: none"> • Efficienze molto elevate (si utilizza mediamente il 70% di energia in meno rispetto impianti tradizionali per fornire la stessa energia termica) • Assenza di emissioni inquinanti (nel caso in cui l'energia elettrica sia fornita da FER) • Calore estratto da suolo, aria o acqua esterne è libero e praticamente illimitato • Ampio range di potenze erogabili • Possibilità di fornire sia calore in inverno che fresco d'estate 	<ul style="list-style-type: none"> • Efficienza inversamente proporzionale alla temperatura esterna • Elevati investimenti iniziali • Ampi spazi necessari ed interventi e costi impegnativi, nel caso di pompe geotermiche
---	--

Figura A.2.42 Vantaggi e svantaggi di impianti di a pompa di calore

Energia dal vento

Introduzione

L'energia eolica è, ovviamente, l'energia generata grazie al vento. La più importante forma di impiego dell'energia eolica è quella relativa alla produzione di energia elettrica attraverso i generatori eolici, ovvero aerogeneratori. L'energia elettrica si ottiene sfruttando l'energia cinetica del vento: le masse d'aria in movimento ad una velocità sufficientemente sostenuta fanno girare le pale di un elica; queste a loro volta sono collegate ad un generatore che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica.

Come noto, l'utilizzo dell'energia eolica nella sua forma attuale rappresenta il perfezionamento di una tecnologia di produzione energetica già impiegata dall'uomo nel corso di molti secoli. L'energia del vento è infatti stata sfruttata dall'uomo sin dall'antichità sia per la propulsione a vela, sia per la produzione di energia meccanica attraverso i primi rudimentali mulini a vento che azionavano macine e sistemi per il sollevamento dell'acqua.

L'energia eolica è una delle forme in cui si presenta l'energia della radiazione solare incidente e della radiazione termica emessa dalla superficie terrestre; i moti convettivi dell'atmosfera sono infatti indotti dai gradienti di temperatura dovuti al riscaldamento non uniforme della troposfera e della superficie terrestre.

Sotto diversi aspetti quella eolica è una fonte di energia molto valida come energia alternativa ai tradizionali combustibili fossili, dal momento che è abbondante, rinnovabile, ampiamente distribuita, pulita e praticamente non produce gas a effetto serra (se non durante la produzione di componenti base, come le pale in alluminio). Il maggior svantaggio è rappresentato, come molte altre fonti rinnovabili, dalla sua caratteristica di intermittenza nella produzione, associata alla necessaria presenza della giusta quantità di vento. Tuttavia la sua diffusione in termini di kilowattora prodotti a livello mondiale è comunque in continua crescita.

Tipologie impiantistiche e classificazioni possibili

In relazione alla taglia delle macchine, è possibile distinguere fra macchine di piccola taglia (*mini e micro-eolico*), costituite da turbine con potenza fino a circa 100 kW e diametro del rotore fino a circa 20 metri, macchine di *media taglia*, costituite da turbine con potenza fino a circa 800 kW e diametro rotorico fino a circa 50 metri ed infine macchine di *grande taglia*, con potenza superiore ad 800 kW e diametro rotorico superiore a 50 metri. In particolare, in quest'ultimo settore sono in fase di avanzata dimostrazione le prime macchine con potenza di 5 MW. Le macchine di media taglia sono attualmente quelle più utilizzate negli impianti eolici italiani, mentre quelle di grande taglia appaiono particolarmente interessanti per le applicazioni off-shore. Negli ultimi anni si stanno diffondendo anche generatori caratterizzati da potenze nell'ordine da qualche centinaia di watt fino a qualche kilowatt, tali impianti si dicono *micro-eolici*. Tale distinzione non è esattamente univoca anche in letteratura, per questo considereremo la classificazione di Tabella A.2.5.

In relazione alla superficie su cui vengono installate le turbine, si ha la distinzione tra turbine *on-shore*, cioè le turbine più diffuse, installate sulla terraferma, e turbine *off-shore*, installate cioè in mezzo al mare. Le caratteristiche dell'eolico on-shore sono tipiche di impianti posizionati su località in genere su colline, alture o comunque in zone aperte e ventose. Questi impianti coprono un range di potenze prodotte molto esteso (da 20 kW a 20 MW) e possono essere connessi sia alla rete "pubblica" sia che su una rete isolata per alimentare utilizzatori locali. Con l'espressione "eolico off-shore" si intendono, invece, gli impianti installati ad alcuni chilometri dalla costa di mari e oceani, per meglio utilizzare la forte esposizione alle correnti di queste zone.

