

## ALLEGATO 7

Stima della potenziale penetrazione delle tecnologie nei settori d'uso  
finali

## Indice

<b>LISTA DELLE ABBREVIAZIONI E DEGLI ACRONIMI UTILIZZATI .....</b>	<b>3</b>
<b>EXECUTIVE SUMMARY .....</b>	<b>4</b>
<b>1 INTRODUZIONE .....</b>	<b>7</b>
1.1 STRUTTURA DEL REPORT .....	7
<b>2 SETTORE EDIFICI .....</b>	<b>8</b>
2.1 STIMA DELLA DOMANDA DI RISCALDAMENTO ATTUALE .....	8
2.1.1 <i>Costruzione del campione di dati da Cened</i> .....	8
2.1.2 <i>Modello di stima della domanda</i> .....	10
2.1.3 <i>Risultati</i> .....	14
2.1.4 <i>Validazione del modello di stima</i> .....	18
2.2 SCENARI DI RIQUALIFICAZIONE .....	19
2.2.1 <i>Curva caratteristica: prestazione termica decrescente</i> .....	19
2.2.2 <i>Scenario di intervento Cened + 2.0</i> .....	20
2.3 IMPIANTI DI RISCALDAMENTO .....	22
2.3.1 <i>Situazione attuale</i> .....	23
2.3.2 <i>Stima delle utenze servibili da teleriscaldamento</i> .....	28
2.3.3 <i>Potenziale penetrazione delle pompe di calore</i> .....	31
2.4 STIMA DELLA DOMANDA DI RAFFRESCAMENTO .....	33
2.5 STIMA DEL POTENZIALE FOTOVOLTAICO (PICCOLI IMPIANTI) .....	39
2.5.1 <i>Situazione attuale</i> .....	40
2.5.2 <i>Stima del potenziale non sfruttato</i> .....	41
<b>3 SETTORE TRASPORTI .....</b>	<b>46</b>
3.1 FOTOGRAFIA DEL PARCO CIRCOLANTE ATTUALE .....	46
3.1.1 <i>Autovetture</i> .....	46
3.1.2 <i>Autobus</i> .....	50
3.1.3 <i>Autocarri merci</i> .....	52
3.1.4 <i>Trattori stradali</i> .....	54
3.1.5 <i>Autoveicoli speciali</i> .....	55
3.1.6 <i>Vendite di combustibile per trasporto su gomma</i> .....	56
3.1.7 <i>Altre modalità di trasporto</i> .....	57
3.1.8 <i>Analisi degli spostamenti critici per il trasporto pubblico</i> .....	58
3.2 POSSIBILI SCENARI DI EVOLUZIONE DELLA DOMANDA DI TRASPORTO E DEL PARCO CIRCOLANTE .....	60
3.2.1 <i>Profili di evoluzione della domanda di passeggeri e merci</i> .....	60
3.2.2 <i>Possibile evoluzione del parco circolante su gomma</i> .....	63
3.2.3 <i>Possibile evoluzione delle altre modalità di trasporto</i> .....	69
3.3 INFRASTRUTTURE DI RICARICA ELETTRICA E RIFORNIMENTO DI COMBUSTIBILI ALTERNATIVI .....	72
3.3.1 <i>Modalità di ricarica e infrastrutture pubbliche</i> .....	72
3.3.2 <i>Possibile evoluzione delle infrastrutture di ricarica elettrica</i> .....	74
3.3.3 <i>Infrastrutture di erogazione carburanti alternativi</i> .....	75
3.4 INTERAZIONE FRA VEICOLI ELETTRICI E SISTEMA ELETTRICO .....	76
3.4.1 <i>Impatto sulla rete</i> .....	76
3.4.2 <i>Intensità carbonica dell'energia ricaricata</i> .....	79
3.4.3 <i>Ricarica smart domestica e altre possibili azioni di mitigazione</i> .....	79
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>82</b>



Fondazione Politecnico di Milano  
P.zza Leonardo da Vinci, 32  
20133 Milano  
Tel. +39 02 2399 9150  
Fax +39 02 2399 9155

## Lista delle abbreviazioni e degli acronimi utilizzati

3GDH – Third Generation District Heating  
ACI – Automobile Club d'Italia  
APE – Attestato di Prestazione Energetica  
ARERA – Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente  
BEV – Battery Electric Vehicle  
CDD – Cooling Degree Days  
CEER – Catasto Energetico Edifici Regionali  
CENED – Certificazione ENergetica degli EDifici  
CNR – Centro Nazionale di Ricerca  
CURIT – Catasto Unico Regionale Impianti Termici  
DBSCAN – Density-Based Spatial Clustering of Application with Noise  
DPR – Decreto Presidente della Repubblica  
EV – Electric Vehicle  
FC – Fuel Cell  
FER – Fonti Energetiche Rinnovabili  
GIS – Geographical Information System  
GNC – Gas Naturale Compresso  
GNL – Gas Naturale Liquefatto  
GPL – Gas di Petrolio Liquefatto  
GSE – Gestore Servizi Energetici  
IdR – Infrastrutture di Ricarica  
IEA – International Energy Agency  
ISTAT – Istituto nazionale di Statistica  
LAU – Local Administrative Unit  
LTS – Long Term Strategy  
MIT – Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili  
MiTE – Ministero della Transizione Ecologica  
NGVA – Natural & bio Gas Vehicle Association  
NUTS – Nomenclatura delle Unità Territoriali Statistiche  
PdC – Pompe di Calore  
PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle  
PNIEC – Piano Nazionale Integrato Energia e Clima  
PNIRE – Piano nazionale infrastrutturale per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica  
POD – Point of Delivery  
RFI – Rete Ferroviaria Italiana  
RSE – Ricerca sul Sistema Energetico  
SAF – Sustainable Aviation Fuels  
smc – standard metro cubo  
UNRAE – Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri



## Executive summary

Il presente documento parte da un'analisi dei fabbisogni energetici per il settore civile e per il settore dei trasporti, in Regione Lombardia, allo stato attuale e in scenari futuri. In tale contesto, il lavoro stima la potenziale penetrazione nei due settori delle tecnologie abilitanti la decarbonizzazione.

Per quanto riguarda il **fabbisogno del civile**, le fonti dei dati sono principalmente i censimenti Istat, il catasto energetico degli edifici regionali (CEER), il catasto degli impianti termici Curit. Allo stato attuale, il **fabbisogno termico** per il riscaldamento della Regione è stimato pari a **67,3 TWh/anno**, suddivisi in 50,9 TWh/anno per il settore residenziale e 16,4 TWh/anno per il settore terziario. L'analisi geografica restituisce una concentrazione maggiore della domanda (MWh per unità di superficie) nella Città Metropolitana di Milano, nell'asse Brescia-Bergamo-Milano e nell'area di Varese. Similmente avviene per il settore residenziale, con valori assoluti più elevati, ma anche più concentrati in aree ristrette (ad esempio a evidenziare la maggior concentrazione delle zone residenziali rispetto al settore terziario). Analizzando gli **scenari di riqualificazione**, viene stimata la percentuale di riduzione del fabbisogno termico per il riscaldamento in seguito a interventi di efficientamento sugli immobili. In un primo scenario elaborato nello studio vengono suddivisi gli immobili in base al livello di stato di fatto degli involucri. Attuare interventi di **efficientamento sul 10% degli edifici meno efficienti** (e portando la trasmittanza post-intervento pari a quella del Decreto "Requisiti Minimi") **può ridurre il fabbisogno del 15%**. Agire sui primi 5 decili (il 50% degli edifici meno efficienti) riduce il fabbisogno del 52%. Agire su tutti gli edifici porta a un -72%. Lo **scenario Cened + 2.0** restituisce invece un **-37,5% di fabbisogno**, ben distribuito tra riduzione nel terziario e nel residenziale. La distribuzione regionale della riduzione non è omogenea: **meno marcata (-25-30%) nella Città Metropolitana di Milano, più marcata (-50-75%) in zone rurali** (Lomellina, Mantovano) o montane (Valli Bresciane, Prealpi, Valtellina, ecc.).

La penetrazione delle varie tecnologie alternative per gli impianti di riscaldamento vede **le pompe di calore (PdC)** con una **presenza attuale marginale nel residenziale, nutrita nel terziario**. Gli impianti a **biomassa** hanno anch'essi una copertura **marginale**, ma rappresentano il **20-40% nelle zone Valtellinesi**, con più marcata presenza nell'ambito residenziale rispetto al terziario. Il **teleriscaldamento (TLR)** è presente solo in qualche decina di distretti, compresi tra Milano, Cremona, Brescia e alcune aree montane. Gli impianti di riscaldamento sono in genere **centralizzati per il terziario**, mentre sono in grande maggioranza individuali per il residenziale. Una presenza più massiccia di impianti centralizzati nel settore residenziale è riscontrabile nella Città Metropolitana di Milano, con picchi che variano localmente tra il 10 e il 60% del totale degli impianti.

Per quanto riguarda il potenziale di penetrazione ai vari anni target, per le PdC si considera che le **abitazioni aggiuntive con un impianto a PdC siano circa 280 mila al 2030**. Per quanto riguarda il **terziario** servito da PdC, si prevede un **+30% al 2030**, equivalente a **21 Mm<sup>2</sup> di superficie addizionale riscaldata a PdC**. L'aumento più imponente è sicuramente quello del settore residenziale. Per rispettare gli scenari al 2050 (da Long Term Strategy o LTS), si deve necessariamente ipotizzare una crescita esponenziale: un aumento del **2% annuo medio fino al 2030**; un aumento medio del **3% annuo nel periodo 2030-2050**, per arrivare al **70% di copertura residenziale con PdC al 2050**. È utile una verifica delle **compatibilità con la rete elettrica**, per cui si rendono necessari i dati dei profili di consumo elettrico. La stima della potenziale penetrazione del TLR considera la sua fattibilità e convenienza economica: il TLR è conveniente quando la densità spaziale della domanda sia al di sopra di una certa soglia e quando già vi sia elevata presenza di edifici con impianto centralizzato di distribuzione del calore. Dall'analisi risulta un **potenziale di utenze termiche servibili da reti di teleriscaldamento pari a 13,3 TWh, di cui 4,7 TWh situate nella città di Milano**. Anche il resto della città metropolitana presenta potenziale piuttosto elevato, come altre zone del Mantovano, del Bresciano, del Pavese e della Valtellina.

Il **fabbisogno termico per il raffrescamento** è superiore nel settore terziario rispetto al settore residenziale, data la maggiore penetrazione del condizionamento d'aria nel terziario: rispettivamente, 3,21 TWh/anno e 0,86 TWh/anno per un totale di **4,07 TWh/anno**. L'analisi dei trend nel recente passato restituisce tuttavia un **incremento medio di condizionatori** installati tra **2013 e 2020 di circa il 4% annuo**. Applicando lo stesso tasso ai valori di penetrazione attuali si ottiene una penetrazione nel residenziale pari al **90% nel 2030**, con un **incremento del fabbisogno totale di raffrescamento del 61%** rispetto ad oggi. Sull'evoluzione di questo trend impattano anche i cambiamenti climatici.

Tra le tecnologie analizzate c'è anche il **fotovoltaico**, limitatamente alla piccola taglia. Per quanto riguarda la penetrazione attuale, gli **impianti con potenza di picco inferiore ai 20 kW** sono i più numerosi e corrispondono al **27% della potenza** installata. Geograficamente, la loro maggior densità è nella fascia orizzontale Varese-Milano-Bergamo-Brescia. Per quanto riguarda invece la densità per abitante (kW/abitante) essa risulta più elevata nel Bresciano, nel Cremonese, nel Mantovano e nelle Valli Alpine (Valtellina, Valli Bergamasche e Bresciane). Da un'analisi del potenziale non sfruttato di fotovoltaico di piccola taglia secondo tre scenari di superficie utilizzata, **risulta un potenziale totale di 7-13 TWh annui, per una potenza totale di 6-10 GW** e una numerosità di impianti dai 2 ai 3,5 milioni.

Per quanto riguarda il settore trasporti, lo stato attuale (al 2019) vede **6,2 milioni di autovetture**, con una maggior concentrazione (auto per abitante) nelle zone periferiche della Regione, dove quindi risulta meno disponibile una forma di trasporto alternativa. Le autovetture a combustibili alternativi sono il 6% del totale, mentre l'alimentazione elettrica è del tutto marginale (**0,1% di veicoli a batteria**), ma in forte evoluzione. I veicoli Euro 0-Euro 4 (immatricolazione pre-dicembre 2010) rappresentano circa il 50% del parco. La dotazione di autobus risulta ben distribuita su tutto il territorio e generalmente di età elevata (>40% immatricolato prima del 2003). L'alimentazione principale a livello nazionale è a gasolio (per oltre il 90%). **L'infrastruttura ferroviaria di 2600 km totali è elettrificata per il 90%**, con un 10% non elettrificato, rappresentato da 283 km tutti a binario singolo. Sono in crescita i progetti per la conversione a idrogeno del trasporto non elettrificato. Un'analisi sul confronto ferrovia/automobile per i collegamenti in regione ha evidenziato le tratte con il maggior numero di automobili e un **rapporto viaggi in treno/in auto inferiore al 2%**: corrispondono ai tragitti tra Milano e alcuni comuni dell'Hinterland, tra Brescia e alcuni comuni della cintura, tra Mantova e alcuni comuni della cintura. Pare quindi che anche nel tragitto capoluogo/città limitrofe, generalmente ben servito da mezzi pubblici, l'automobile rappresenti ancora la grande maggioranza degli spostamenti.

La presenza di veicoli elettrici (EV) viene stimata al 2030 e al 2050 a partire dalla situazione attuale e dagli scenari PNIEC e LTS: si possono stimare circa **700 mila veicoli a batteria (BEV) e 400 mila veicoli ibridi plug-in (PEV) al 2030; circa 3,3 milioni di BEV al 2050, con 600 mila veicoli a idrogeno a celle a combustibile (FCEV) e 150 mila alimentati da E-fuels**. Al 2020, i punti di ricarica sono 3330 in Lombardia, circa il 17% del totale nazionale, con rapporto colonnine/abitanti coerente con il resto del territorio italiano. Ad oggi, la ricarica domestica rimane comunque grandemente maggioritaria. Al 2030 si stimano scenari di ricarica EV con **la ricarica domestica destinata a rimanere maggioritaria**, ma un contributo significativo di ricarica presso le colonnine pubbliche, ricarica alle destinazioni e ricarica presso il posto di lavoro. L'impatto della ricarica EV sulla rete deve sicuramente essere considerato: si stima che potrebbe portare un aumento di circa 400 MW di prelievo di picco al 2030 (circa +5% rispetto a oggi). La variazione potrebbe essere più significativa (anche raddoppiare: + 10%) in caso il mix di ricarica sia più spostato verso la ricarica domestica, che presenta un picco alla fine della giornata lavorativa. Strategie di **smart charging** diventano di interesse per incrementare la compatibilità con la rete e, inoltre, diminuire l'impatto climalterante della ricarica: la ricarica diurna al 2030 può essere un metodo per aumentare la porzione di energia ricaricata proveniente da rinnovabili (fotovoltaiche).

Per quanto riguarda l'alimentazione a metano, ci sono ad oggi **1100 punti di rifornimento di gas naturale compresso (GNC), con scenari di raddoppio al 2030**. Invece, sono previsti **800 punti al 2030 per il gas naturale liquefatto (GNL)**, ad oggi presente solo marginalmente.

## 1 Introduzione

Questo report raccoglie la metodologia e i risultati della terza attività prevista all'interno del servizio di assistenza tecnica a Regione Lombardia per il percorso di costruzione del Programma Regionale Energia Ambiente e Clima (PREAC). Questa terza attività, orientata alla stima della potenziale penetrazione delle tecnologie nei settori d'uso finali, si è focalizzata in particolare su due settori, gli edifici e i trasporti, avendo collocato interamente nella seconda attività le analisi circa il settore industriale.

L'analisi della penetrazione delle tecnologie è fatta su base esclusivamente tecnica ed è propedeutica alle analisi tecnico-economiche delle successive attività previste. La metodologia e i dati sono descritti conservando il maggior dettaglio possibile per trasparenza (nelle assunzioni e nella produzione delle stime) e per permettere successive integrazioni, possibili miglioramenti o futuri aggiornamenti, anche ad opera esterna rispetto al gruppo di lavoro.

Per tutti i settori e segmenti considerati, l'approccio seguito ha generalmente previsto dapprima una ricostruzione della situazione attuale, in termini di domanda e di mix tecnologico in grado di soddisfarla, e successivamente un'analisi della possibile evoluzione delle domande e della penetrazione delle tecnologie a maggiore efficienza e/o a minore impatto in termini emissivi. Le stime pongono attenzione alla caratterizzazione spaziale in accordo con la disponibilità di dati e tengono il più possibile in considerazione i piani e le strategie nazionali di decarbonizzazione, avendo contezza della collocazione del sistema energetico lombardo nel contesto più ampio.

Il lavoro si focalizza sulle tecnologie con maggiore grado di maturità o il cui ruolo nella decarbonizzazione è riconosciuto in letteratura come non marginale. Fra le soluzioni considerate, l'elettrificazione di alcuni servizi (e.g. pompe di calore e veicoli elettrici) o la maggiore penetrazione di alcuni servizi già elettrificati (e.g. condizionatori), impongono di non trascurare le possibili relazioni con il sistema elettrico. Sia in termini di impatto sul mix di generazione (a livello zonale), sia in termini di impatto sulle reti di distribuzione (a livello locale), da non intendersi esclusivamente con accezione negativa (visto il ruolo che potrebbero avere soluzioni come il vehicle-to-grid). Le interazioni con il mix di generazione elettrica (e.g. emissioni indirette), saranno materia delle successive attività previste. L'impatto sulla rete di distribuzione è accennato qui in termini di potenziali profili di carico, poichè è stato deciso dal gruppo di lavoro di considerare il potenziamento della rete di distribuzione non come vincolo ma come adeguamento eventuale.

### 1.1 Struttura del report

Il resto del report è strutturato in due capitoli. Il primo è focalizzato sugli edifici, in particolare sui servizi di riscaldamento e raffrescamento, e sulla penetrazione del fotovoltaico di piccola taglia. Il secondo capitolo è incentrato sul trasporto di persone e merci, considerando i vari segmenti del settore e le modalità di trasporto, con maggiore attenzione alle automobili.

## 2 Settore Edifici

Gli edifici del settore civile, in gran parte inefficienti dal punto di vista termico, sono responsabili per un'importante quota dei consumi e delle emissioni climalteranti e inquinanti. Una adeguata riqualificazione degli edifici e la sostituzione degli impianti con altri più efficienti e che sfruttano energia primaria rinnovabile, potrebbero contribuire in modo incisivo alla riduzione dei consumi e delle emissioni.

Questo capitolo fornisce una stima della domanda attuale di riscaldamento e raffrescamento in Lombardia e ne valuta una possibile evoluzione negli anni, secondo diversi scenari di penetrazione. Il capitolo valuta inoltre l'attuale sistema impiantistico e ne stima una possibile evoluzione verso sistemi più efficienti e basso emissivi. Si conclude, infine, con un'analisi del potenziale di fotovoltaico, limitata ai piccoli impianti collocabili sulle coperture degli edifici.

### 2.1 Stima della domanda di riscaldamento attuale

In questa sezione viene stimata la domanda di calore per il riscaldamento degli edifici del settore civile in Lombardia, a partire da dati pubblicamente disponibili, quali l'11° censimento Istat della Popolazione e delle Abitazioni [1] e il 9° censimento Istat dell'Industria e dei Servizi [2], il Catasto Energetico Edifici Regionali (CEER) che mette a disposizione gli attestati di prestazione energetica (APE) depositati attraverso Cened [3] e il catasto degli impianti termici Curit [4]. La stima avviene tramite l'applicazione di un modello statistico di tipo bottom-up già elaborato e validato per la città di Milano [5]. Il modello parte da alcune informazioni contenute nel database Cened + 1.2<sup>1</sup>, quali la trasmittanza termica dei componenti dell'involucro e le superfici disperdenti, per ricostruire il fabbisogno termico degli edifici e considerando anche altri fattori che potrebbero influenzare la stima, quali le ore di funzionamento degli impianti e le temperature, interne ed esterne. Tali fabbisogni sono poi combinati con le informazioni censuarie per ottenere una distribuzione geografica.