Tabella A.2.5 Classificazione delle turbine eoliche per potenza seguita in questo lavoro di tesi

Taglia		Potenza nominale	Diametro rotore	Altezza palo	Applicazioni tipiche
Piccola taglia	Micro-eolico	< 1 kW	1 - 2 m	2 - 6 m	Imbarcazioni, camper, piccole utenze isolate
		1 - 10 kW	2 - 6 m	6 - 12 m	Abitazioni, strutture commerciali e PMI, installazioni a terra o su tetto anche in ambito urbano, utenze isolate o connesse alla rete
	Mini-eolico	15 - 25 kW	10 - 15 m	18 - 25 m	Agriturismi, camping, strutture commerciali, aziende agricole e PMI, per installazioni a terra e connesse alla rete
		25 - 200 kW	15 - 30 m	25 - 60 m	Aziende agricole e PMI, per installazioni a terra e connesse alla rete
Media taglia		200 - 800 kW	30 - 50 m	60 - 100 m	Installazioni connesse alla rete
Grande taglia		> 800 kW	> 50 m		

A seconda poi della direzione dell'asse di rotazione delle pale si distinguono turbine ad asse orizzontale e turbine ad asse verticale. Le prime presentano la più tipica configurazione bipala o tripala, è sono formate da una torre in acciaio di altezze tra i 60 e i 100 metri sulla cui sommità si trova un involucro (gondola) che contiene un elettrico azionato da un rotore a pale lunghe tra i 20 e i 60 metri (solitamente 3, quasi mai 2, raramente 1). Esso genera una potenza molto variabile, che può andare da pochi kW fino a 5-6 MW, in funzione della ventosità del luogo e del tempo. Un generatore eolico ad asse di rotazione verticale è un tipo di macchina eolica contraddistinta da una ridotta quantità di parti mobili nella sua struttura, il che le conferisce un'alta resistenza alle forti raffiche di vento, e la possibilità di sfruttare qualsiasi direzione del vento senza doversi riorientare continuamente. È una macchina molto versatile, adatta in particolare all'uso domestico o comunque urbano.

Step fondamentale prima della realizzazione di un impianto eolico è la stima della ventosità del sito, che definisca quindi l'energia che fornirà l'impianto in questione. Per conoscere, però, in modo molto preciso tale potenzialità è indispensabile un'accurata misurazione locale sia della velocità del vento, sia della sua direzione. A tal fine vengono installate stazioni anemometriche in corrispondenza dei siti in cui si intende installare un impianto, costituite solitamente da un palo, due sensori ed una centralina.

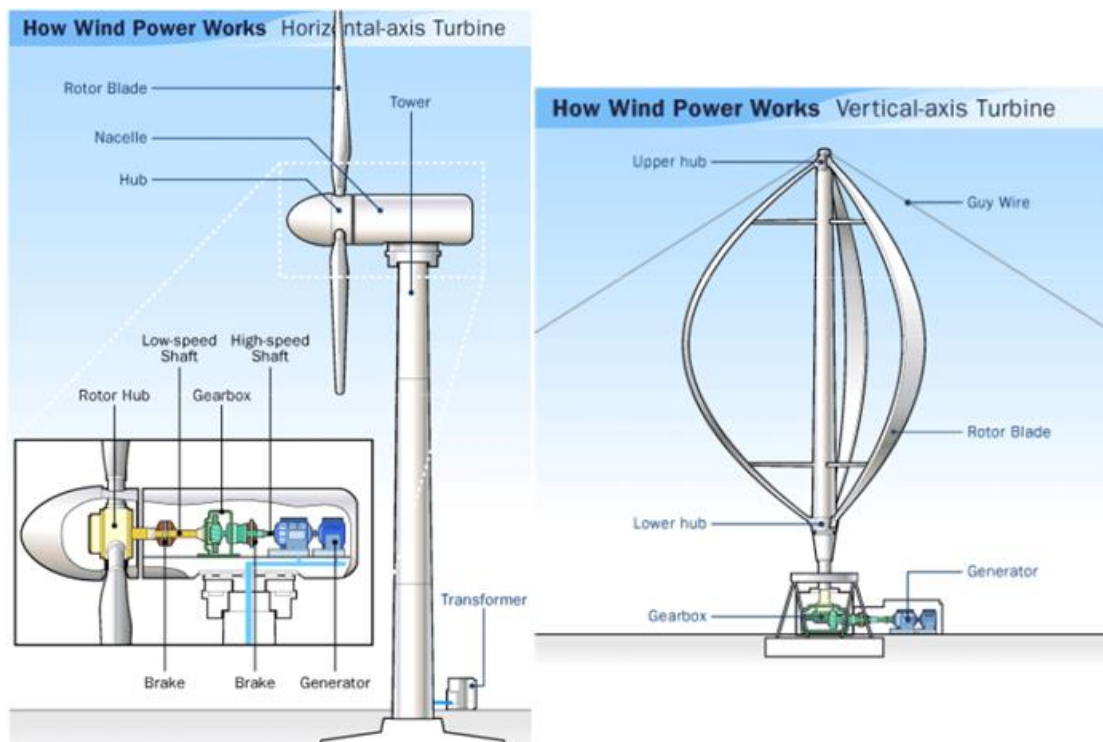


Figura A.2.43 Schema e componenti di una turbina eolica ad asse orizzontale (a sinistra) ed una ad asse verticale (a destra)