La sezione dapprima descrive la costruzione del subset considerato rispetto ai dati Cened, presenta successivamente il modello utilizzato, e riporta infine i risultati della mappatura, insieme ad una validazione del modello.

#### 2.1.1 Costruzione del campione di dati da Cened

Dal campione di dati scaricabile dall'open data Cened + 1.2 sono stati eliminati tutti quei certificati che, a causa di errori di compilazione o altre anomalie, potrebbero compromettere le valutazioni sulle caratteristiche degli edifici sia dal punto di vista geometrico che termico ([6],[7]). La procedura di depurazione del database dei certificati è stata svolta in modo indipendente tra edifici del settore residenziale e quelli del settore terziario. Quelli del settore residenziale sono stati suddivisi in cinque zone, in funzione del clima<sup>2</sup>, mentre quelli del settore terziario sono stati divisi per destinazione d'uso. I punti principali del processo di esclusione di alcuni dati sono:

---

<sup>1</sup> Non è stato utilizzato il più recente database Cened + 2.0 a causa della mancanza di alcuni dati utili alla ricostruzione del fabbisogno di riscaldamento degli edifici, come trasmittanze termiche e superfici disperdenti opache e trasparenti.

<sup>2</sup> Le zone sono state individuate per mezzo dei gradi giorno (GG), che in Lombardia vanno da un minimo di 2097 nel comune di Limone sul Garda ad un massimo di 4648 nel comune di Livigno, in range di 500 GG. Zona 1: 2000-2500 GG, Zona 2: 2500-3000 GG, Zona 3: 3000-3500 GG, Zona 4: 3500-4000 GG, Zona 5: +4000 GG.

1. Mancanza dei dati utili alla ricostruzione del fabbisogno energetico dell'edificio, come ad esempio trasmittanze termiche, superfici disperdenti e destinazione d'uso;
2. Certificati doppi, ovvero effettuati sullo stesso immobile ma in date diverse (a parità di identificativi catastali, viene preso in considerazione il certificato più recente);
3. Superficie lorda minore della superficie netta o volume lordo minore del volume netto;
4. Differenza tra altezza lorda (calcolata come rapporto tra volume lordo e superficie lorda) e altezza netta (calcolata come rapporto tra volume netto e superficie netta) nulla o negativa;
5. Rapporto tra superficie lorda e superficie netta e rapporto tra volume lordo e volume netto maggiori del 97,5° percentile.

Per proseguire nel processo di eliminazione, analizzando i fabbisogni termici dichiarati negli APE, il database viene ulteriormente suddiviso per classe energetica ma anche per data in cui è stato redatto il certificato. Con il Decreto "Requisiti Minimi" [8], infatti, il 01.10.2015 segna il cambiamento del metodo di assegnazione della classe energetica. Questo porta a situazioni in cui immobili con lo stesso fabbisogno energetico vengono assegnati a classi energetiche differenti in base alla data in cui è stato redatto l'APE<sup>3</sup>.

Il calcolo dei limiti, inferiore e superiore, per individuare i certificati contenenti valori molto diversi dal resto del campione, viene effettuato attraverso il metodo dei percentili, per il limite inferiore, e il metodo *box-plot*, per il limite superiore. Il limite inferiore viene uguagliato al 2,5° percentile. Il metodo *box-plot* per il limite superiore prevede invece il calcolo del limite secondo l'equazione (2.1):

$$L_{sup} = Q_3 + 1,5 \cdot (Q_3 - Q_1) \quad (2.1)$$

dove

- $L_{sup}$  è il limite superiore;
- $Q_1$  è il primo quartile, ovvero il valore al di sotto del quale è presente il 25% dei dati;
- $Q_3$  è il terzo quartile, ovvero il valore al di sotto del quale è presente il 75% dei dati.

Nel caso in cui il limite massimo risulta superiore al valore massimo dell'intervallo, si considera il limite superiore pari al valore massimo.

Nelle figure seguenti si mostrano il numero di certificati di partenza e il numero di certificati rimanenti a seguito del processo di eliminazione dei dati, differenziando per zone il settore residenziale (Figura 2.1) e per destinazione d'uso il settore terziario (Figura 2.2). Nel complesso, i certificati relativi agli edifici del settore residenziale si riducono del 24%, passando da circa 1,73 milioni a circa 1,31 milioni (il numero è riferito ai subalterni totali); mentre i certificati relativi agli edifici del settore terziario si riducono del 26%, passando da circa 217 000 a 160 000 subalterni totali.

---

<sup>3</sup> Prima del 01.10.2015 la classe energetica veniva assegnata confrontando il fabbisogno di energia primaria globale o non rinnovabile dell'edificio, con i valori limite che ne determinavano la classe energetica. Con il Decreto "Requisiti Minimi" si introduce il concetto di "edificio di riferimento", ovvero un edificio identico a quello oggetto della progettazione (per geometria, orientamento, ubicazione geografica, destinazione d'uso e tipologia d'impianto), avente però caratteristiche termiche ed energetiche predefinite. Esso viene utilizzato per determinare i valori limite di energia primaria per l'appartenenza alle diverse classi energetiche. Tali limiti variano quindi per ogni edificio oggetto di certificazione, essendo fortemente dipendente dalle caratteristiche geometriche e spaziali dello stesso.

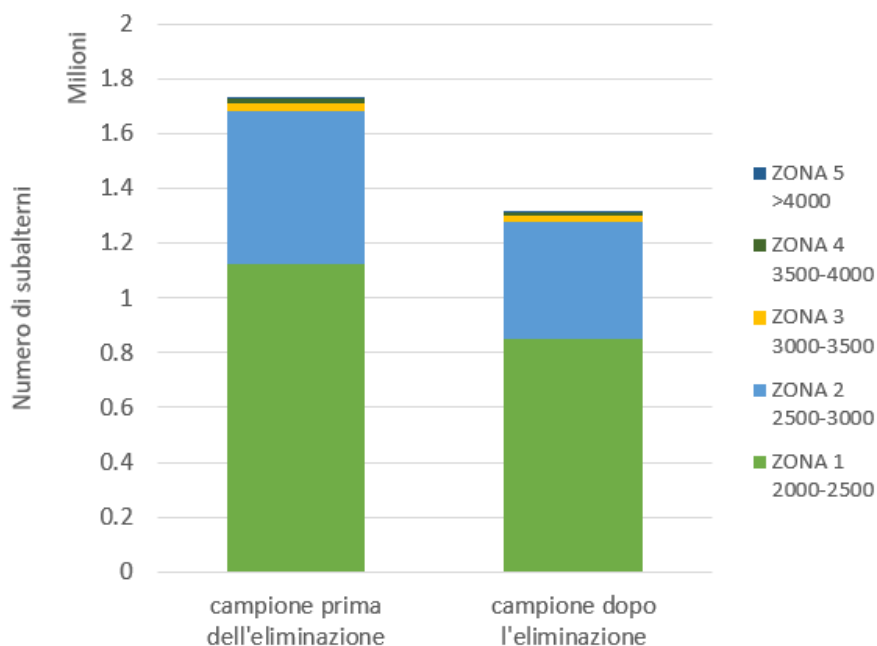


Figura 2.1 – Riepilogo del processo di eliminazione per il settore residenziale diviso per zona (in funzione dei gradi giorno) [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Cened [3]]

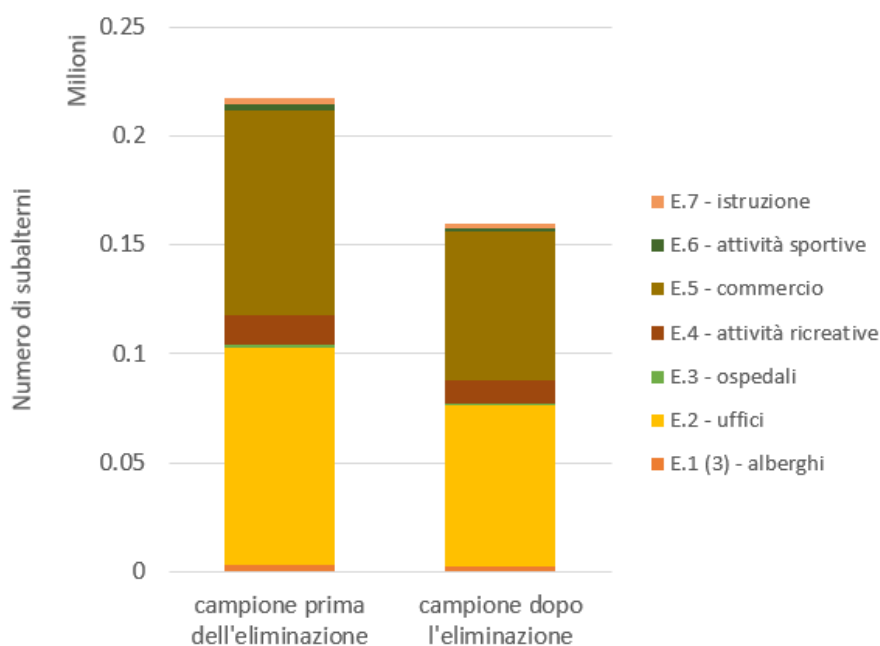


Figura 2.2 – Riepilogo del processo di eliminazione per il settore terziario diviso per destinazione d'uso [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Cened [3]]

### 2.1.2 Modello di stima della domanda

Per la stima della domanda di riscaldamento si utilizzano differenti modelli, con approccio statistico-induttivo, in base alla disponibilità di dati dei settori residenziale e terziario. Di seguito vengono illustrati i due diversi modelli utilizzati per il settore residenziale e per il settore terziario.



### Settore residenziale

Il fabbisogno termico degli edifici è stato calcolato utilizzando i dati presenti nel dataset depurato, tramite l'equazione (2.2) che impone il fabbisogno pari alle dispersioni attraverso l'involucro<sup>4</sup>:

$$Q_d = \sum_j (A_j \cdot U_j) \cdot \sum_{i=1}^N \Delta\theta_i \cdot \Delta t \left[ \frac{Wh}{anno} \right] \quad (2.2)$$

dove:

- $Q_d$  è il fabbisogno termico dell'edificio, assunto pari alla somma di tutte le dispersioni termiche attraverso i componenti d'involucro [Wh/anno]
- $A_j$  è la superficie disperdente del componente j-esimo [ $m^2$ ]
- $U_j$  è la trasmittanza termica del componente j-esimo [ $W/m^2K$ ]
- $\Delta\theta_i$  è la somma delle differenze orarie di temperatura tra interno ed esterno [K]
- $\Delta t$  pari a un'ora [h]
- $N$  numero di ore del periodo di riscaldamento [h]

I dati di temperatura esterna oraria per ogni comune della Lombardia sono resi disponibili da ERA5 [9], che li fornisce a seguito di un processo di rianalisi che completa i dati raccolti nei punti mancanti.

Per il profilo della temperatura interna si assume che questa sia pari a 20°C per 8 ore al giorno, e si simula l'andamento nelle ore di non funzionamento. In Tabella 2.1 sono riportati i periodi di funzionamento degli impianti di riscaldamento considerati, secondo DGR 3502/2020.

Tabella 2.1 – Periodo consentito di funzionamento degli impianti per fascia climatica da DGR 3502/2020

Zona Climatica	Periodo di accensione
D	01/11 – 15/04
E	15/10 – 15/04
F	15/09 – 15/05

I componenti disperdenti considerati sono l'involucro verticale opaco, la copertura, il basamento e i serramenti che separano l'ambiente interno dall'ambiente esterno. La stima delle loro superfici disperdenti è effettuata a partire dai valori di superficie disperdente totale (opaca e trasparente, verticale e orizzontale) e dal rapporto tra superficie disperdente vetrata e superficie disperdente opaca (verticale e orizzontale),

$$S_{disp,opaca\ tot} = \frac{S_{disp,tot}}{S_{vetrata/opaca} + 1} [m^2] \quad (2.3)$$

$$S_{disp,vetrata} = S_{disp\ tot} - S_{disp,opaca\ tot} [m^2] \quad (2.4)$$

dove

- $S_{disp,opaca\ tot}$  è la superficie disperdente opaca complessiva, verticale e orizzontale [ $m^2$ ]
- $S_{disp,vetrata}$  è la superficie disperdente vetrata [ $m^2$ ]

<sup>4</sup> Uguagliando il fabbisogno termico degli edifici alle sole dispersioni termiche attraverso l'involucro si stanno trascurando le perdite per ventilazione e i ponti termici che ne aumenterebbero il valore finale. Considerando le superfici disperdenti lorde si può assumere tuttavia di compensare l'errore.



- $S_{disp,tot}$  è la superficie disperdente totale, opaca e vetrata, verticale e orizzontale [ $m^2$ ]
- $S_{vetrata/opaca}$  è il rapporto tra la superficie disperdente vetrata e quella disperdente opaca [-]

La superficie disperdente di basamento e copertura è stata assunta pari alla superficie di pavimento netta e nel solo caso in cui le corrispondenti trasmittanze termiche siano diverse da zero (tale superficie delimita altrimenti l'ambiente interno verso un altro ambiente riscaldato e non è quindi considerabile come componente disperdente).

La superficie disperdente opaca verticale è quindi pari alla differenza tra la superficie disperdente opaca totale e la superficie disperdente di basamento e copertura.

I certificati vengono poi suddivisi in quelli propri di abitazioni monofamiliari, bifamiliari e quelli propri di condomini, assumendo che queste tre categorie di edifici abbiano fabbisogni termici differenti a parità di altre condizioni. Poiché il dataset non chiarisce per ogni certificazione se si tratta di una o dell'altra categoria, si considerano abitazioni monofamiliari tutti quei certificati con numero di subalterni pari a uno, bifamiliari se il numero di subalterni è pari a due e invece condomini tutti quelli con numero di subalterni superiori a due; si analizzano inoltre gli identificativi catastali, foglio e particella: se presenti in più di due certificati, si deduce che appartamenti di uno stesso condominio abbiano richiesto la certificazione individualmente rispetto agli altri subalterni, invece se presenti in due certificati si assume che siano abitazioni bifamiliari; infine si valuta la presenza o meno dei valori di trasmittanza termica di copertura e basamento: se presenti entrambi sono certificati propri di abitazioni bifamiliari o monofamiliari in base ai due metodi precedenti, invece se non sono presenti o è presente solo una o l'altra si considerano appartamenti di un condominio.<sup>5</sup>

Dal campione di dati ottenuto a seguito del processo di eliminazione si ottengono i valori medi caratteristici del parametro  $\sum_j (A_j \cdot U_j)$  per tipologia edilizia appena descritta, monofamiliare o multifamiliare, per epoca di costruzione e per ogni zona climatica considerata. Per calcolare il fabbisogno per il riscaldamento residenziale in ogni sezione di censimento, il parametro  $\sum_j (A_j \cdot U_j)$  è moltiplicato (i) per la sommatoria della differenza oraria di temperatura tra interno ed esterno nel periodo di funzionamento dell'impianto  $\sum_{i=1}^N \Delta\theta_i \cdot \Delta t$ , e (ii) per il numero totale di edifici censiti da Istat nel più recente censimento del 2011 [1]. In quest'ultima operazione, si considerano gli edifici con un interno propri di abitazioni monofamiliari, con due interni propri di abitazioni bifamiliari e quelli con numero di interni superiore a due, propri di condomini. È importante sottolineare che le epoche di costruzione in cui Istat suddivide gli edifici differiscono in alcuni casi da quelle considerate dal database Cened. Si riportano quindi i dati ottenuti dal Cened alle stesse epoche di costruzione dei dati Istat.

Va notato che, nei dati forniti su richiesta da Istat, circa il numero di interni, non sono fornite informazioni per quelle sezioni di censimento in cui è presente una sola abitazione, per motivi di privacy. Istat fornisce comunque, sempre in riferimento al censimento della popolazione e delle abitazioni del 2011, un'indicazione delle sezioni di censimento in cui è presente almeno una abitazione. Il numero di sezioni con case sparse in Regione Lombardia è pari a 5420 (per confronto, il totale di interni in Regione è di 4,5 milioni).

---

<sup>5</sup> Questa classificazione è dettata dalle categorie dei dati resi disponibili da Istat circa il numero di interni degli edifici a seconda del numero o intervallo di abitazioni ospitate: 1, 2, 3-10 o più di 10 interni.

### Settore terziario

Il settore terziario è costituito da una grande varietà di sottosettori con caratteristiche costruttive e fabbisogni energetici differenti. È stata considerata una suddivisione degli edifici del settore nelle macrocategorie considerate dal DPR 412 [10] e da Cened:

- E.1(3) edifici adibiti ad **albergo**, pensione ed attività similari;
- E.2 Edifici adibiti a **uffici** e assimilabili: pubblici o privati, indipendenti o contigui a costruzioni adibite anche ad attività industriali o artigianali, purché siano da tali costruzioni scorporabili agli effetti dell'isolamento termico;
- E.3 Edifici adibiti a **ospedali**, cliniche o case di cura e assimilabili ivi compresi quelli adibiti a ricovero o cura di minori o anziani nonché le strutture protette per l'assistenza ed il recupero dei tossico-dipendenti e di altri soggetti affidati a servizi sociali pubblici;
- E.4 Edifici adibiti ad **attività ricreative**, associative o di culto e assimilabili;
- E.5 Edifici adibiti ad **attività commerciali** e assimilabili: quali negozi, magazzini di vendita all'ingrosso o al minuto, supermercati, esposizioni;
- E.6 Edifici adibiti ad **attività sportive**;
- E.7 Edifici adibiti ad **attività scolastiche** a tutti i livelli e assimilabili.

I calcoli descritti in seguito sono effettuati per ognuna di esse separatamente.

Come per il settore residenziale, il fabbisogno termico per il riscaldamento del settore terziario è stato imposto pari alle dispersioni termiche attraverso i componenti d'involucro che delimitano l'ambiente interno da quello esterno. Tutti i parametri che compongono l'equazione (2.2) rimangono invariati tra caso residenziale e terziario ad eccezione della differenza di temperatura tra interno ed esterno, che varia in funzione della destinazione d'uso dell'edificio.

In Tabella 2.2 sono elencati gli orari di funzionamento degli impianti considerati, per ogni destinazione d'uso, mentre per i periodi di accensione si rimanda alla Tabella 2.1. Durante le ore di accensione la temperatura interna è stata imposta pari a 20°C ed è stata simulata per le ore di non funzionamento.

Tabella 2.2 - Orari di funzionamento considerati per le diverse destinazioni d'uso del settore terziario

Destinazione d'uso	Orario di accensione
E.1(3) – alberghi	6.00 – 13.59 e 17.00 – 21.59
E.2 – uffici	7.00 – 17.59
E.3 – ospedali	0.00 – 23.59
E.4 – attività ricreative	6.00 – 20.59
E.5 – commercio	6.00 – 20.59
E.6 – attività sportive	6.00 – 20.59
E.7 – istruzione	6.00 – 18.59

Per calcolare in ogni sezione di censimento il fabbisogno termico dei sottosettori del terziario risulta necessario fare delle ipotesi sulla superficie calpestabile per ogni destinazione d'uso a causa della mancanza di dati specifici a riguardo. Edifici aventi la stessa destinazione d'uso possono avere dimensioni anche molto differenti. Si è quindi deciso di estrapolare dal database Cened + 1.2 un valore caratteristico di  $\sum_j (A_j \cdot U_j)$  per destinazione d'uso e specifico per superficie calpestabile.

Combinando i dati di superficie riportati nel report di GSE sulla valutazione della potenziale diffusione di teleriscaldamento e cogenerazione ad alto rendimento [11], i dati di superficie dell'Osservatorio del mercato

immobiliare dell'Agenzia delle Entrate [12] e il numero di addetti da Istat [2], sono stati ottenuti, per ogni destinazione d'uso, dei valori disuperficie per singolo addetto (Tabella 2.3).

Tabella 2.3 – Superficie specifica per addetto considerata [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico su dati [11], [12] e [2]]

Destinazione d'uso	Superficie [m <sup>2</sup> /addetto]	Superficie Totale [Mm <sup>2</sup> ]
E.1(3) – alberghi	75	1,8
E.2 – uffici	40	23,6
E.3 – ospedali	25	12,3
E.4 – attività ricreative	25	3,8
E.5 – commercio	40	26,3
E.6 – attività sportive	25	5,3
E.7 – istruzione	75	20,1

Il fabbisogno termico degli edifici adibiti ad attività del settore terziario è calcolato per ogni destinazione d'uso e per sezione di censimento come prodotto (i) dei valori  $\sum_j (A_j \cdot U_j)$  estrapolati dal database Cened, (ii) del numero totale di addetti fornito da Istat [2], (iii) della superficie specifica per addetto presente in Tabella 2.3 e (iv) della differenza oraria di temperatura tra interno ed esterno nel periodo di funzionamento degli impianti.

### 2.1.3 Risultati

In questa sezione vengono presentati i risultati ottenuti a seguito del processo di stima del fabbisogno termico per il riscaldamento del settore residenziale e del settore terziario (paragrafo 2.1.2). Il fabbisogno di riscaldamento del settore civile della regione risulta pari a 67,3 TWhc/anno, suddivisi in 50,9 TWh/anno del settore residenziale e 16,4 TWh/anno del settore terziario. In Figura 2.3 si mostra la suddivisione del fabbisogno per il riscaldamento tra residenziale e terziario e quest'ultimo ulteriormente suddiviso nelle diverse destinazioni d'uso considerate.

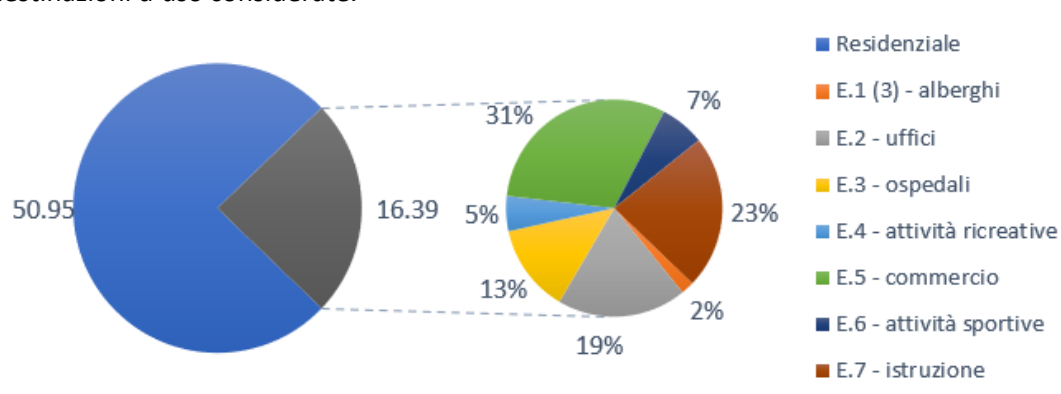


Figura 2.3 – Suddivisione del fabbisogno per il riscaldamento tra il settore residenziale e i sottosettori del settore terziario [TWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Cened [3], Istat [1] e [2], GSE [11], Agenzia delle Entrate [12] e ERA5 [9]]

Le mappe seguenti mostrano la distribuzione spaziale del fabbisogno di riscaldamento del settore residenziale (Figura 2.4), del settore terziario (Figura 2.5) e complessivo (in Figura 2.6). Lemappe risultano piuttosto simili tra loro in quanto presentano i valori più alti nelle medesime sezioni di censimento.

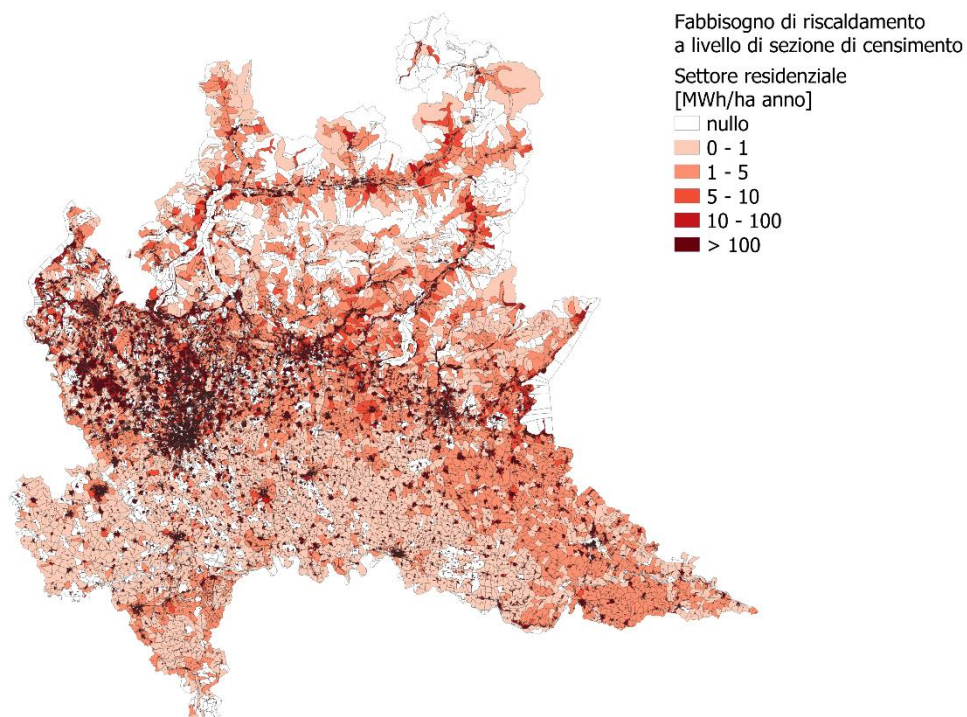


Figura 2.4 - Fabbisogno di riscaldamento del settore residenziale specifico per superficie a livello di sezione di censimento [MWh/ha anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Cened [3], Istat [1], GSE [11], Agenzia delle Entrate e ERA5 [9]]

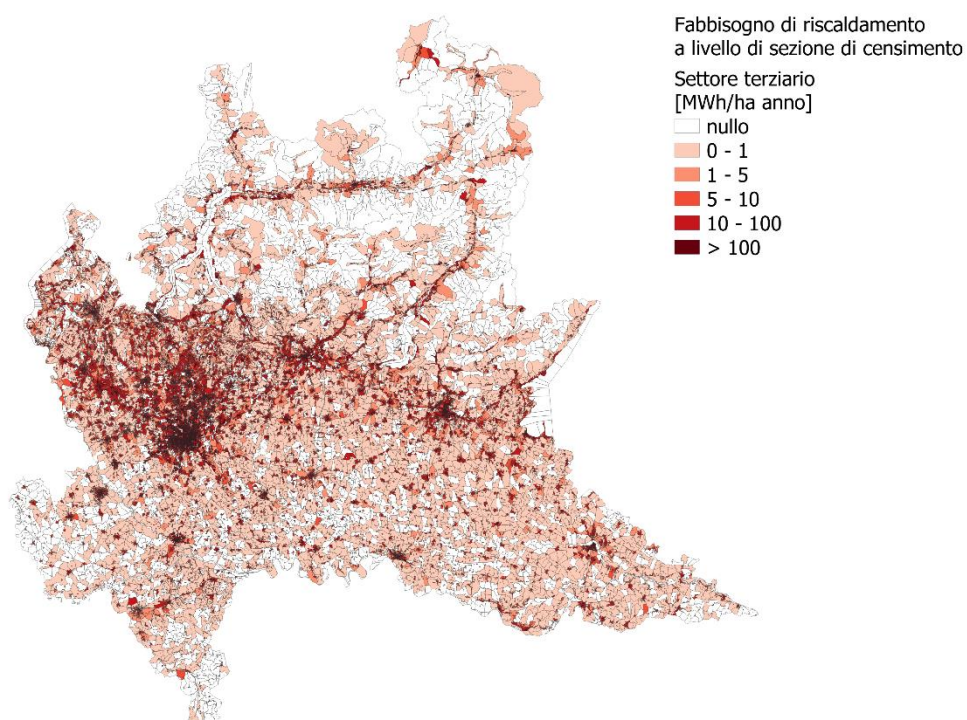
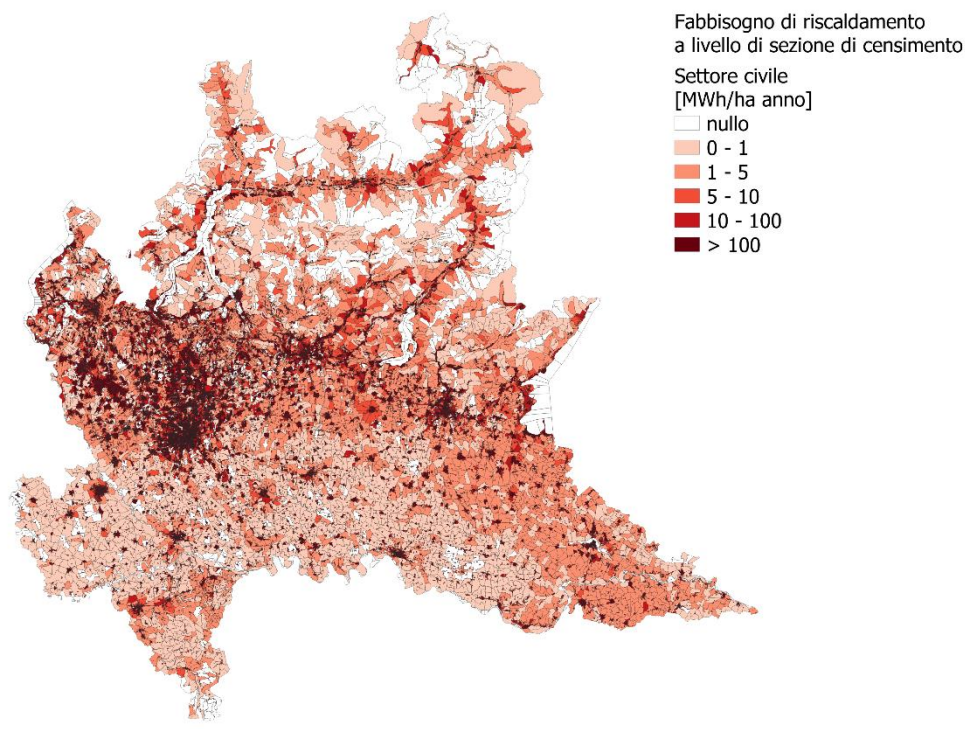


Figura 2.5 - Fabbisogno di riscaldamento del settore terziario specifico per superficie a livello di sezione di censimento [MWh/ha anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Cened [3], Istat [2], GSE [11], Agenzia delle Entrate [12] e ERA5 [9]]





*Figura 2.6 - Fabbisogno di riscaldamento del settore civile specifico per superficie a livello di sezione di censimento [MWh/ha anno]  
[Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Cened [3], Istat [1] e [2], GSE [11], Agenzia delle Entrate [12] e ERA5 [9]]*

Di seguito, invece, vengono mostrati i risultati ottenuti dalla distribuzione del fabbisogno di riscaldamento a livello comunale per il settore residenziale (Figura 2.7), terziario (Figura 2.8) e totale civile (Figura 2.9). Si osserva una maggiore densità di fabbisogno di riscaldamento del settore residenziale nei capoluoghi di provincia ed in particolare in tutta la zona attorno alla città di Milano, mentre per il settore terziario la maggiore densità di fabbisogno è situata nelle città di Milano e Bergamo.

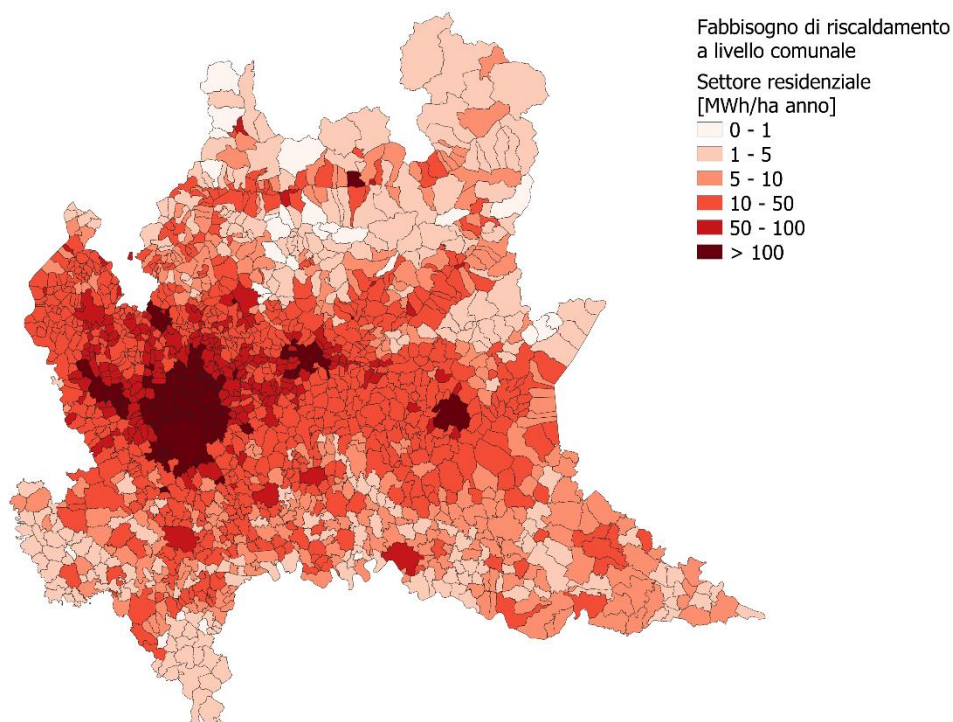


Figura 2.7 - Fabbisogno di riscaldamento del settore residenziale specifico per superficie a livello comunale [MWh/ha anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Cened [3], Istat [1], GSE [11], Agenzia delle Entrate [12] e ERA5 [9]]

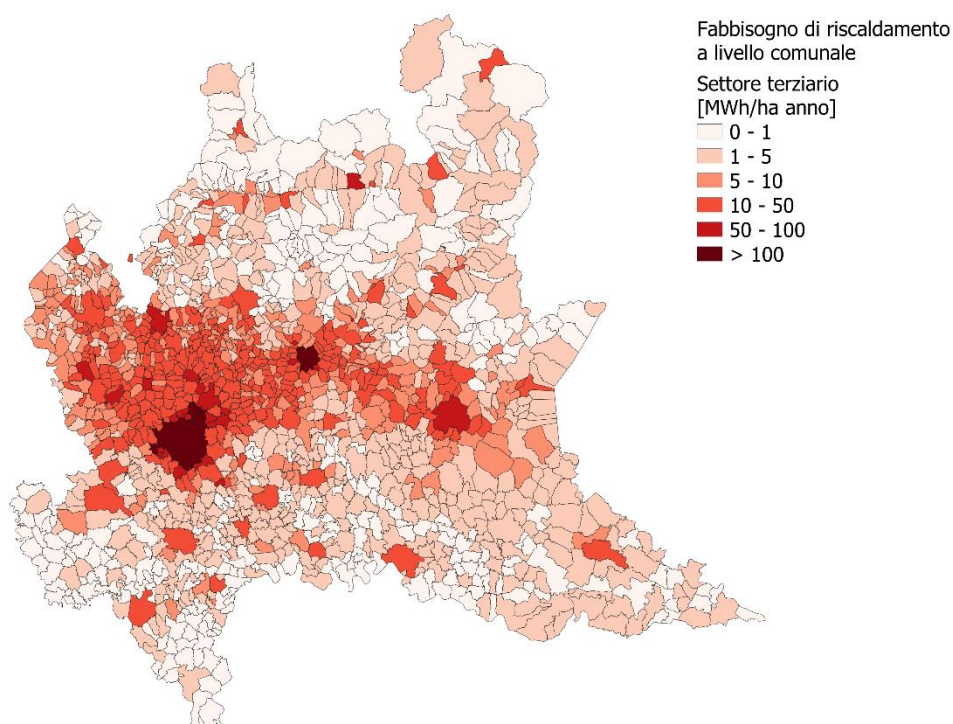


Figura 2.8 - Fabbisogno di riscaldamento del settore terziario specifico per superficie a livello comunale [MWh/ha anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Cened [3], Istat [2], GSE [11], Agenzia delle Entrate [12] e ERA5 [9]]

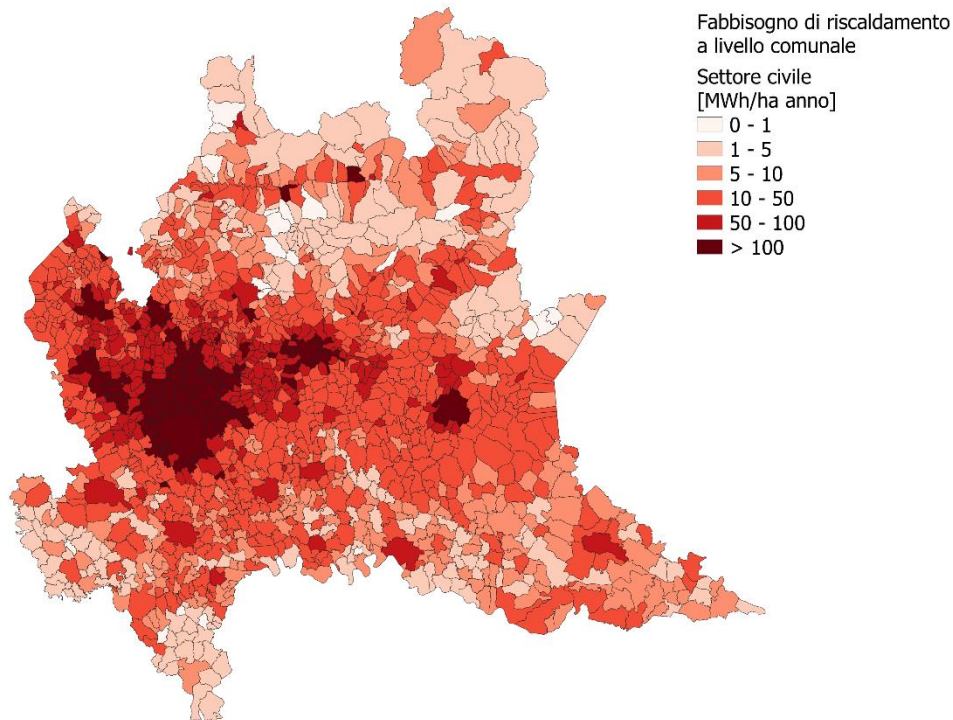


Figura 2.9 - Fabbisogno di riscaldamento del settore civile specifico per superficie a livello comunale [MWh/ha anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Cened [3], Istat [1] e [2], GSE [11], Agenzia delle Entrate [12] e ERA5 [9]]

#### 2.1.4 Validazione del modello di stima

L'affidabilità del modello di stima è qui valutata per meglio contestualizzare la lettura delle analisi successive. tramite un confronto con i dati resi disponibili dal Ministero della Transizione Ecologica (MiTE) circa la quantità di gas naturale consegnato ai clienti finali attraverso le reti di distribuzione a livello provinciale [13]. I dati di consumo di gas naturale vengono depurati della percentuale destinata a usi cucina e acqua calda sanitaria, stimata per tutte le provincie a partire dai consumi dei mesi estivi a livello nazionale, risultata pari al 34% del consumo del mese più freddo. È possibile validare il modello combinando i risultati della mappatura della domanda a partire dai dataset di Cened e Istat e i risultati circa la percentuale di impianti alimentati a gas naturale ottenuta a partire dai dati del Curit (si veda il paragrafo 2.3 per un maggiore dettaglio).