Impatto ambientale

Gli impianti eolici sono estranei da quelle forme di impatto ambientale tipiche delle centrali termoelettriche convenzionali basate sull'impiego di combustibili fossili, quali la produzione di effluenti gassosi, liquidi e solidi. D'altra parte, per tale tipologia di impianto risultano importanti altre forme di impatto ambientale quali, in particolare, l'occupazione del territorio, l'impatto visivo, le emissioni acustiche, le emissioni elettromagnetiche e le possibili interferenze con la flora e la fauna. Il rapporto fra la potenza installata e la superficie del territorio complessivamente richiesto dagli impianti eolici è dell'ordine di 10 W/m^2 , ovvero circa 100 kW/ha . Tuttavia, la superficie di territorio effettivamente sottratta agli altri usi (pascolo, agricoltura, ecc.) è dell'ordine del 2-3% del totale (essenzialmente quella occupata dalle strade e dalle piazzole delle turbine), in relazione alla notevole spaziatura fra le macchine. Le interferenze con la flora sono di solito molto modeste (almeno negli impianti realizzati con cura) e limitate alla fase di realizzazione dell'impianto (sbancamenti per le strade di accesso e di collegamento fra le macchine, scavi per cavidotti e fondazioni). I possibili problemi sulla fauna sono legati alla possibilità di urti dei volatili, specie di alcuni rapaci, contro le pale delle turbine. Le specie migratorie sembrano adattarsi meglio alla presenza delle turbine, e comunque il numero annuo di collisioni è limitato. Ulteriori problemi secondari possono sorgere in merito al possibile disturbo di natura elettromagnetica arrecato alle trasmissioni radio e TV. L'impatto visivo è essenzialmente un problema di percezione e integrazione complessiva delle turbine eoliche nel paesaggio. Infatti, gli aerogeneratori, per la loro altezza sono visibili in qualunque contesto, anche se in misura più o meno evidente a seconda dell'orografia del territorio. Evidentemente l'impatto visivo è legato alla altezza e al numero delle macchine installate, e aumenta con il crescere di tali parametri.

Componenti dell'impianto

Di seguito i componenti principali di una turbina eolica, componenti presenti, anche se in forme e dimensioni diverse, in impianti sia ad asse orizzontale che verticale.

Il rotore è costituito da un mozzo sul quale sono fissate le pale, in un modo tale che possano ruotare già a velocità del vento contenute. Le pale più utilizzate sono realizzate in fibra di vetro. I rotori a due pale sono meno costosi e girano a velocità più elevate. Sono però più rumorosi e vibrano di più di quelli a tre pale. Tra i due la resa

energetica è quasi equivalente. Sono stati realizzati anche rotor con una sola pala, equilibrata da un contrappeso. A parità di condizioni, questi rotor sono ancor più veloci dei bipala, ma hanno rese energetiche leggermente inferiori.

Il sistema frenante è costituito da due sistemi indipendenti di arresto delle pale: un sistema di frenaggio aerodinamico e uno meccanico. Il primo viene utilizzato per controllare la potenza dell'aerogeneratore, come freno di emergenza in caso di sovra-velocità del vento e per arrestare il rotore. Il secondo viene utilizzato per completare l'arresto del rotore e come freno di stazionamento.

La torre sostiene la navicella e il rotore, può essere a forma tubolare o a traliccio. In genere è costruita in legno, in cemento armato, in acciaio o con fibre sintetiche. La struttura dell'aerogeneratore per poter resistere alle oscillazioni ed alle vibrazioni causate dalla pressione del vento deve essere ancorata al terreno mediante fondamenta.

Il moltiplicatore di giri serve per trasformare la rotazione lenta delle pale in una rotazione più veloce in grado di far funzionare il generatore di elettricità.

Il generatore è quell'elemento che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica. La potenza del generatore viene indicata in chilowatt (kW).

Il funzionamento di un aerogeneratore è gestito da un sistema di controllo che svolge due diverse funzioni. Gestisce, automaticamente e non, l'aerogeneratore nelle diverse operazioni di lavoro e aziona il dispositivo di sicurezza che blocca il funzionamento dell'aerogeneratore in caso di malfunzionamento e di sovraccarico dovuto ad eccessiva velocità del vento.