Il fabbisogno termico per il riscaldamento viene trasformato in consumo di gas naturale secondo l'equazione:

$$C_{gas} = \frac{Q_d \cdot \eta}{10,69} \left[ \frac{smc}{anno} \right] \quad (2.5)$$

dove

- $C_{gas}$  è il consumo di gas naturale [smc],
- $Q_d$  è il fabbisogno termico di riscaldamento [kWh/anno],
- $\eta$  è l'efficienza degli impianti di riscaldamento a gas naturale, assunta pari a 85%,
- 10,69 è la densità energetica volumetrica assunta per il gas naturale [kWh/smc].

La percentuale di errore ottenuta nel confronto tra i consumi provinciali di gas naturale resi disponibili dal MiTE e quelli calcolati tramite l'analisi combinata dei database Cened e Curit risulta entro il [-18%; +24%] per

tutte le province ad eccezione delle province di Cremona (-27%) e di Sondrio (+422%), quest'ultimo comunque contenuto in termini assoluti (146 Msmc rispetto ai 6400 Msmc complessivi nella regione). Si ritiene che l'errore possa essere relativo al minore utilizzo degli impianti alimentati a gas naturale, per via dell'utilizzo di camini, stufe a legna o pellet.

## 2.2 Scenari di riqualificazione

In questo capitolo vengono proposte due analisi sul possibile impatto della riqualificazione degli edifici in territorio lombardo. Viene prima di tutto presentata una cosiddetta *curva caratteristica di riqualificazione* che permette di delineare la relazione tra energia risparmiata e penetrazione della riqualificazione partendo dall'efficientamento degli edifici con performance peggiori e proseguendo progressivamente con gli edifici con performance migliori. Successivamente, viene definito uno *scenario di intervento* specifico che considera le indicazioni del Cened + 2.0 per distribuire tra gli edifici e geograficamente gli interventi di riqualificazione.

### 2.2.1 Curva caratteristica: prestazione termica decrescente

Il procedimento seguito prevede prima di tutto la suddivisione del dataset di edifici in 10 subset, operando una distinzione tra gli edifici monofamiliari e multifamiliari, e tra le cinque zone climatiche individuate precedentemente. Ogni subset viene poi suddiviso in decili riferiti alle performance dell'involucro. Successivamente vengono simulate forme di intervento su ogni componente di involucro imponendo una trasmittanza termica pari a quella indicata nel Decreto "Requisiti Minimi" [8]. Gli interventi vengono simulati prima sugli edifici meno efficienti (primo decile) e poi via via su quelli più efficienti, fino ad ottenere una riqualificazione totale (ultimo decile).

La curva caratteristica di riqualificazione che si ottiene permette di valutare come la riqualificazione degli edifici incida sul fabbisogno termico totale, dando priorità a interventi teoricamente con un tempo di ritorno inferiore rispetto a quelli successivi. Il grafico in Figura 2.10 mostra la curva caratteristica per tutta la regione, evidenziando la diminuzione del fabbisogno per il riscaldamento dei settori residenziale e terziario in termini assoluti (colonne blu e rosse, con riferimento all'asse principale [TWh/anno]) e del fabbisogno complessivo rispetto alla situazione attuale (linea verde, con riferimento all'asse secondario). È interessante valutare che alla riqualificazione del primo decile (i.e. il 10% di edifici con caratteristiche peggiori) corrisponde una riduzione del fabbisogno del 15% mentre l'ultimo decile porta a un vantaggio di pochi punti percentuali.



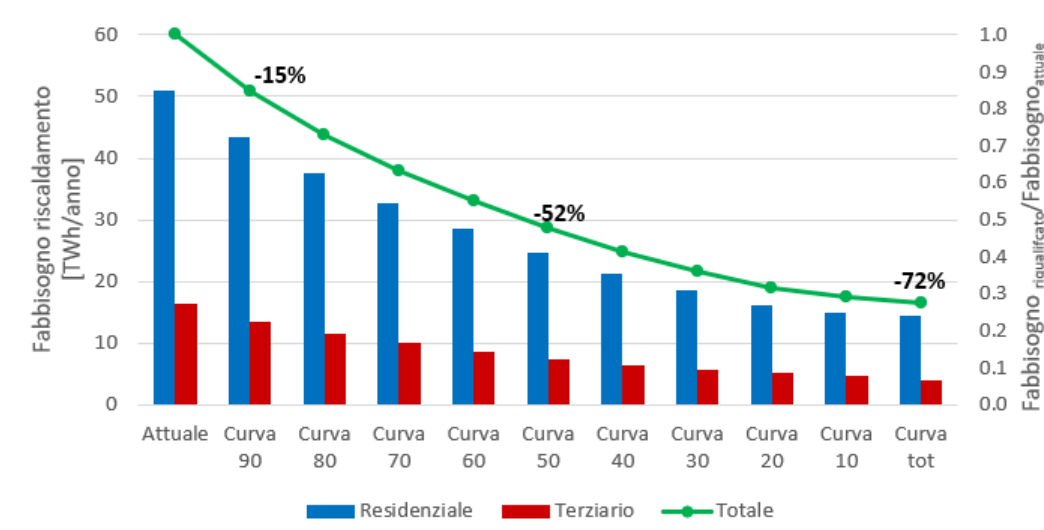


Figura 2.10 – Riduzione del fabbisogno termico per il riscaldamento (curva caratteristica di riqualificazione) [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Cened [3], Istat [1] e [2], GSE [11], Decreto Requisiti Minimi [8], Agenzia delle Entrate [12] e ERA5 [9]]

### 2.2.2 Scenario di intervento Cened + 2.0

In questo scenario di intervento specifico si attua la riqualificazione dei componenti di involucro nelle stesse percentuali con cui è suggerita dai certificatori nel database Cened + 2.0<sup>6</sup>. Questo scenario permette di valutare come gli interventi proposti dai tecnici certificatori negli attestati di prestazione energetica possano influire sul fabbisogno termico totale. Gli interventi considerati sono (i) la sostituzione dei serramenti, (ii) l'isolamento della superficie disperdente opaca e (iii) l'azione combinata sui serramenti e sulla superficie disperdente opaca, calcolando l'incidenza percentuale di tali suggerimenti sul totale degli attestati. Il procedimento viene svolto in modo separato tra edifici monofamiliari e multifamiliari, per ogni epoca di costruzione e zona, calcolando un valore medio caratteristico di fabbisogno termico che verrà moltiplicato per il numero di abitazioni censite da Istat nelle percentuali ricavate da Cened + 2.0. Nel simulare lo scenario di intervento specifico, viene escluso che alcuni edifici possano già aver attuato forme di riqualificazione (se non espressamente dichiarato nel Cened). Nel caso in cui il valore di trasmittanza termica dei componenti sia già inferiore ai limiti imposti dal Decreto "Requisiti Minimi" [8] non si attua alcuna riqualificazione.

In Figura 2.11 si mostra come incidono le percentuali di ogni intervento suggerito sul totale di edifici, differenziando tra quelli su cui sarà fatta una riqualificazione energetica di almeno un componente rispetto a quelli su cui non sarà fatto alcun efficientamento.

<sup>6</sup> A differenza del database Cened + 1.2, in ogni attestato di prestazione energetica del database Cened + 2.0 di Regione Lombardia sono individuati alcuni interventi volti a garantire il miglioramento delle caratteristiche, impiantistiche e strutturali, dell'edificio.

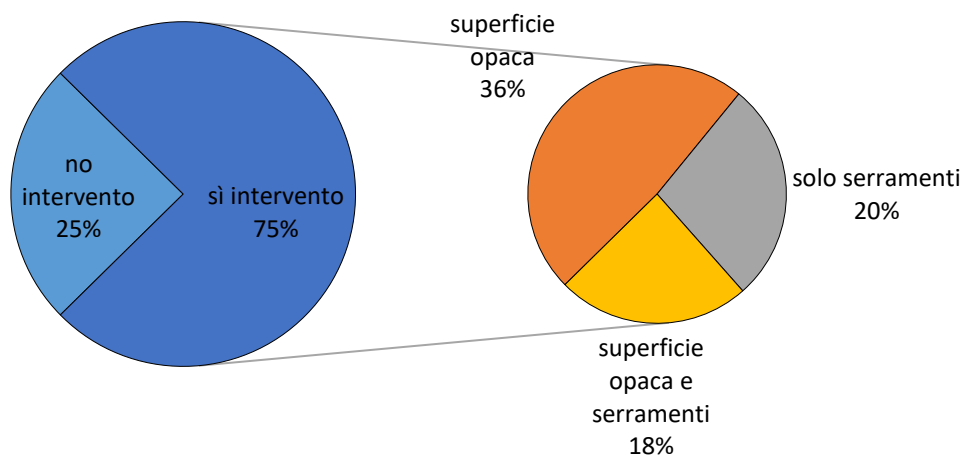


Figura 2.11 – Composizione del mix di interventi di riqualificazione nello scenario Cened + 2.0 [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Cened [3]]

Lo scenario di riqualificazione esposto permette di raggiungere una riduzione del fabbisogno per il riscaldamento del settore civile pari al 37,5%. Nel grafico in Figura 2.12 si mostra la riduzione di fabbisogno ottenuta tramite lo scenario di riqualificazione per il settore terziario (da 16,4 TWh/anno a 9,8 TWh/anno) e residenziale (da 50,9 TWh/anno a 32,3 TWh/anno) sia in termini assoluti (colonne blu e rosse, con riferimento all'asse principale [TWh/anno]), che in termini relativi (linea verde, con riferimento all'asse secondario).

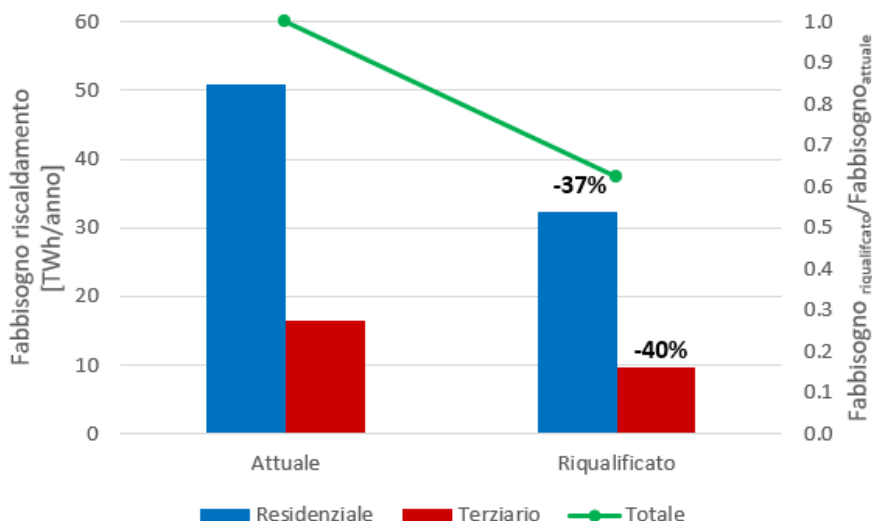


Figura 2.12 - Riduzione del fabbisogno termico per il riscaldamento (scenario) [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Cened [3], Istat [1] e [2], GSE [11], Decreto Requisiti Minimi [8], Agenzia delle Entrate [12] e ERA5 [9]]

Nella mappa in Figura 2.13 si mostra la riduzione ottenuta in ogni comune a seguito dello scenario di intervento nelle stesse percentuali con cui sono stati suggeriti nel Cened + 2.0 dai tecnici certificatori. Tale riduzione risulta essere per il 75% dei comuni compresa tra 35% e 50% rispetto al valore di partenza. Questo risultato risulta più promettente rispetto agli scenari ipotizzati dal Piano Nazionale Integrato Energia e Clima e dalla Long Term Strategy, i quali prevedono una riduzione del consumo di energia finale rispettivamente

del 39,7% rispetto allo scenario PRIMES 2007 e del 40% rispetto al 2018<sup>7</sup>. È più promettente in quanto congiuntamente al miglioramento dell'involucro edilizio si prevede anche un aumento dell'efficienza energetica degli impianti che quindi aumenterebbe ancora di più il potenziale di riduzione dei consumi previsto dallo scenario Cened + 2.0. Il potenziale di riduzione così calcolato pare in generale meno marcato nel capoluogo e nella cintura limitrofa rispetto al resto della regione. La riduzione maggiore è situata nelle aree montane a causa probabilmente di caratteristiche termiche peggiori degli edifici. Ciò nonostante, le percentuali di riduzione che si evidenziano in questi comuni incidono molto poco sul totale regionale dati i valori modesti in termini assoluti.

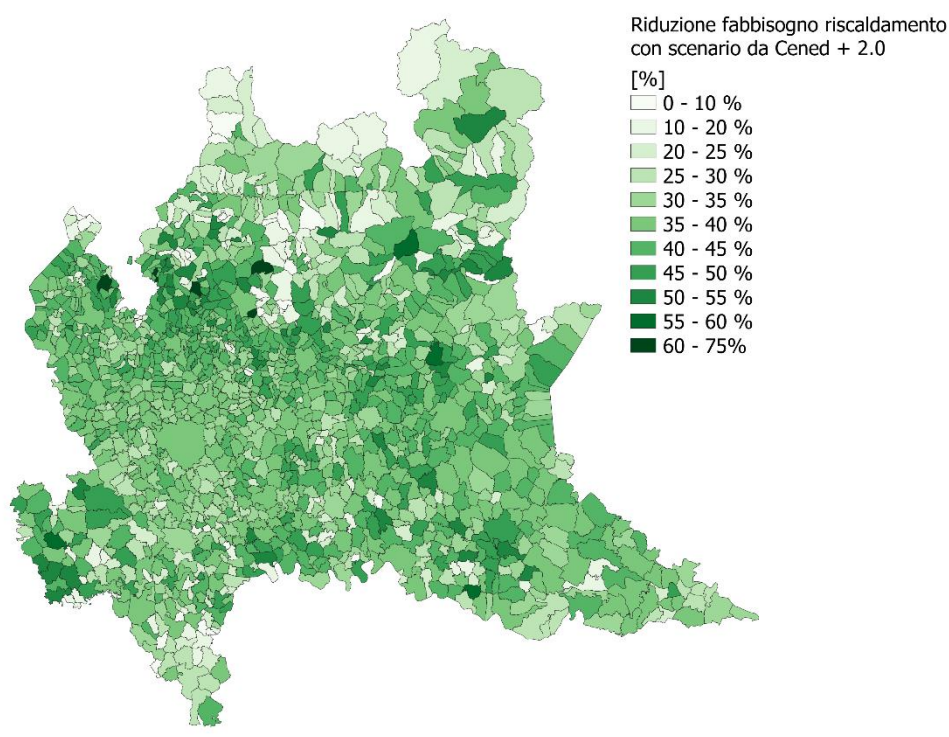


Figura 2.13 – Riduzione fabbisogno di riscaldamento a seguito dello scenario di intervento proposto da Cened + 2.0 [%] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico]

## 2.3 Impianti di riscaldamento

In questa sezione viene fornita una fotografia dell'attuale parco impianti per il riscaldamento degli edifici (paragrafo 2.3.1); vengono inoltre proposte due analisi circa il potenziale di penetrazione di soluzioni a maggiore efficienza e/o minori emissioni, in particolare sistemi di teleriscaldamento (paragrafo 2.3.2) e pompe di calore (paragrafo 2.3.3).

<sup>7</sup> Viene definita *energia finale* l'energia in entrata all'impianto dell'edificio mentre è definito *fabbisogno energetico* l'energia in uscita dall'impianto dell'edificio, al netto quindi dell'efficienza energetica dell'impianto e delle perdite di distribuzione.

### 2.3.1 Situazione attuale

Per valutare l'attuale sistema impiantistico che soddisfa il fabbisogno di riscaldamento del settore civile viene analizzato il Catasto Unico Regionale degli Impianti Termici (Curit [4]) che contiene tutti gli impianti targati. Vista l'obbligatorietà di targatura e di inserimento dei dati nel database, si assume che il campione censito sia rappresentativo di tutto il parco impianti. Il campione è tuttavia depurato dagli impianti che non contengono i dati necessari alle valutazioni (e.g. potenza del generatore, potenza dell'impianto di riscaldamento, categoria dell'edificio, categoria del generatore).

Dividendo il database tra settore residenziale e terziario, sono estrapolate per ogni comune le percentuali di impianti, calcolate sulla potenza dell'impianto di riscaldamento, aventi diverse tipologie di combustibili quali: gas naturale, gasolio, GPL, legna (legna, pellet e cippato), gas (aria propanata, biogas e syngas), liquido (olio combustibile, olio vegetale e kerosene) e altro (bricchette e altro). Gli impianti che non presentano la specifica sulla tipologia di combustibile utilizzato vengono suddivisi in base alla categoria del generatore (solare, cogeneratori, caldaie, pompe di calore e teleriscaldamento).

Le mappe seguenti mostrano la diffusione a livello comunale degli impianti per il riscaldamento alimentati (i) a pompa di calore (Figura 2.14 per il settore residenziale e Figura 2.15 per il settore terziario), (ii) da biomassa (Figura 2.16 per il settore residenziale e Figura 2.17 per il settore terziario) e (iii) da teleriscaldamento (Figura 2.18 per il settore residenziale e Figura 2.19 per il settore terziario). Le percentuali sono calcolate sulla potenza termica utile dell'impianto di riscaldamento.