La navicella è una cabina in cui sono ubicati tutti i componenti di un aerogeneratore, ad eccezione, naturalmente, del rotore e del mozzo. La navicella è posizionata sulla cima della torre e può girare di 180° sul proprio asse, in quanto per assicurare sempre il massimo rendimento dell'aerogeneratore è importante mantenere un allineamento più continuo possibile tra l'asse del rotore e la direzione del vento. Negli aerogeneratori di media e grossa taglia, l'allineamento è garantito da un servomeccanismo, detto sistema di imbardata, mentre nei piccoli aerogeneratori è sufficiente l'impiego di una pinna direzionale. Nel sistema di imbardata un sensore, la banderuola, indica lo scostamento dell'asse della direzione del vento e aziona un motore che riallinea la navicella.


<p><i>Turbine ad asse orizzontale</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia matura ed efficiente • Adatte regimi anemologici italiani • Economiche (all'incirca da 2000 a 5000 €/kW) <p><i>Turbine ad asse verticale</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Adatte all'ambiente urbano • Poco rumorose • Meno impattanti visivamente 		<ul style="list-style-type: none"> • Non adatte all'ambiente urbano • Impatto visivo e paesaggistico maggiore • Forte consumo di suolo (in particolare in fase di cantiere) • Impatto su flora e fauna • Meno adatte ai regimi anemologici italiani • Meno economiche (prezzi superiori a 5000 €/kW, fino a 15/20000 €/kW)
--	---	--

Figura A.2.44 Vantaggi e svantaggi della produzione di energia elettrica mediante turbine eoliche

Mini-eolico e micro-eolico

Come detto, in questo lavoro si sono considerati esclusivamente quelle tipologie di impianti compatibili con la scala urbana, o comunque meno invasive sotto tutti i diversi punti di vista. Per questo considereremo impianti di tipo micro-eolico e piccoli impianti mini-eolici, caratterizzati da potenze entro i 20 kW, e con altezze inferiori a 25 metri e diametri del rotore circa entro 10 metri. Per questo, seguendo la classificazione di Tabella A.2.5, considereremo impianti micro-eolici in tutto il loro range di potenze ($P < 20$ kW) mentre tra gli impianti mini-

eolici considereremo i meno potenti, cioè quelli entro i 20-25 kW di potenza. In particolare, per il micro-eolico si sono considerate turbine sia ad asse verticale che orizzontale, mentre per il mini-eolico esclusivamente quelle ad asse orizzontale.

Il mini-eolico

Una posizione di notevole importanza è rivestita dallo sviluppo tecnologico che questo tipo di turbine di piccola taglia hanno registrato negli ultimi anni. Tali tecnologie hanno raggiunto ottimi livelli proprio grazie alle modalità maturate sulla base di quelle per turbine di grande taglia che vede come risultato principale quello di aver ottenuto un notevole abbassamento del limite minimo di funzionamento degli aerogeneratori, che possono iniziare a produrre energia con velocità del vento inferiori anche a 2 m/s.

Le turbine mini-eoliche ad asse orizzontale hanno il vantaggio di essere:

- tecnologicamente mature ed efficienti;
- adatte ai regimi anemologici italiani;
- economiche (i prezzi variano da 6000 a 2000 €/kW a seconda della taglia e sono a questa inversamente proporzionali).


Gli svantaggi sono, invece, di NON essere adatte all'ambiente urbano, di essere rumorose e di avere, anche se di dimensioni nettamente inferiori rispetto alle turbine di taglia superiore, impatto visivo.

La maggior parte delle turbine utilizza pale realizzate in materiale compositi: fibre di vetro rinforzato, con minor frequenza, fibre di carbonio e, raramente, legno. È stato abbandonato l'utilizzo di alluminio a causa della sua propensione alla deformazione sotto sforzo. Il principio di produzione e la componentistica meccanica è la stessa delle turbine più potenti, anche se le dimensioni ridotte non consentono l'alloggio di motori di imbardata o altri componenti di cui sono dotate le turbine di taglia superiore: quasi tutte le mini turbine montano timoni direzionali per orientare il rotore in direzione del vento.

Si è deciso di considerare questa tipologia impiantistica sebbene non esattamente adatta al contesto urbano, in quanto in situazioni particolari, come ad esempio aree commerciali isolate, aree industriali, zone portuali, utenze isolate o urbane periferiche, possono fornire un utile contributo. In ogni caso, si è deciso di considerare impianti entro i 25-30 kW di potenza ed entro i 25 m di altezza, evitando quindi quelle tipologie impiantistiche maggiormente impattanti sul contesto urbano o peri-urbano, e cioè visivamente e acusticamente.

Di seguito una semplice scheda di un impianto mini-eolico tipo considerato nei successivi calcoli:

Tabella A.2.6 Caratteristiche generali di una delle turbine mini-eoliche considerate

	<i>Ditta produttrice</i>	Società Elettrica Italiana
	<i>Modello</i>	RPIsh 20/11
	<i>Potenza</i>	20 kW
	<i>Energia erogata con 6 m/s di ventosità media</i>	55.000 kWh/anno
	<i>Diametro rotore</i>	10 m
	<i>Altezza torre</i>	18-24 m
	<i>Velocità di cut-in</i>	3 m/s
	<i>Velocità di cut-off</i>	25 m/s
	<i>Velocità nominale</i>	10 m/s

Il micro-eolico

Il *micro-eolico* è l'eolico caratterizzato da piccole taglie di potenza, in pratica comprese fra 0 e 20 kW ossia comprende sia aerogeneratori di *piccolissima taglia* (0-5 kW) sia aerogeneratori di *piccola taglia* (tra i 5 e i 20 kW) pertanto, è possibile realizzare sia sistemi autonomi (*stand-alone*), di solito impiegati per utenze isolate o per piccole applicazioni particolari, che impianti connessi in rete (*grid-connected*). Gli impianti mini-eolici, purché correttamente dimensionati, risultano adatti ai fabbisogni energetici sia di abitazioni private che di utenze commerciali e agricole di piccole dimensioni. Essi utilizzano sia aerogeneratori "ad asse verticale" (*eolico verticale*), più adatti per l'ambiente urbano ed ai regimi di vento cittadini, che solitamente sono turbolenti, con vento di direzione e portata variabili, sia i classici aerogeneratori "ad asse orizzontale" (*eolico orizzontale*), indicati per gli spazi aperti. I generatori ad asse verticale non hanno bisogno di orientamento, in quanto offrono al vento la superficie utile in un arco di 360°, si azionano a piccole velocità del vento e hanno una maggiore resistenza alle alte velocità dei venti e alla loro turbolenza, lo scarso ingombro e la compattezza li rendono una soluzione interessante per condomini, per edifici con tetti e per piccoli terrazzi. I generatori ad asse orizzontale, invece, assomigliano a dei "mulini a vento". Possono essere orientati tramite una deriva posta "a valle" delle pale, in modo che queste possano essere sempre posizionate perpendicolari al vento, di facile inserimento in qualsiasi tipologia di territorio, sono particolarmente adatti alle aree agricole.

Di seguito le schede di impianti micro-eolici tipo, uno ad asse orizzontale ed uno ad asse verticale) considerati nei successivi calcoli:

Tabella A.2.7 Caratteristiche generali di una delle turbine micro-eoliche ad asse orizzontale considerate

Ditta produttrice	Società Elettrica Italiana
Modello	SEI-BNY 3/4
Potenza	3 kW
Energia erogata con 6 m/s di ventosità media	7.400 kWh/anno
Diametro rotore	4 m
Altezza torre	7 - 12 m
Velocità di cut-in	3,5 m/s
Velocità di cut-off	20 m/s
Velocità nominale	12 m/s

Tabella A.2.8 Caratteristiche generali di una delle turbine micro-eoliche ad asse verticale considerate

	Ditta produttrice	ROPATEC
	Modello	Maxi vertical
	Potenza	6 kW
	Energia erogata con 6 m/s di ventosità media	6.800 kWh/anno
	Diametro rotore	4 m
	Altezza torre	8 m
	Velocità di cut-in	3 m/s
	Velocità di cut-off	25 m/s
	Velocità nominale	14 m/s

<ul style="list-style-type: none"> • Minore occupazione di suolo • Minore rumorosità • Nessun impatto su flora e fauna • Maggiore versatilità di collocamento 	+	<ul style="list-style-type: none"> • Minore produttività dell'impianto • Costi maggiori • Tecnologia meno matura rispetto grandi impianti • In ambito urbano ventosità minore e più disturbata
---	---	--

Figura A.2.45 Vantaggi e svantaggi di turbine mini e micro-eoliche



Figura A.2.46 Alcuni esempi di turbine micro-eoliche integrate in ambito urbano

APPENDICE III

Dati dei campioni di tessuto urbano considerati

In quest'appendice vengono presentati alcuni dati (geometrici, urbanistici, ...) dei 25 campioni di tessuto urbano (5 campioni per le 5 tipologie di tessuto), i cui consumi sono stati analizzati nel paragrafo 4.3.