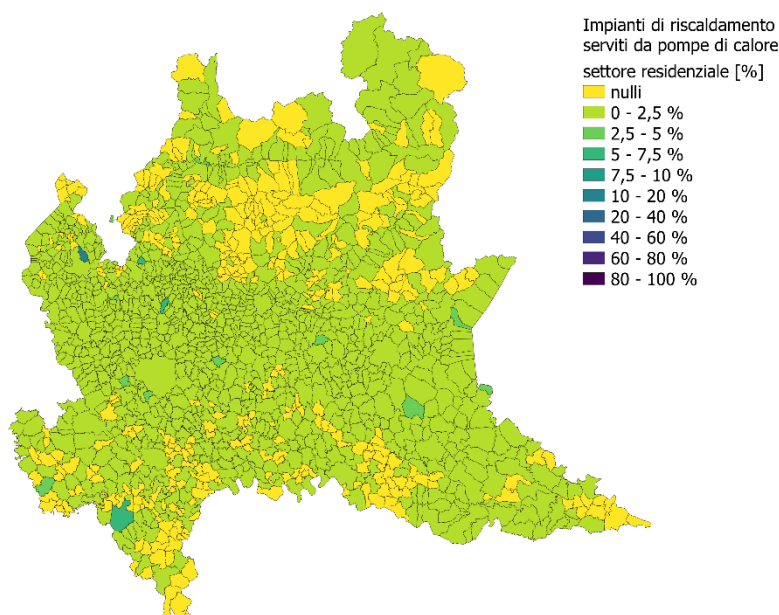


Figura 2.14 – Percentuali di diffusione di impianti di riscaldamento alimentati da pompa di calore per il settore residenziale [%]  
[Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Curit [4]]

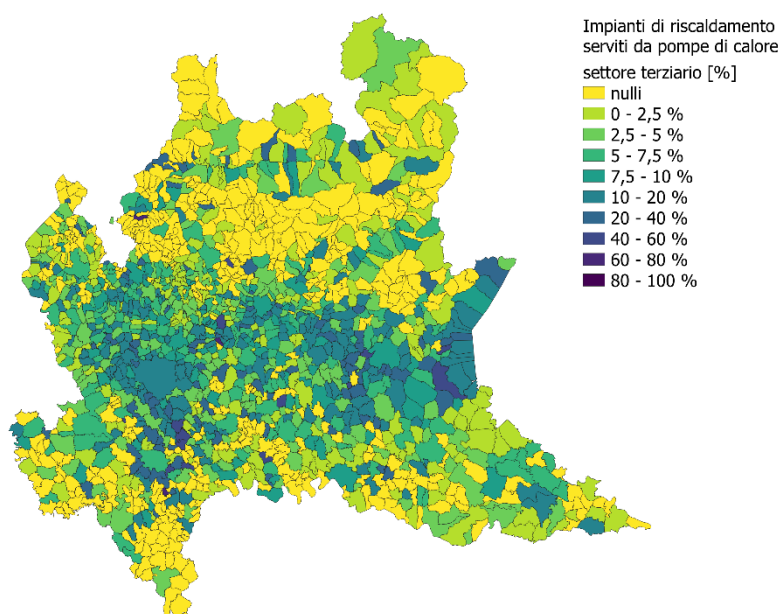


Figura 2.15 - Percentuali di diffusione di impianti di riscaldamento alimentati da pompa di calore per il settore residenziale [%]  
[Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Curit [4]]

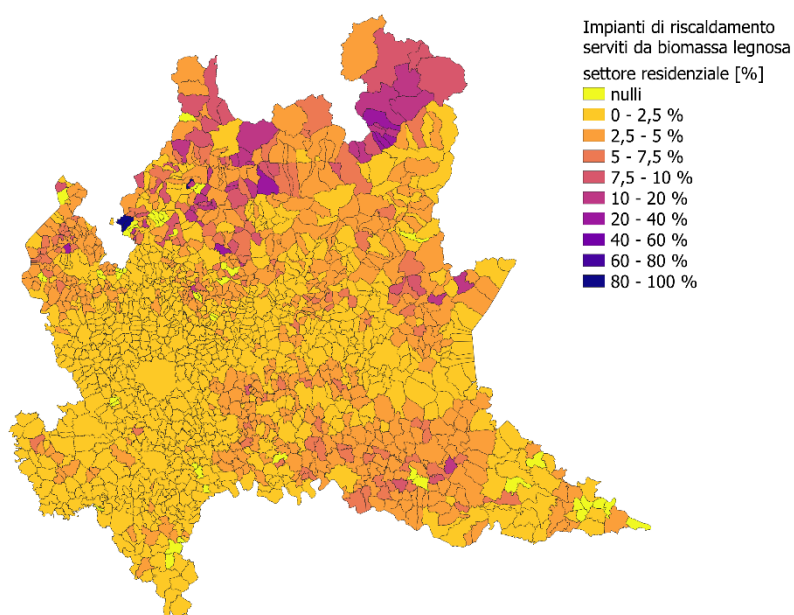


Figura 2.16 - Percentuali di diffusione di impianti di riscaldamento alimentati da biomassa solida per il settore residenziale [%]  
[Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Curit [4]]



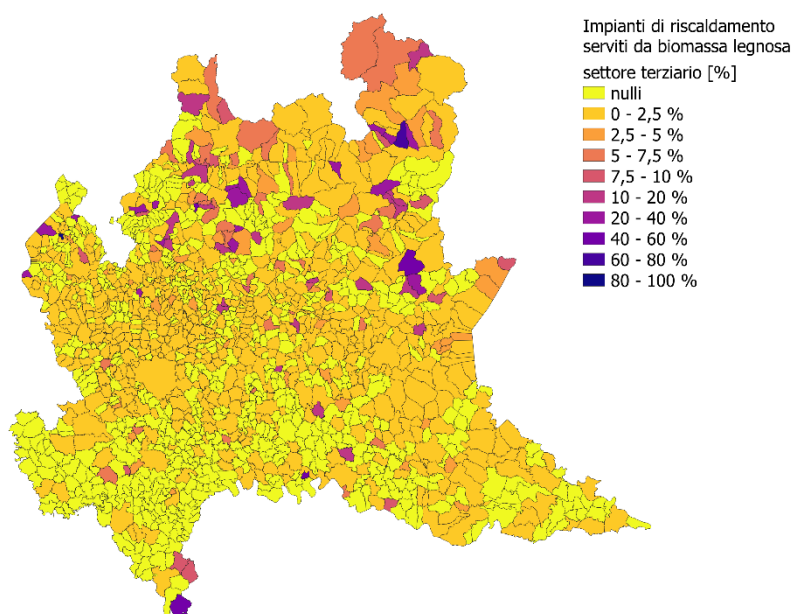


Figura 2.17 - Percentuali di diffusione di impianti di riscaldamento alimentati da biomassa solida per il settore terziario [%] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Curit [4]]

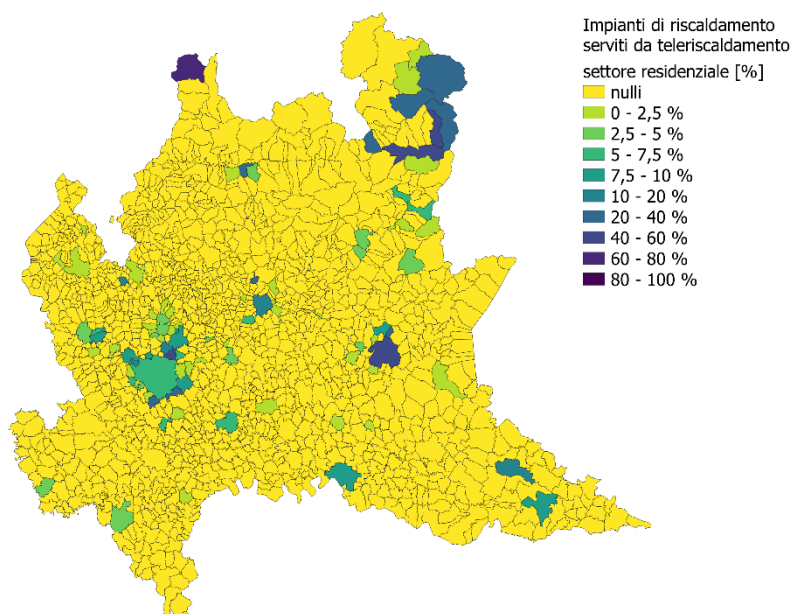


Figura 2.18 - Percentuali di diffusione di impianti di riscaldamento allacciati al teleriscaldamento per il settore residenziale [%] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Curit [4]]

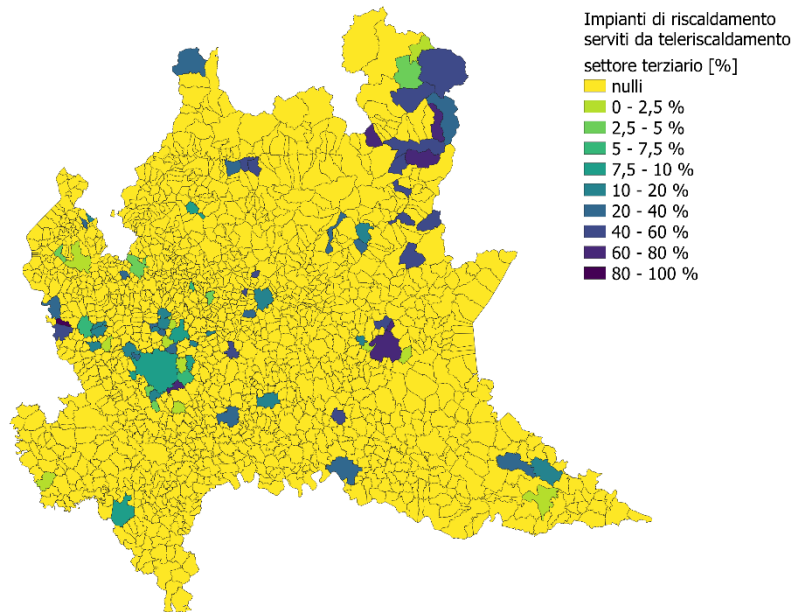


Figura 2.19 - Percentuali di diffusione di impianti di riscaldamento allacciati al teleriscaldamento per il settore terziario [%] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Curit [4]]

L'analisi del Curit mostra un'evidente maggiore diffusione delle pompe di calore nel settore terziario, con valori di copertura che arrivano anche al 78%. Nel settore residenziale tale tecnologia è meno diffusa, con valori fino al 10,5%. Tale situazione riflette verosimilmente la necessità di avere, accoppiati alle pompe di calore, sistemi di diffusione del calore a bassa temperatura. Nel residenziale tali sistemi sono costituiti prevalentemente da pannelli radianti a pavimento, che necessitano di un intervento importante sull'edificio; nel terziario è invece generalmente accettata la presenza di ventilconvettori, senza necessità di interventi importanti. I diversi sistemi di riscaldamento possono essere accoppiati tra loro in modo da permettere di sfruttare il generatore più efficiente in base alle condizioni di esercizio. La Figura 2.20 mostra che la soluzione ibrida più diffusa è quella che comprende pompe di calore e caldaie con una percentuale pari al 58% calcolata sulla potenza totale degli impianti ibridi.

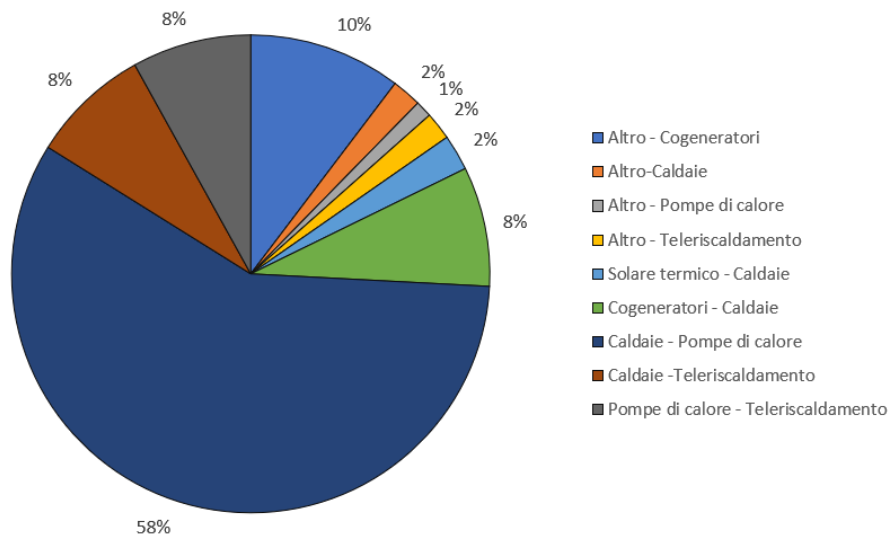


Figura 2.20 – Diffusione degli impianti ibridi per il riscaldamento [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Curit [4]]

La diffusione degli impianti a biomassa è maggiore nella fascia prealpina e a crescere fino alle Alpi, per il terziario e soprattutto per il residenziale. Nel caso del residenziale, si nota una presenza rilevante anche in pianura nelle sole province di Lodi e Cremona. Il terziario vede, infine, una presenza “spot” di comuni con valori percentuali anche importanti.

Il teleriscaldamento presenta una diffusione limitata ad alcuni comuni, ma con percentuali anche alte. La mappa indica una buona diffusione della soluzione laddove la rete è disponibile ma evidenzia anche zone di limitata penetrazione.

Dal database Curit è stata infine valutata per ogni comune la percentuale di impianti centralizzati e di impianti individuali. L’informazione è di rilevanza sia per determinare i costi di investimento delle soluzioni alternative, sia per determinare, nel caso dei condomini, la possibilità di includere il teleriscaldamento nel ventaglio di opzioni disponibili. Per ogni impianto è stata calcolata la potenza di ogni singolo generatore come rapporto tra la potenza dell’impianto di riscaldamento e il numero di generatori corrispondente ad ogni targa, considerando come impianti centralizzati tutti quei generatori con potenza maggiore di 35 kW. Nelle mappe seguenti, si mostra il livello di centralizzazione degli impianti, calcolato sulla potenza termica utile, per il settore residenziale (Figura 2.21) e per il settore terziario (Figura 2.22).

Il livello di centralizzazione si osserva essere innanzitutto maggiore per il terziario e minore per il residenziale. È generalmente maggiore nei grandi centri urbani, soprattutto per il settore residenziale.



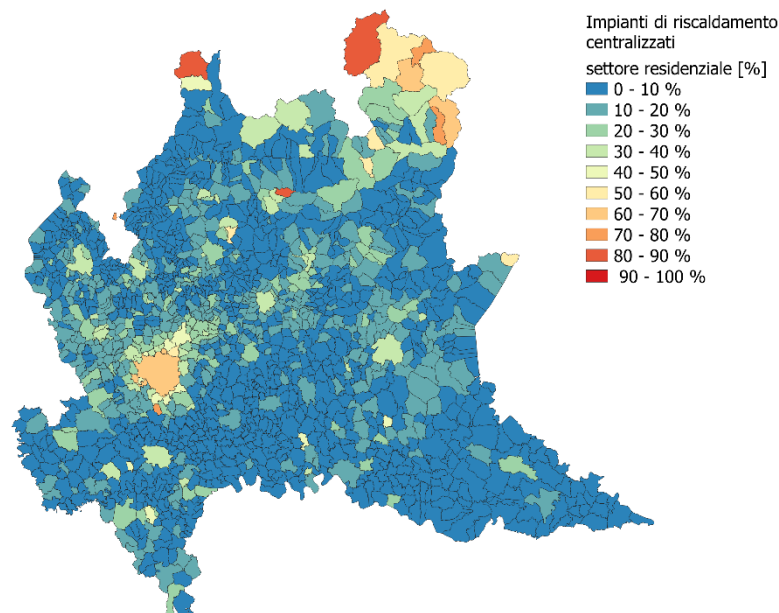


Figura 2.21 – Percentuali di impianti di riscaldamento con potenza maggiore di 35 kW per il settore residenziale [%] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Curit [4]]

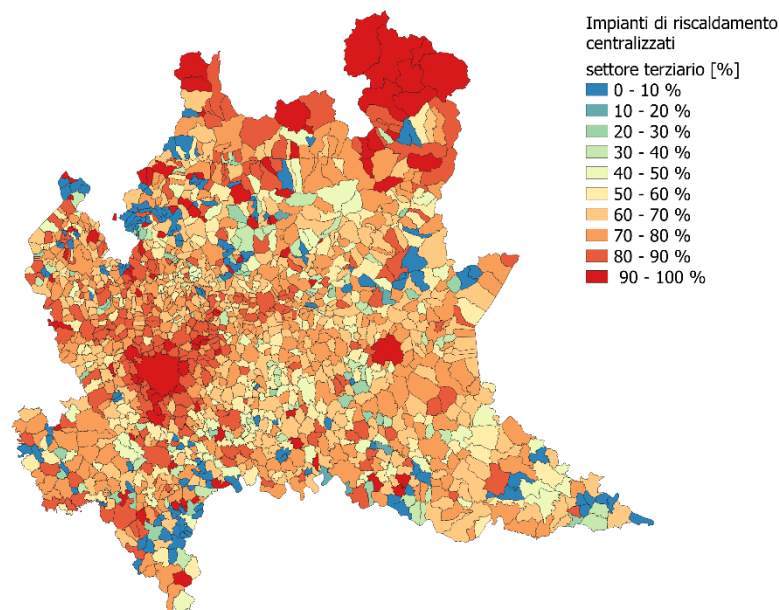


Figura 2.22 - Percentuali di impianti di riscaldamento con potenza maggiore di 35 kW per il settore terziario [%] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Curit [4]]

### 2.3.2 Stima delle utenze servibili da teleriscaldamento

Il teleriscaldamento rientra tra le possibili alternative abilitanti la decarbonizzazione del settore civile. La fattibilità tecnica e la convenienza di tale soluzione, tuttavia, non è sempre certa. Da una parte dipende dall'esistenza o dalla possibilità di installare un impianto di generazione, trasporto e distribuzione del calore, dall'altra, dipende dalla densità spaziale della domanda che determina quante utenze possono essere riscaldate a parità di rete messa a terra. In questa sezione, viene fornita una stima della domanda di calore

servibile da una rete di teleriscaldamento, indipendentemente dalla presenza, dalla fattibilità o dalla convenienza di un impianto di generazione del calore. Una ricostruzione del potenziale di teleriscaldamento che tenga in considerazione anche il lato generazione è materia dei successivi report.

La stima parte dall'aggregazione spaziale della domanda di riscaldamento, stimata a livello di sezione di censimento escludendo la domanda dei condomini che non sono dotati di un impianto centralizzato di distribuzione del calore. Il metodo utilizzato per il raggruppamento della domanda prevede l'aggregazione delle sezioni di censimento secondo un criterio di intensità energetica e prossimità geografica (che esclude quindi le sezioni di censimento distanti e con un fabbisogno di riscaldamento basso). I raggruppamenti, detti anche *cluster*, vengono determinati attraverso l'utilizzo di un algoritmo chiamato DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Application with Noise) [14]. Il numero di cluster dipende dai parametri  $\epsilon$  (in questo caso *distanza* dal centro di una sezione) e  $n$  (in questo caso *numero* di sezioni che ricadono all'interno del raggio) e ad ogni sezione è possibile attribuire un peso in proporzione alla relativa domanda. La scelta dei parametri  $n$  e  $\epsilon$  ha influenza sui valori finali di domanda potenzialmente servibile. Dalla stima del potenziale nazionale di diffusione del teleriscaldamento ([15]) risulta un valore di  $\epsilon$  ottimale per la città di Milano pari a 0,09. A partire da questo risultato si calcola il valore di  $\epsilon$  ottimale per ogni comune della Regione considerando il diametro del comune come valore caratteristico:

$$\epsilon_{comune} = \epsilon_{Milano} \frac{d_{Milano}}{d_{comune}} [-] \quad (2.6)$$

dove

- $\epsilon_{comune}$  è il valore ottimale di  $\epsilon$  per ogni comune [-];
- $\epsilon_{Milano}$  è il valore ottimale di  $\epsilon$  per il comune di Milano [-];
- $d_{Milano}$  è il diametro del comune di Milano [m];
- $d_{comune}$  è il diametro di ogni comune della Regione [m].

Il parametro  $n$  è stato invece assunto pari a 3 come per lo studio svolto su tutto il territorio nazionale.

Dall'analisi risulta un potenziale di utenze termiche servibili da reti di teleriscaldamento pari a 13,3 TWh, di cui 4,7 TWh situati nella città di Milano. Le mappe seguenti mostrano a livello comunale (i) il potenziale in termini assoluti (Figura 2.23), (ii) il potenziale specifico per area comunale (Figura 2.24) e (iii) il rapporto tra il potenziale e il fabbisogno di riscaldamento (Figura 2.25). Dalle mappe si osserva una maggiore concentrazione del potenziale nei capoluoghi di provincia, in valore assoluto, mentre rispetto alla superficie del comune la zona della città di Milano e delle città limitrofe risulta essere quella con potenziale maggiore.

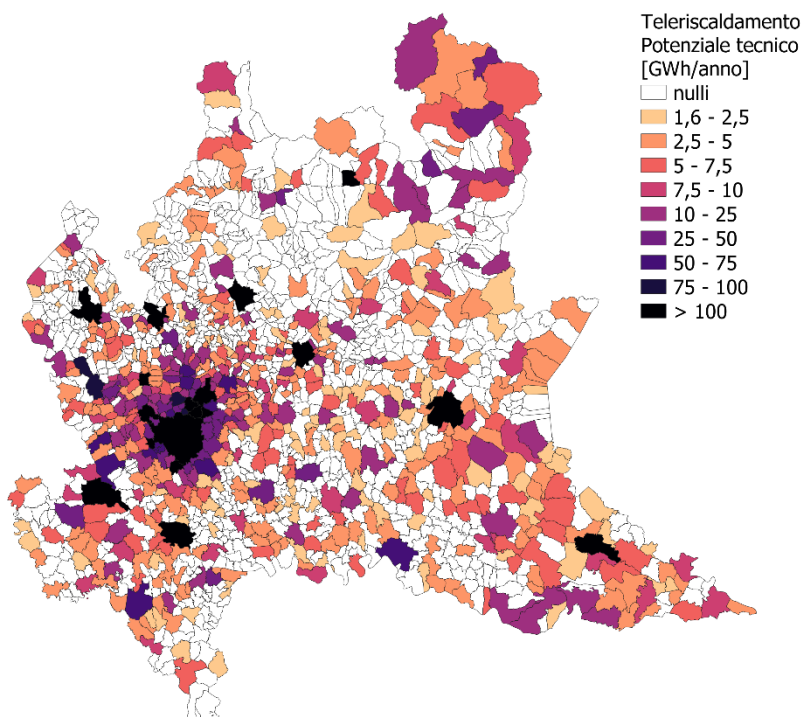


Figura 2.23 – Potenziale tecnico di sviluppo del teleriscaldamento a livello comunale [GWh/anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico]

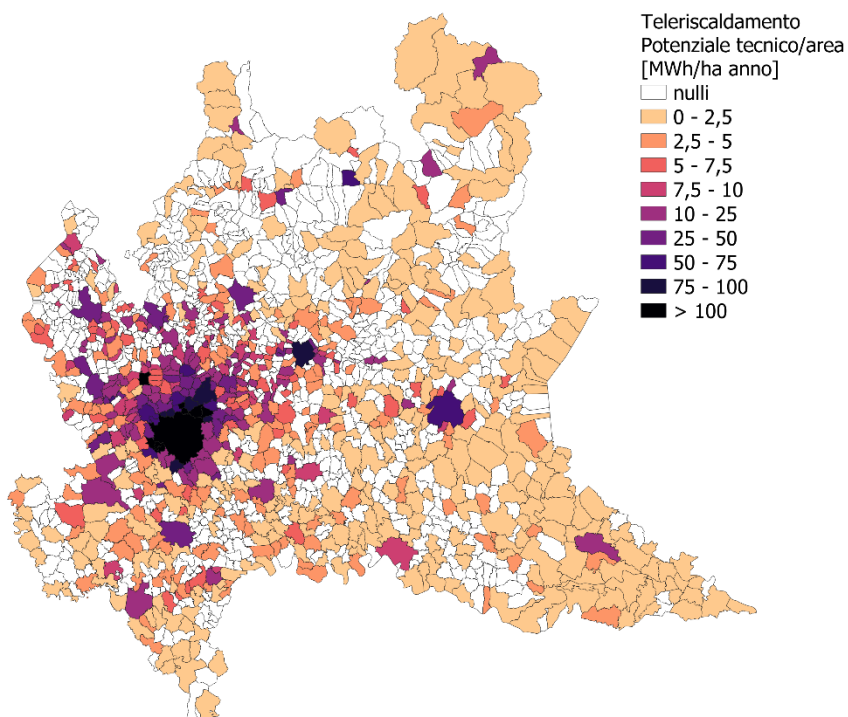


Figura 2.24 – Potenziale tecnico di sviluppo del teleriscaldamento specifico su area a livello comunale [MWh/ha anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico]

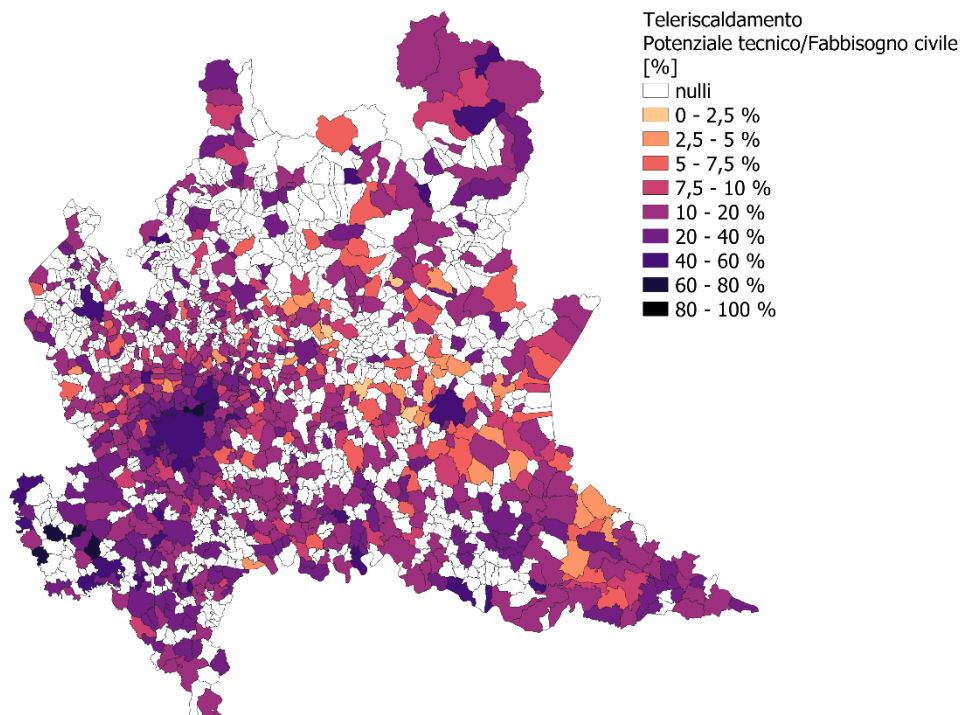


Figura 2.25 – Rapporto tra potenziale tecnico di sviluppo del teleriscaldamento 3GDH e fabbisogno di riscaldamento a livello comunale [%] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico]

### 2.3.3 Potenziale penetrazione delle pompe di calore

Le pompe di calore (PdC) rappresentano uno degli strumenti chiave per la decarbonizzazione del settore termico civile poichè permettono di sfruttare fonti energetiche rinnovabili e raggiungere alte efficienze. Le pompe di calore sfruttano infatti sorgenti esterne di calore, che possono essere: l'aria esterna (pompe di calore aerotermiche), l'acqua di falda (pompe di calore idrotermiche) o il terreno (pompe di calore geotermiche). Differentemente dalle aerotermiche, per le quali non ci sono limiti di disponibilità della fonte, per l'installazione di PdC idrotermiche e geotermiche bisogna dapprima valutare la disponibilità della sorgente esterna. È sulle PdC aerotermiche che si focalizza questa sezione, dal momento che, su base tecnico-economica, queste coprono verosimilmente il potenziale più grande. È importante considerare che le pompe di calore elettriche possono essere allacciate a diverse tipologie di terminali ambiente ma, per mantenere efficienze elevate e garantire un adeguato comfort, è necessario accoppiare le PdC a sistemi di diffusione del calore a bassa temperatura (sistemi ad aria o pannelli radianti). L'efficienza delle PdC elettriche aerotermiche è identificata dal COP ("Coefficient of Performance") pari al rapporto tra la potenza termica richiesta alla pompa di calore e la potenza elettrica necessaria per produrre tale potenza termica. Tale rapporto è influenzato dalle temperature di mandata richiesta dai sistemi ambiente e dalle temperature dell'aria esterna: tanto più la differenza tra queste due temperature è elevata quanto più il COP risulta inferiore. Ciò porta quindi le PdC aerotermiche ad essere adatte a sistemi ambiente a bassa temperatura e climi non troppo rigidi. Le prestazioni stagionali, SCOP ("Seasonal Coefficient Of Performance") sono invece date dal rapporto tra il fabbisogno di riscaldamento e il consumo elettrico associato. Le PdC elettriche aerotermiche presentano ad oggi valori di SCOP compresi tra 2,6 e 4,3 e che vedranno un aumento di circa il 10% al 2030 e del 20% al 2050. Nel residenziale i sistemi ambiente sono costituiti prevalentemente da pannelli radianti a pavimento, che necessitano di un intervento importante sull'edificio; nel terziario è invece generalmente accettata la

presenza di ventilconvettori, senza necessità di interventi importanti. Questo fa sì che la penetrazione delle pompe di calore sia legata, soprattutto nel residenziale, al tasso di ristrutturazione degli edifici.

Nel PNIEC [16] si stima che i consumi finali da pompe di calore alimentate da energia rinnovabile saranno nel 2030 più che raddoppiati rispetto al 2017 (da 2,6 Mtep a 5,7 Mtep a livello nazionale). È ragionevole pensare che la penetrazione delle PdC segua il tasso di riqualificazione profonda degli edifici, ipotizzato dal PNIEC pari a 0,7% annuo per il settore residenziale e 2,9% annuo per il terziario (ospedali esclusi). Nota la superficie degli edifici residenziali in Lombardia (pari a circa 400 Mm<sup>2</sup>), applicando il tasso di ristrutturazione profonda presente nel PNIEC, si può stimare per la Lombardia una superficie riqualificata al 2030 pari a 27 Mm<sup>2</sup>. Considerando un'abitazione media di 100 m<sup>2</sup>, si può assumere che, in uno scenario coerente con il PNIEC, le abitazioni aggiuntive con un impianto a pompa di calore siano circa 280 mila al 2030. La superficie del settore terziario è invece pari a circa 67 Mm<sup>2</sup> in Lombardia, ospedali esclusi. Considerando il tasso di penetrazione della riqualificazione profonda dal PNIEC, si può stimare che al 2030 circa 20 Mm<sup>2</sup> aggiuntivi siano riqualificati e serviti da una pompa di calore. La penetrazione di pompe di calore nel settore terziario passa quindi da 10% a 35,5% per l'installazione nei soli edifici riqualificati; tale potenziale potrebbe aumentare ulteriormente considerando che anche negli edifici non riqualificati è possibile installare una pompa di calore per il riscaldamento.

La Strategia di Lungo Termine (Long Term Strategy - LTS [17]) assume al 2050 che il 70% delle abitazioni del settore residenziale impieghi una pompa di calore elettrica come impianto principale. Tale penetrazione è raggiungibile ipotizzando una tendenza di crescita esponenziale tra la condizione attuale (da Curit il 2%), il 2030 (da PNIEC 7%) e il 2050. Ne risulta un importante tasso medio di riqualificazione profonda del 3% annuo nel periodo 2030-2050 per raggiungere tale obiettivo per il settore residenziale. Per il settore terziario, la LTS non fa invece alcuna specifica circa la penetrazione delle pompe di calore nel settore al 2050.

Nel medio e lungo termine è verosimile immaginare anche la diffusione di PdC a gas (ad assorbimento) parallelamente alle PdC elettriche. Le PdC a gas, azionate termicamente, raggiungono efficienze maggiori delle caldaie a condensazione di oggi. Il loro ruolo vedrà probabilmente la copertura dello spazio di mercato non coperto dalle PdC elettriche per difficoltà nella riqualificazione degli edifici. Nel lungo termine, inoltre, la possibile decarbonizzazione del gas (tramite biometano, idrogeno o metano sintetico) potrà abilitare anche questa tecnologia tra le soluzioni verso una decarbonizzazione completa, seppur limitata dalla disponibilità sostenibile di tali risorse.

#### *Impatto sul sistema elettrico*

La penetrazione delle pompe di calore elettriche non può trascurare il possibile impatto sul sistema elettrico. In particolare, nei momenti di picco di freddo invernali (che comportano un maggior fabbisogno ma anche efficienze minori) la richiesta elettrica potrebbe essere complessivamente critica per il mix di generazione (soprattutto perchè anticorrelata rispetto al fotovoltaico) e critica per la rete di distribuzione. Senza voler essere esaustivi in questa sede, si vuole fornire uno sguardo a titolo illustrativo sui possibili profili di prelievo di elettricità. A seconda dei terminali ambiente, si possono avere diversi profili di utilizzo e di consumo elettrico durante la giornata. Di seguito, si mostrano i possibili profili di utilizzo di un'abitazione media (Figura 2.26) e di un edificio adibito ad uffici (Figura 2.27) nei casi di (i) sistemi ad aria e (ii) pannelli radianti, quest'ultimo solo per le abitazioni residenziali. I pannelli radianti non presentano un profilo on/off ma soltanto un'attenuazione nelle ore notturne. I picchi di potenza assorbita, verosimilmente contemporanei in varie abitazioni e uffici, andranno presi in considerazione attentamente per valutazioni puntuali di impatto



sulla rete. Una disponibilità di dati di consumo elettrico potrebbe certamente rivestire un ruolo importante in queste analisi.

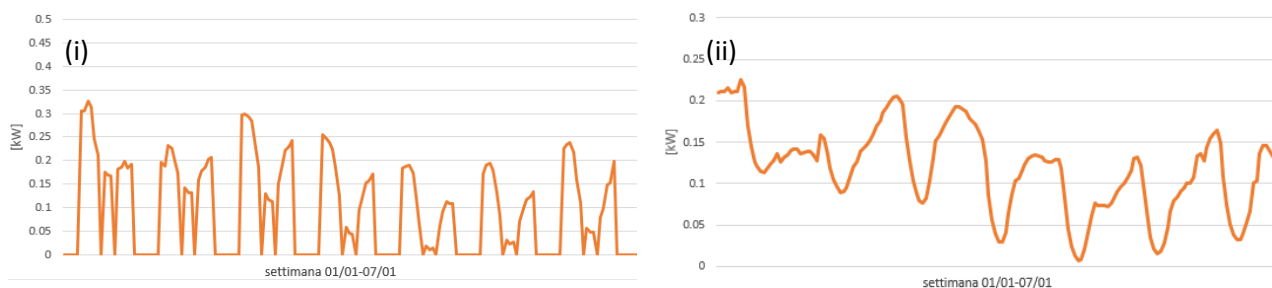


Figura 2.26 – Simulazione di un profilo di consumo elettrico per pompe di calore con terminali ambiente a (i) aria e (ii) pannelli radianti per un’abitazione residenziale nella città di Milano [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico]



Figura 2.27 – Simulazione di un profilo di consumo elettrico per pompe di calore con terminali ambiente ad aria per un edificio adibito a uffici nella città di Milano [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico]

## 2.4 Stima della domanda di raffrescamento

In questo capitolo viene fornita una stima della domanda di raffrescamento dei settori residenziale e terziario. Il procedimento seguito ha come punto di partenza la domanda massima teorica<sup>8</sup> di raffrescamento stimata all’interno del progetto Hotmaps [18]. Tale domanda, con una discretizzazione spaziale per ettaro, è stata ridistribuita all’interno delle sezioni censuarie, attraverso un software GIS<sup>9</sup>.

Essendo i dati di Hotmaps definiti nel complesso di residenziale e terziario, è stata divisa la domanda fra i due settori per poter prendere in considerazione che tali settori si differenziano l’uno dall’altro per (i) ore di utilizzo, (ii) potenze richieste e (iii) penetrazione dei sistemi di condizionamento negli edifici. In particolare, la domanda risultante appartenente al settore terziario è stata ulteriormente suddivisa in sette sottosectori: alberghi (E.1(3)), uffici (E.2), ospedali (E.3), attività ricreative (E.4), commercio (E.5), attività sportive (E.6) e istruzione (E.7).

<sup>8</sup> La domanda di raffrescamento viene definita “massima teorica” in quanto viene considerato che tutti gli edifici residenziali e terziari siano provvisti di un impianto di condizionamento estivo e che funzionino tutte le ore durante il periodo di raffrescamento.

<sup>9</sup> La domanda all’interno di un ettaro è assegnata alla sezione in cui ricade il centro dell’ettaro. Va notato che tale metodo di ripartizione comporta errori a livello locale, comunque trascurabili a scala comunale o maggiore.

Per suddividere la domanda di raffrescamento sono stati considerate le superfici degli edifici residenziali e degli edifici del terziario, queste ultime suddivise nei sette sotto settori. La domanda di raffrescamento di Hotmaps viene suddivisa dunque tramite le Equazioni (2.7) e (2.8):

$$GCD_{res,j} = HD_j \frac{S_{res,j}}{\sum_j [S_{res,j} + \sum_i (s_{terz,i,j} \cdot lav_{terz,j,i})]} \left[ \frac{MWh}{anno} \right] \quad (2.7)$$

$$GCD_{terz,i,j} = HD_j \frac{s_{terz,j,i} \cdot lav_{terz,j,i}}{\sum_j [S_{res,j} + \sum_i (s_{terz,i,j} \cdot lav_{terz,j,i})]} \left[ \frac{MWh}{anno} \right] \quad (2.8)$$

dove

- $GCD_{res,j}$  è la domanda teorica di raffrescamento del settore residenziale nella sezione di censimento j-esima [MWh/anno];
- $GCD_{terz,i,j}$  è la domanda teorica di raffrescamento del sotto settore terziario i-esimo nella sezione di censimento j-esima [MWh/anno];
- $HD_j$  è la domanda teorica di raffrescamento totale ricavata da Hotmaps [18] [MWh/anno];
- $S_{res,j}$  è la superficie degli edifici del settore residenziale per sezione di censimento j-esima [m<sup>2</sup>], disponibile dal censimento Istat;
- $s_{terz,j,i}$  è la superficie degli edifici del settore terziario specifica per lavoratore per sezione di censimento j-esima e sotto settore i-esimo [m<sup>2</sup>/lav] (Tabella 2.3);
- $lav_{terz,j,i}$  indica il numero di lavoratori per sezione di censimento j-esima e sotto settore i-esimo [lav], disponibile dal censimento Istat;

In questo modo è stata ricavata la domanda *massima teorica* per sezione di censimento e per settore. Questa viene poi trasformata in domanda *effettiva* attraverso un valore di penetrazione degli impianti negli edifici e attraverso una stima del numero di ore di effettivo utilizzo.

Per il settore residenziale, il valore regionale di penetrazione è ricavato dal report del GSE [11] per l'anno 2013. Per ottenere i valori provinciali sono stati considerati i gradi giorno di raffrescamento (CDD – Cooling Degree Days), disponibili da Eurostat [19], e la superficie degli edifici, ricavata da Istat [1], attraverso l'Equazione (2.9):

$$Pen_y = CDD_y \cdot \frac{\sum_y (S_{res,y} \cdot Pen_x)}{\sum_y (S_{res,y} \cdot CDD_y)} \cdot 100 [\%] \quad (2.9)$$

dove

- $Pen_y$  è la penetrazione della provincia y-esima dei sistemi di condizionamento [%];
- $S_y$  è la superficie totale degli edifici residenziali della provincia y-esima [m<sup>2</sup>], ricavata da Istat [1];
- $Pen_x$  è la penetrazione regionale dei sistemi di condizionamento della regione x-esima [%], dichiarata da GSE [11];
- $CDD_y$  sono i gradi giorno di raffrescamento della provincia y-esima [DD], ricavati da Eurostat [19].

Le ore di funzionamento giornaliere dei sistemi di condizionamento sono fornite dal censimento di Istat a livello regionale [1]. La domanda effettiva di raffrescamento per sezione censuaria è stata ricavata dunque tramite l'Equazione (2.10):

$$CD_{res,j} = GCD_{res,j} \cdot Pen_y \cdot \frac{HF_x}{24} \left[ \frac{MWh}{anno} \right] \quad (2.10)$$

dove

- $CD_{res,j}$  è la domanda di raffrescamento effettiva del settore residenziale per la sezione di censimento j-esima [MWh/anno];
- $GCD_{res,j}$  è la domanda di raffrescamento massima teorica per il settore residenziale nella sezione di censimento j-esima [MWh/anno];
- $Pen_y$  è la penetrazione dei sistemi di raffrescamento nel settore residenziale per la provincia y-esima [%];
- $HF_x$  indica le ore di funzionamento giornaliere degli impianti della regione x-esima [h], disponibili da Istat [1] e divise per 24 per ottenere la frazione di utilizzo giornaliera.