Campioni del tessuto *Detached Housing* (DH)

Tabella A.3.9 Dati riassuntivi dei campioni *Detached Housing*

		DH01	DH02	DH03	DH04	DH05	Unità di misura
EDIFICI	N° edifici considerati	110	37	38	200	24	-
SUPERFICIE	Sup tot edifici (lorda)	110.010	39.203	28.809	20.523	10.546	mq
	Sup media edificio (lorda)	100	1.059	758	103	439	mq
VOLUME	Volume tot edifici (lordo)	67.434	322.455	177.527	137.397	64.023	mc
	Volume medio per edificio	613	8.715	4.672	687	2.667	mc
ALTEZZA EDIFICI	Altezza media	6	7	5,7	6,6	6,4	m
	Altezza minima	3,7	3	3,7	3,8	4,2	m
	Altezza massima	9,8	19	8,2	12,3	15	m
NUMERO PIANI	Edifici con 1 piano	7	8	7	34	3	-
	Edifici con 2 piani	78	18	25	85	17	-
	Edifici con 3 piani	25	5	6	79	2	-
	Edifici con 4 piani	0	3	0	2	1	-
	Edifici con 5 piani	0	1	0	0	1	-
	Edifici con 6 piani	0	1	0	0	0	-
	Edifici con 7 piani	0	1	0	0	0	-
	Edifici > 7 piani	0	0	0	0	0	-
	N° di piani medio	2,1	2,4	2	2,2	2,2	-
TIPOLOGIE EDILIZIE	N°Case monofamiliari	76	11	15	76	4	-
	N°Case a schiera	9	14	15	9	14	-
	N°Edifici multifamiliari	25	6	8	25	4	-
	N°Blocchi di appartamenti	0	6	0	0	2	-
	Tipologia prevalente	Casa Monofamiliare	Casa a schiera	Casa monofamiliare	Casa monofamiliare	Casa a schiera	-
CLASSI D'Età	N°Edifici <1919	0	0	0	0	0	-
	N°Edifici 1919-1945	0	0	0	0	24	-
	N°Edifici 1946-1961	110	0	0	80	0	-
	N°Edifici 1962-1971	0	37	38	52	0	-
	N°Edifici 1972-1981	0	0	0	68	0	-
	N°Edifici 1982-1991	0	0	0	0	0	-
	N°Edifici >1991	0	0	0	0	0	-
	Cl. d'età prevalente	1946-1961	1962-1971	1962-1971	1946-1961	1919-1945	-
ABITAZIONI	Abitazioni totali	303	34	74	339	12	abitaz
	Sup tot abitazioni	21.058	3.188	6.038	29.889	779	mq/abitaz
	Sup media abitazioni tot	69	94	177	88	65	mq
ABITANTI	N° abitanti totali	687	107	155	754	34	ab
	N° medio abitanti per abitazione	2,3	3,1	2,1	200	24	ab/abitaz

Campioni del tessuto *Traditional Urban Block* (TUB)

Tabella A.3.10 Dati riassuntivi dei campioni di tessuto *Traditional Urban Block*

		TUB01	TUB02	TUB03	TUB04	TUB05	Unità di misura
EDIFICI	N° edifici considerati	178	94	152	135	73	-
SUPERFICIE	Sup tot edifici (lorda)	101.614	60.627	110.245	76.667	44.905	mq
	Sup media edificio (lorda)	571	645	725	568	315	mq
VOLUME	Volume tot edifici (lordo)	1.855.782	981.810	1.961.767	1.290.821	847.094	mc
	Volume medio per edificio	10.426	10.445	12.906	9.562	11.604	mc
ALTEZZA EDIFICI	Altezza media	17	16	17	16	18	m
	Altezza minima	4	6	7	3,8	8	m
	Altezza massima	29	28	33	29	29	m
NUMERO PIANI	Edifici con 1 piano	1	0	0	1	0	-
	Edifici con 2 piani	5	1	0	1	0	-
	Edifici con 3 piani	11	5	3	6	2	-
	Edifici con 4 piani	20	16	18	28	9	-
	Edifici con 5 piani	30	37	55	42	14	-
	Edifici con 6 piani	40	14	44	21	18	-
	Edifici con 7 piani	41	12	19	13	11	-
	Edifici > 7 piani	30	9	13	8	19	-
	N° di piani medio	5,9	5,4	5,7	5,3	6,2	
TIPOLOGIE EDILIZIE	N°Case monofamiliari	3	0	0	1	0	-
	N°Case a schiera	3	1	0	1	0	-
	N°Edifici multifamiliari	14	6	3	6	5	-
	N°Blocchi di appartamenti	158	87	149	127	68	-
	Tipologia prevalente	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	-
CLASSI D'Età	N°Edifici <1919	165	48	113	88	58	-
	N°Edifici 1919-1945	13	32	23	23	15	-
	N°Edifici 1946-1961	0	14	16	24	0	-
	N°Edifici 1962-1971	0	0	0	0	0	-
	N°Edifici 1972-1981	0	0	0	0	0	-
	N°Edifici 1982-1991	0	0	0	0	0	-
	N°Edifici >1991	0	0	0	0	0	-
	Classe d'età prevalente	<1919	<1919	<1919	<1919	<1919	-
ABITAZIONI	Abitazioni totali	1.934	920	687	1.328	455	abitaz
	Sup tot abitazioni	252.043	98.508	97.255	133.129	42.638	mq/abitaz
	Sup media abitazioni tot	130	107	142	100	94	mq
ABITANTI	N° abitanti totali	3.846	1.623	1.132	2.085	798	ab
	N° medio abitanti per abitazione	1,9	1,8	1,7	1,6	1,8	ab/abitaz