Per il settore terziario, la penetrazione dei sistemi di condizionamento e le ore di funzionamento giornaliera (Tabella 2.4), sono stati assunti dagli autori.

Tabella 2.4 - Penetrazione e coefficienti di utilizzo assunti per i sottosettori del terziario

Destinazione d'uso	Penetrazione	Coefficiente di utilizzo
E.1(3) – alberghi	1,00	1,00
E.2 – uffici	0,95	0,80
E.3 – ospedali	1,00	1,00
E.4 – attività ricreative	0,70	0,80
E.5 – commercio	0,80	0,90
E.6 – attività sportive	0,70	0,80
E.7 – istruzione	0,10	0,60

L'effettiva domanda di raffrescamento per ogni sottosettore è calcolata tramite l'Equazione (2.11):

$$CD_{terz,i,j} = GCD_{terz,i,j} \cdot Pen_i \cdot CU_i \left[ \frac{MWh}{anno} \right] \quad (2.11)$$

Dove:

- $CD_{terz,i,j}$  è la domanda effettiva di raffrescamento per il sottosettore i-esimo nella sezione di censimento j-esima [MWh/anno];
- $GCD_{terz,i,j}$  è la domanda massima teorica di raffrescamento per il sottosettore i-esimo nella sezione j-esima;
- $Pen_i$  è la penetrazione dei sistemi di raffrescamento per il sottosettore i-esimo [%];
- $CU_i$  è il coefficiente di utilizzo giornaliero del sistema di raffrescamento [%].

Nelle mappe seguenti è rappresentata la distribuzione del fabbisogno di raffrescamento specifico per superficie territoriale, per il settore residenziale in Figura 2.28, per il settore terziario in Figura 2.29 e per il complessivo settore civile in Figura 2.30.

In entrambe le mappe si osserva che una maggior densità di fabbisogno è localizzata nei capoluoghi di provincia ed in particolare nella città di Milano. Inoltre, si nota come il fabbisogno per il raffrescamento del settore terziario sia superiore rispetto a quello del settore residenziale a causa della maggiore penetrazione in questo settore. Il fabbisogno di raffrescamento del settore terziario risulta maggiore anche in valore assoluto rispetto a quello del residenziale, pari rispettivamente a 3,21 TWh/anno e 0,86 TWh/anno per un totale di 4,07 TWh/anno.



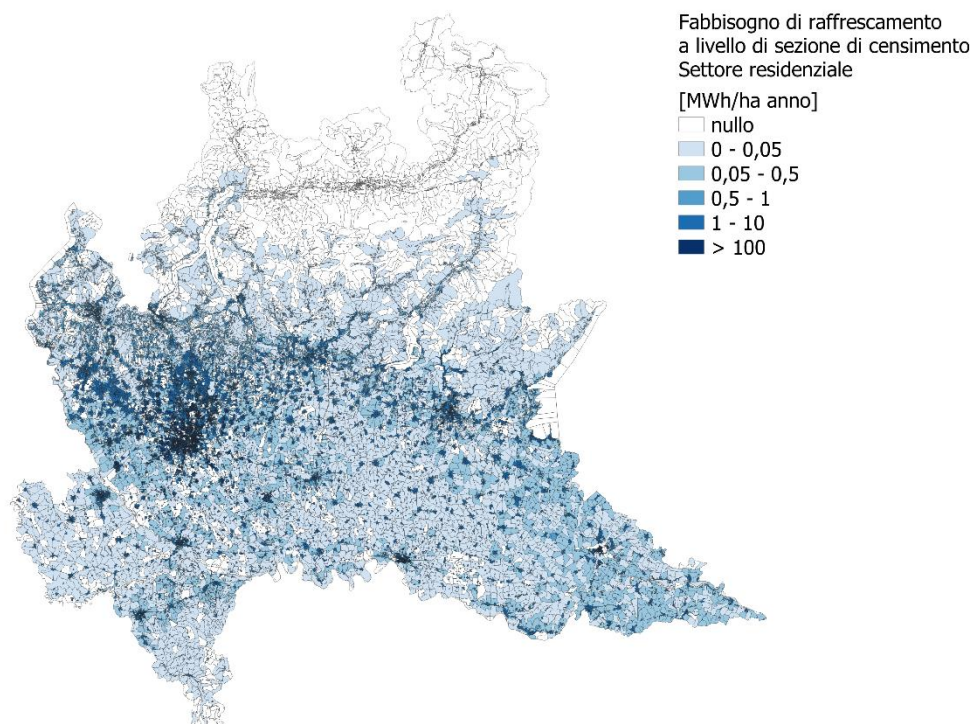


Figura 2.28 - Fabbisogno di raffrescamento del settore residenziale specifico per superficie a livello di sezione di censimento [MWh/ha anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Hotmaps [18], GSE [11], Eurostat [19] e Istat [1]]

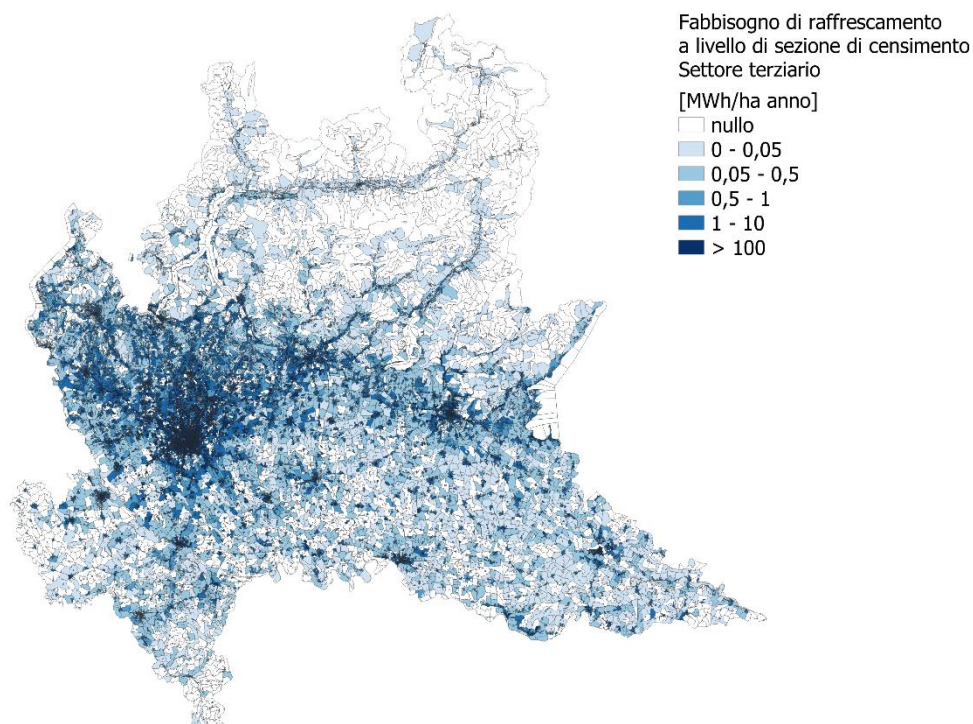


Figura 2.29 - Fabbisogno di raffrescamento del settore terziario specifico per superficie a livello di sezione di censimento [MWh/ha anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Hotmaps [18], GSE [11], Eurostat [19] e Istat [2]]

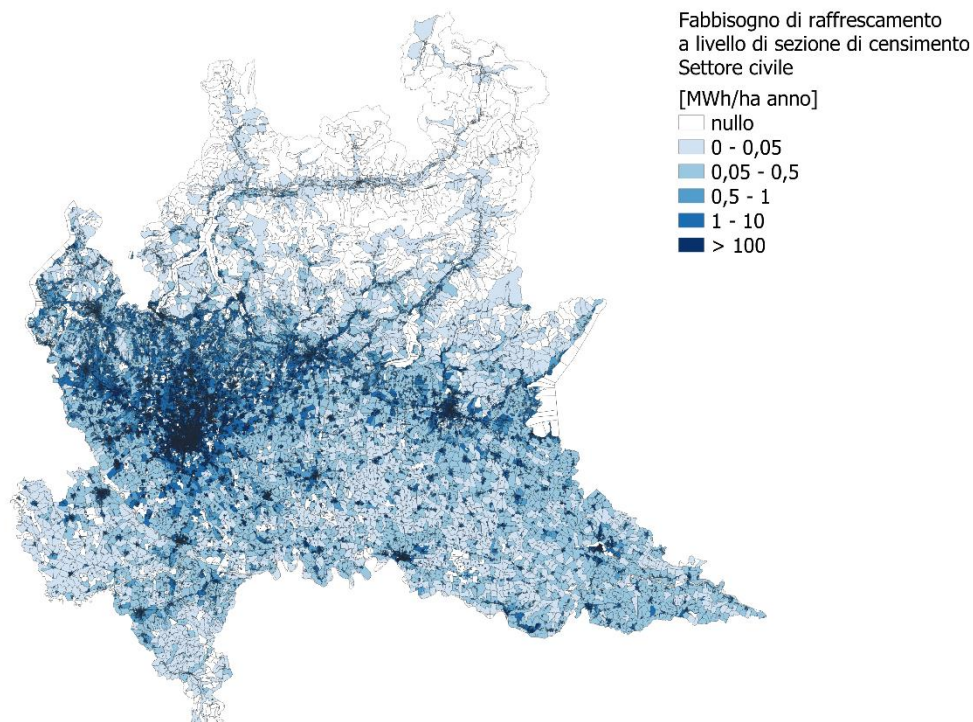


Figura 2.30 - Fabbisogno di raffrescamento del settore civile specifico per superficie a livello di sezione di censimento [MWh/ha anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Hotmaps [18], GSE [11], Eurostat [19] e Istat [1] e [2]]

Di seguito, invece, vengono mostrati i risultati ottenuti dalla distribuzione del fabbisogno di riscaldamento a livello comunale per il settore residenziale (Figura 2.31), terziario (Figura 2.32) e civile (Figura 2.33). Globalmente, si osserva una maggiore densità di domanda nella zona centrale della regione a causa della maggior densità di edificato ma anche per il clima più caldo rispetto alle zone montane. In particolare, la zona con la più alta densità di domanda risulta essere quella attorno alla città di Milano, con valori del settore civile che raggiungono i 49,1 MWh/ha nel capoluogo, suddiviso in 40,5 MWh/ha per il settore terziario e 8,6 MWh/ha per il settore residenziale.

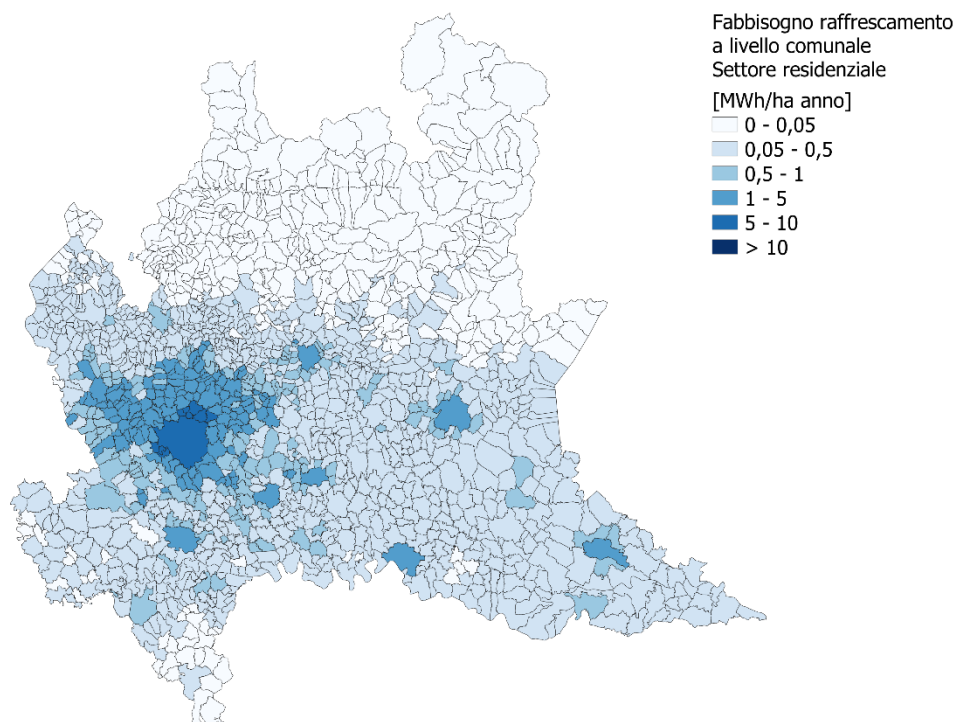


Figura 2.31 - Fabbisogno di raffrescamento del settore residenziale specifico per superficie a livello comunale [MWh/ha anno]  
[Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Hotmaps [18], GSE [11], Eurostat [19] e Istat [1]]

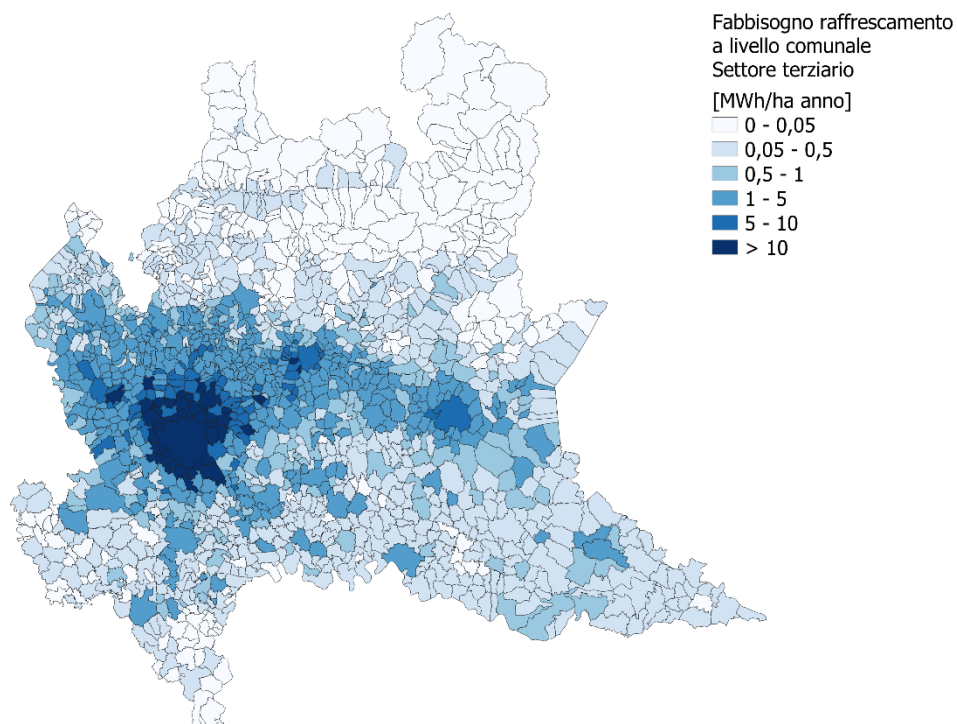


Figura 2.32 - Fabbisogno di raffrescamento del settore terziario specifico per superficie a livello comunale [MWh/ha anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Hotmaps [18], GSE [11], Eurostat [19] e Istat [2]]



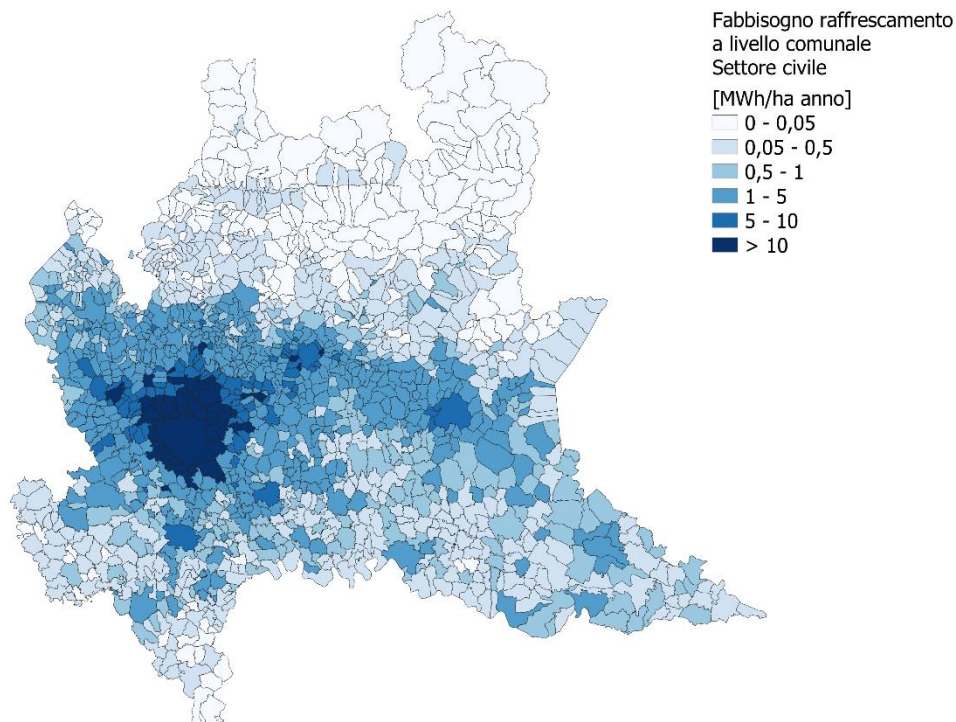


Figura 2.33 - Fabbisogno di raffrescamento del settore civile specifico per superficie a livello comunale [MWh/ha anno] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Hotmaps [18], GSE [11], Eurostat [19] e Istat [1] e [2]]

La domanda di raffrescamento è destinata ad aumentare nel prossimo futuro a causa dell'aumento delle temperature e degli standard di comfort delle persone che quindi saranno più portate ad installare impianti di raffrescamento. L'International Energy Agency (IEA) [20], stima che, in Italia, i giorni con temperatura media giornaliera superiore a 25°C raddoppieranno al 2050 rispetto al 2016. Analizzando il numero di apparecchi di raffrescamento installati tra 2013 e 2020, risulta un incremento medio annuo di circa il 4%. Applicando questo tasso ai valori di penetrazione attuali si ottiene una penetrazione pari a circa il 90% già nel 2030, con un incremento del fabbisogno totale di raffrescamento del 61%.

Anche per il raffrescamento sarà importante tenere in considerazione l'impatto sul sistema elettrico, in termini di adeguatezza del mix di generazione e della rete di distribuzione.

## 2.5 Stima del potenziale fotovoltaico (piccoli impianti)

Il potenziale di generazione rinnovabile offerto dal fotovoltaico si può distinguere concettualmente in due contributi importanti: i piccoli impianti distribuiti, normalmente collocati sui tetti degli edifici e connessi in bassa tensione e i grandi impianti centralizzati, normalmente collocati a terra e potenzialmente connessi anche in media tensione. Le principali differenze fra queste due categorie stanno nell'efficienza complessiva degli impianti, nel suolo occupato e nell'impatto paesaggistico e infine nella relazione con il sistema elettrico. I piccoli impianti sono utilizzati principalmente con l'obiettivo di autoproduzione, autoconsumo e vendita dell'eccedenza, anche all'interno di comunità energetiche; i grandi impianti con l'obiettivo di vendita sul mercato. Essendo gli edifici l'ambito di indagine di questo capitolo, la sezione si focalizza sui piccoli impianti, installabili sui tetti degli edifici. La sezione dapprima analizza la situazione esistente e fornisce poi una stima del potenziale ancora non sfruttato.