Campioni del tessuto *Regular Urban Block* (RUB)

Tabella A.3.11 Dati riassuntivi del campione di tessuto *Regular Urban Block* (RUB)

		RUB01	RUB02	RUB03	RUB04	RUB05	Unità di misura
EDIFICI	N° edifici considerati	118	240	251	147	106	-
SUPERFICIE	Sup tot edifici (lorda)	57.687	94.921	76.610	53.811	45.852	mq
	Sup media edificio (lorda)	489	395	305	366	433	mq
VOLUME	Volume tot edifici (lordo)	890.895	1.808.161	1.476.131	877.707	92.9497	mc
	Volume medio per edificio	7.550	7.534	5.881	5.971	8.769	mc
ALTEZZA EDIFICI	Altezza media	15	18,7	16,9	15,9	18,9	m
	Altezza minima	4,3	3,4	5,2	4,2	4,9	m
	Altezza massima	31,9	33,8	31,8	30,2	30,3	m
NUMERO PIANI	Edifici con 1 piano	1	1	0	1	0	-
	Edifici con 2 piani	10	6	5	3	6	-
	Edifici con 3 piani	20	24	44	17	8	-
	Edifici con 4 piani	25	24	24	27	10	-
	Edifici con 5 piani	26	25	36	38	11	-
	Edifici con 6 piani	12	53	56	34	16	-
	Edifici con 7 piani	7	50	51	10	21	-
	Edifici > 7 piani	17	57	35	17	34	-
	N° di piani medio	5	6,2	5,6	5,3	6,3	
TIPOLOGIE EDILIZIE	N°Case monofamiliari	3	2	3	2	1	-
	N°Case a schiera	8	4	2	2	5	-
	N°Edifici multifamiliari	24	30	54	22	10	-
	N°Blocchi di appartamenti	83	204	192	121	90	-
	Tipologia prevalente	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	-
CLASSI D'Età	N°Edifici <1919	0	0	2	5	0	-
	N°Edifici 1919-1945	95	180	246	81	10	-
	N°Edifici 1946-1961	15	53	3	59	52	-
	N°Edifici 1962-1971	8	0	0	2	38	-
	N°Edifici 1972-1981	0	0	0	0	6	-
	N°Edifici 1982-1991	0	7	0	0	0	-
	N°Edifici >1991	0	0	0	0	0	-
	Cl. d'età prevalente	1919-1945	1919-1945	1919-1945	1919-1945	1946-1961	-
ABITAZIONI	Abitazioni totali	1.913	3.899	3.083	3.256	2.926	abitaz
	Sup tot abitazioni	144.459	359.152	311.335	223.304	217.033	mq/abitaz
	Sup media abitazioni tot	76	92	101	69	74	mq
ABITANTI	N° abitanti totali	3.494	7.206	6.014	5.900	5.356	ab
	N° medio abitanti per abitazione	1,8	1,8	2,0	1,8	1,8	ab/abitaz

Campioni del tessuto *Slab Housing* (SH)

Tabella A.3.12 Dati riassuntivi dei campioni di tessuti *Slab Housing* (SH)

		SH01	SH02	SH03	SH04	SH05	Unità di misura
EDIFICI	N° edifici considerati	205	47	46	43	39	-
SUPERFICIE	Sup tot edifici (lorda)	108.343	28.473	26.094	31.527	38.419	mq
	Sup media edificio (lorda)	528	606	567	733	729	mq
VOLUME	Volume tot edifici (lordo)	1.840.356	873.987	458.839	688.312	524.557	mc
	Volume medio per edificio	8.977	18.595	9.975	16.007	13.450	mc
ALTEZZA EDIFICI	Altezza media	16,7	30,8	17,1	22,2	20,3	m
	Altezza minima	4,6	17,7	4,7	6,5	5,3	m
	Altezza massima	29,7	32,1	29,7	33,8	45,3	m
NUMERO PIANI	Edifici con 1 piano	0	0	0	0	0	-
	Edifici con 2 piani	7	0	1	1	1	-
	Edifici con 3 piani	11	0	0	0	0	-
	Edifici con 4 piani	26	0	0	4	12	-
	Edifici con 5 piani	76	0	19	8	4	-
	Edifici con 6 piani	35	1	22	3	11	-
	Edifici con 7 piani	14	1	2	4	2	-
	Edifici > 7 piani	36	45	2	23	9	-
	N° di piani medio	5,6	9,9	5,7	7,5	6,6	
TIPOLOGIE EDILIZIE	N°Case monofamiliari	3	0	1	0	0	-
	N°Case a schiera	3	0	0	1	1	-
	N°Edifici multifamiliari	15	0	0	2	0	-
	N°Blocchi di appartamenti	184	47	45	40	38	-
	Tipologia prevalente	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	-
CLASSI D'Età	N°Edifici <1919	9	0	0	0	0	-
	N°Edifici 1919-1945	95	0	8	0	3	-
	N°Edifici 1946-1961	36	8	34	30	11	-
	N°Edifici 1962-1971	45	39	4	9	20	-
	N°Edifici 1972-1981	16	0	0	4	0	-
	N°Edifici 1982-1991	4	0	0	0	0	-
	N°Edifici >1991	0	0	0	0	0	-
	Cl. d'età prevalente	1919-1945	1962-1971	1946-1961	1946-1961	1962-1971	-
ABITAZIONI	Abitazioni totali	8.011	3.309	1.596	1.917	2.292	abitaz
	Sup tot abitazioni	399.375	222.733	113.652	150.774	166.084	mq
	Sup media abitazioni tot	50	67	71	79	72	mq/abitaz
ABITANTI	N° abitanti totali	13.780	7.335	3.333	3.839	4.829	ab
	N° medio abitanti per abitazione	1,7	2,2	2,1	2,0	2,1	ab/abitaz

Campioni del tessuto *Tower Block* (TB)

Tabella A.3.13 Dati riassuntivi dei campioni di tessuto *Tower Block* (TB)

		TB01	TB02	TB03	TB04	TB05	Unità di misura
EDIFICI	N° edifici considerati	34	86	69	169	129	-
SUPERFICIE	Sup tot edifici (lorda)	23.281	49.715	31.113	87.486	71.624	mq
	Sup media edificio (lorda)	685	578	451	518	555	mq
VOLUME	Volume tot edifici (lordo)	494.721	1.504.229	727.835	1.563.931	1.693.561	mc
	Volume medio per edificio	14.551	17.491	10.548	9.254	13.128	mc
ALTEZZA EDIFICI	Altezza media	23	32	23,6	16,4	24,3	m
	Altezza minima	6	4,3	4,6	4,5	7,4	m
	Altezza massima	35	48	55,7	31,2	36	m
NUMERO PIANI	Edifici con 1 piano	0	1	0	0	0	-
	Edifici con 2 piani	2	1	3	14	1	-
	Edifici con 3 piani	0	0	4	25	1	-
	Edifici con 4 piani	1	0	9	8	5	-
	Edifici con 5 piani	4	1	8	39	3	-
	Edifici con 6 piani	7	6	5	36	27	-
	Edifici con 7 piani	3	3	5	17	19	-
	Edifici > 7 piani	17	74	35	30	73	-
	N° di piani medio	7,6	10,7	7,9	5,5	8,1	-
TIPOLOGIE EDILIZIE	N°Case monofamiliari	0	1	2	2	0	-
	N°Case a schiera	2	1	1	10	1	-
	N°Edifici multifamiliari	0	0	6	28	1	-
	N°Blocchi di appartamenti	32	84	60	129	127	-
	Tipologia prevalente	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	Blocchi di Appartamenti	-
CLASSI D'Età	N°Edifici <1919	0	3	0	0	0	-
	N°Edifici 1919-1945	0	1	11	3	9	-
	N°Edifici 1946-1961	0	11	9	80	41	-
	N°Edifici 1962-1971	9	40	35	80	19	-
	N°Edifici 1972-1981	6	11	7	6	55	-
	N°Edifici 1982-1991	18	4	2	0	5	-
	N°Edifici >1991	1	16	5	0	0	-
	Cl. d'età prevalente	1982-1991	1962-1971	1962-1971	1946-1971	1972-1981	-
ABITAZIONI	Abitazioni totali	1.358	4.686	2.079	4.483	5.143	abitaz
	Sup tot abitazioni	100.535	352.981	160.679	341.776	407.507	mq
	Sup media abitazioni tot	74	75	77	76	79	mq/abitaz
ABITANTI	N° abitanti totali	3.421	11.242	4.786	9.618	11.722	ab
	N° medio abitanti per abitazione	2,5	2,4	2,3	2,1	2,3	ab/abitaz

Ringraziamenti

Giunto alla fine di questo lungo e tortuoso percorso di studi, desidero ringraziare tutte quelle persone che mi hanno accompagnato e mi sono state vicine in questo periodo, oltre ovviamente al Prof. Eugenio Morello ed al Dott. Mattia Andrea Rudini per la loro disponibilità, la loro competenza ed il tempo dedicatomi durante lo svolgimento del presente lavoro di tesi.