### 2.5.1 Situazione attuale

Il gestore dei servizi energetici (GSE) offre una panoramica degli impianti fotovoltaici esistenti su tutto il suolo italiano con dettaglio comunale [21]. A fine luglio 2021, in Lombardia sono presenti 127 780 impianti fotovoltaici per un totale di 2,22 GW di potenza. Guardando al grafico di Figura 2.34, si nota che i piccoli impianti inferiori ai 20 kW sono i più numerosi, con un contributo di circa il 27% in termini di potenza totale, mentre impianti di media capacità (fra 20 e 1000 kW), molto meno numerosi, contribuiscono per circa il 70% della potenza totale installata. Solo una parte residua (3%) è attribuita a impianti maggiori di 1 MW.

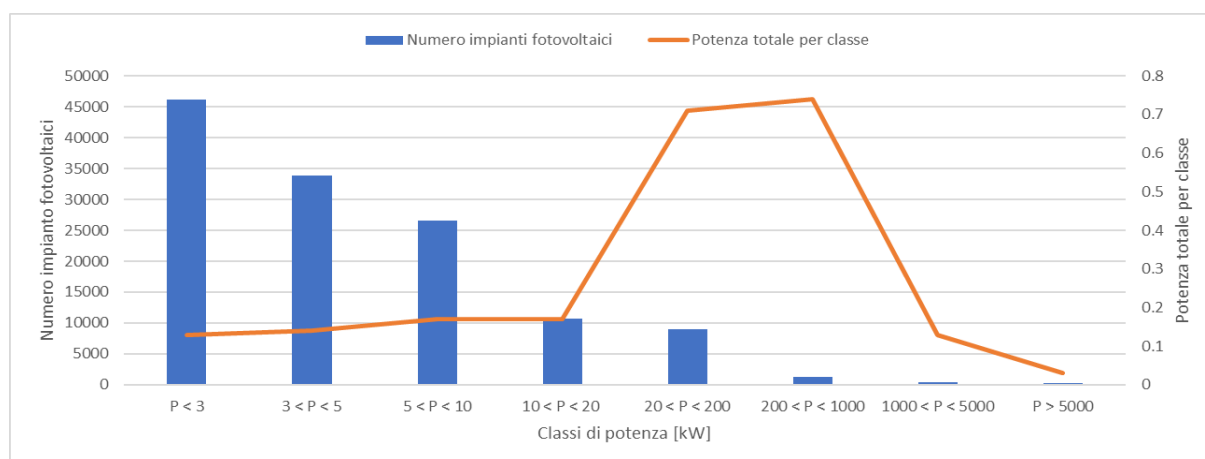


Figura 2.34 - Distribuzione del fotovoltaico in Lombardia per classi di potenza [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati GSE [21]]

La Figura 2.35 e la Figura 2.36 mostrano la distribuzione comunale della potenza, rispettivamente in rapporto alla popolazione residente al 2019 (da ISTAT [22]) e rispetto alla superficie comunale. I valori riportati si riferiscono ai soli impianti con potenza individuale inferiore a 20 kW (soglia con cui si vogliono identificare qui gli impianti a tetto). Le due mappe forniscono informazioni interessanti da due punti di vista diversi: l'installato procapite è pressochè nullo nel capoluogo e aumenta allontanandosi dallo stesso; la densità spaziale, i.e. installato per superficie territoriale è particolarmente concentrato nella fascia immediatamente a nord, nord-est del capoluogo, fino a Brescia.

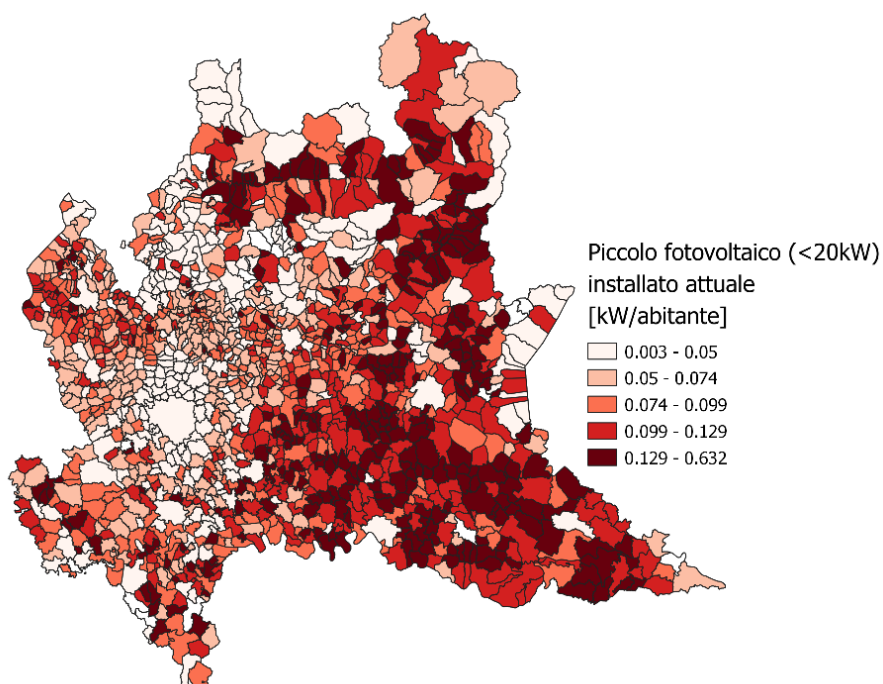


Figura 2.35 – Piccolo fotovoltaico installato attualmente per comune per abitante [kW/abitante] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati GSE [21]]

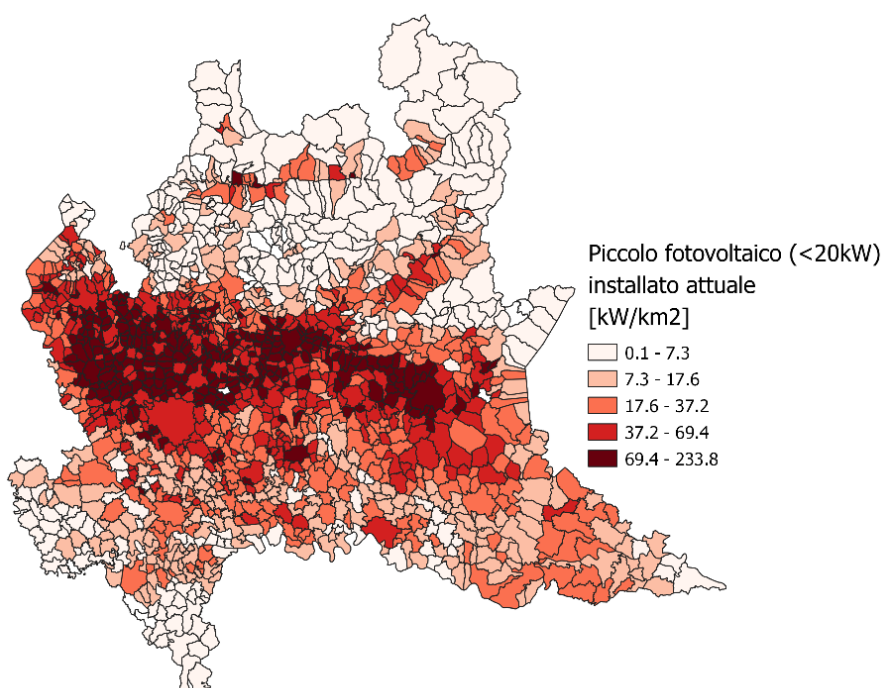


Figura 2.36 – Densità di piccolo fotovoltaico per comune [kW/km²] [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati GSE [21]]

### 2.5.2 Stima del potenziale non sfruttato

La stima del potenziale di fotovoltaico non sfruttato si è basata sul software online Hotmaps, basato su GIS (Geographic Information System), nato con l'obiettivo di supportare la pianificazione energetica in Europa,



nel particolare ambito dei servizi di riscaldamento e raffrescamento. Hotmaps permette analisi con riferimento alle unità territoriali statistiche (NUTS) [23] o secondo classificazione LAU2, corrispondente alle suddivisioni comunali [24]. I dati spaziali non sono riferiti ai singoli edifici, ma suddivisi in aree regolari della dimensione di un ettaro e sono scaricabili in formato raster<sup>10</sup>. Il software è costituito da una mappa di base dove possono essere visualizzate informazioni spaziali, tra cui anche le variabili climatiche (e.g. radiazione solare). Selezionando un'area di interesse, Hotmaps offre la possibilità di sfruttare alcuni moduli di calcolo per la stima del potenziale di determinate fonti. Di interesse, ai fini di questo studio, è in particolare la possibilità di valutare il potenziale di energia solare. Tale modulo di calcolo mira a calcolare il potenziale energetico di solare termico e fotovoltaico in un'area selezionata, considerando l'installazione di nuovi impianti su una percentuale delle aree disponibili (l'area predefinita è l'impronta dell'edificio).

Nel modulo di calcolo del potenziale solare, esistono dati di input già presenti, non modificabili, e altri che possono essere liberamente scelti dall'utente. I parametri non modificabili riguardano le caratteristiche del territorio di cui si vuole stimare il potenziale, come l'irraggiamento solare medio annuo [ $\text{kWh/m}^2$ ] e l'impronta degli edifici su cui installare gli impianti [ $\text{m}^2$ ]. I parametri modificabili dall'utente riguardano invece le caratteristiche degli impianti che si ipotizza installare sugli edifici, tra cui:

- La percentuale di superficie disponibile che può essere coperta con pannelli solari, per considerare questioni di tipo paesaggistico/architettonico (edifici in centro storico) e tecnico-economiche (esposizione delle falde dei tetti), e l'effettiva disponibilità di spazio non occupato altrimenti (e.g. solare termico, comignoli, ecc.) – sono stati considerati tre scenari che vedono rispettivamente valori di 4,5%, 6,0% e 7,5%;
- Il suolo occupato per unità di potenza di picco installata, per il quale si è assunto un valore medio di  $0,15 \text{ kW}_p/\text{m}^2$ ;
- La potenza di picco installata per impianto, per la quale si è assunta una potenza di  $3 \text{ kW}_p$  (tale valore ammette anche i multipli, e.g. 6 kW, 9 kW, ecc.).

Dal momento che l'area identificabile per la stima del fotovoltaico può raggiungere estensioni anche di scala nazionale, tutti i parametri modificabili dall'utente sono da considerarsi descrittivi della media degli impianti fotovoltaici per l'area selezionata.

L'output del modulo di calcolo comprende, fra le altre cose:

- un file raster con le aree più adatte per la produzione di energia fotovoltaica;
- la produzione totale annua di energia elettrica da fotovoltaico [ $\text{TWh/anno}$ ];
- il numero totale di impianti fotovoltaici installati.

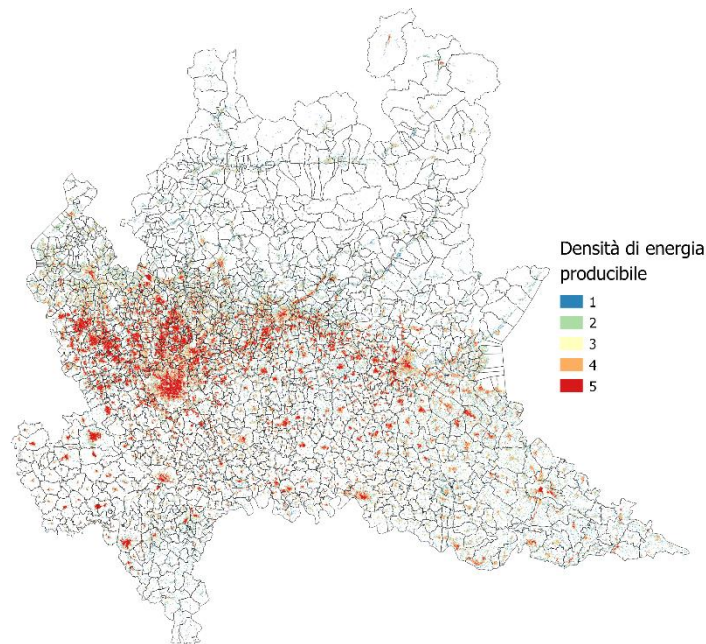
La potenza totale installata, ottenuta come prodotto tra la potenza media per impianto e il numero di impianti installati, è riportata nei tre scenari in Tabella 2.5.

Tabella 2.5 – Potenziale stimato nei tre scenari di disponibilità delle superfici

superficie disponibile	Numero di impianti	Energia generata [ $\text{TWh/y}$ ]	Potenza totale [ $\text{GW}$ ]
4,5%	2 001 131	7,56	6,00
6,0%	2 749 941	10,39	8,25
7,5%	3 501 935	13,23	10,50

<sup>10</sup> L'immagine raster viene vista come una scacchiera e ad ogni elemento della scacchiera, chiamato pixel, viene associato uno specifico colore.

Il raster contiene le informazioni spaziali - con un dettaglio in ettari - sulle aree che possono essere potenzialmente coperte dai pannelli solari. In particolare, individua cinque aree in funzione della densità di energia producibile (i.e. energia producibile per unità di superficie di territorio). A titolo illustrativo, la Figura 2.37, mostra la distribuzione spaziale nello scenario intermedio (6,0%).



*Figura 2.37 - Densità di energia producibile ottenuta dal modulo di calcolo [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Hotmaps [18]]*

Tale distribuzione spaziale, è stata utilizzata per allocare ai vari comuni lombardi i valori di potenziale prima riportati (Tabella 2.5), assegnando un peso ad ogni area (da 1 a 5). Il potenziale totale risultante è mostrato in Figura 2.38 per lo scenario intermedio.

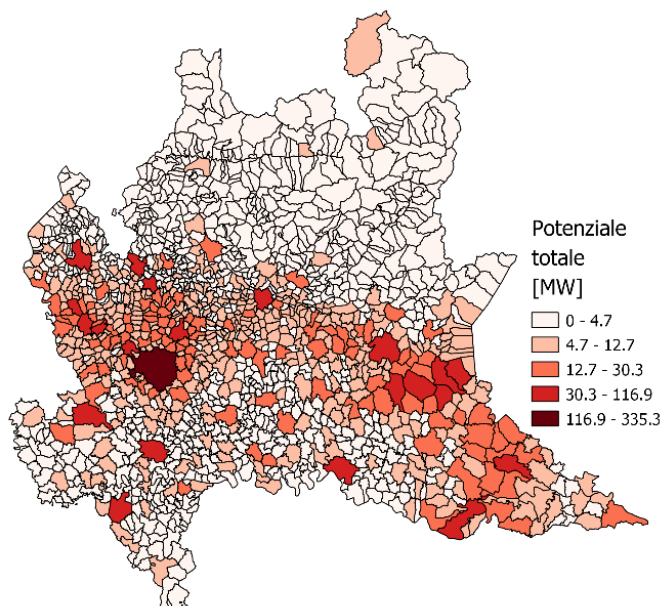


Figura 2.38 - Potenziale di fotovoltaico installabile per lo scenario intermedio [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Hotmaps [18]]

È stato poi stimato il potenziale non ancora sfruttato quantificando la differenza tra il potenziale totale e l'attuale installato (assunto considerando solo gli impianti con potenza individuale inferiore a 20 kW). Il potenziale non ancora sfruttato è mostrato in Figura 2.39 e Figura 2.40, rispettivamente in termini assoluti e in termini relativi (saturazione del potenziale).

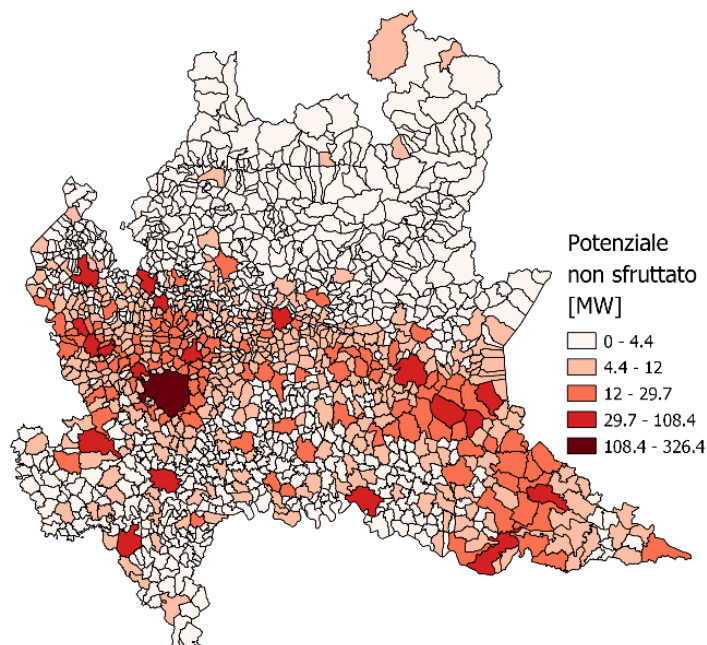
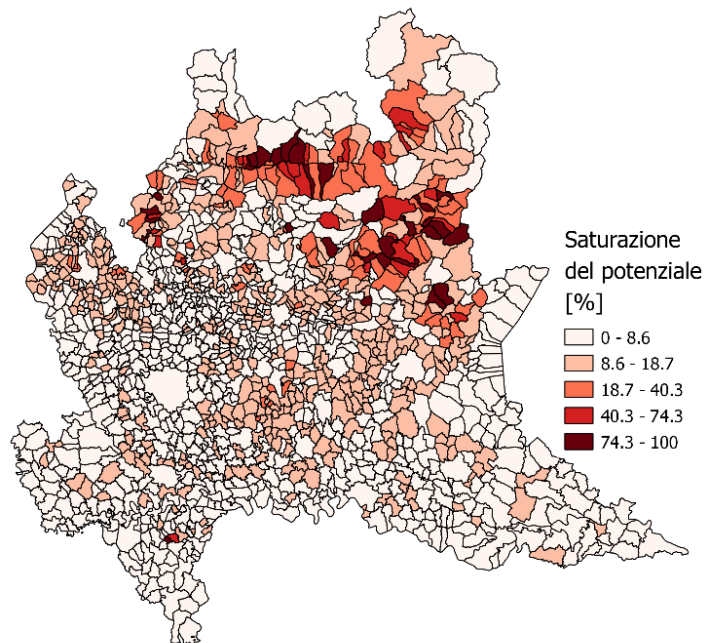


Figura 2.39 - Potenziale di fotovoltaico non ancora sfruttato in termini assoluti [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Hotmaps [18]]



*Figura 2.40 - Potenziale di fotovoltaico non ancora sfruttato in termini relativi [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati Hotmaps [18]]*

In termini assoluti, il potenziale è prevalentemente localizzato nei grandi comuni a maggiore urbanizzazione. In termini relativi, la maggior parte dei comuni risulta sotto al 20% di saturazione del potenziale. I comuni montani risultano invece quelli con livello di saturazione maggiore.

### 3 Settore Trasporti

Il presente capitolo si focalizza sul settore dei trasporti, con uno sguardo alle varie categorie di veicoli e distinguendo il mercato di destinazione (i.e. traffico passeggeri o trasporto merci). Viene dapprima presentata una fotografia dell'attuale parco circolante, differenziando per tipologia di veicolo e per modalità di spostamento (Sezione 3.1). Vengono successivamente analizzate le attuali infrastrutture di ricarica e di rifornimento (Sezione 3.3) e vengono formulati dei possibili scenari di evoluzione del settore (Sezione 3.2). Il capitolo prosegue con un'analisi sull'impatto della elettrificazione dei trasporti sulla rete elettrica (Sezione 3.4).

#### 3.1 Fotografia del parco circolante attuale

Questa prima sezione presenta una fotografia dell'attuale parco circolante all'interno dei confini regionali, specialmente su gomma, seguito da una panoramica sui consumi di combustibili, e da una analisi sugli spostamenti. Per il trasporto su gomma si è partiti dalle informazioni riportate nell'*Autoritratto* del 2019 dell'Automobile Club d'Italia (ACI) [25], che fornisce annualmente e con buon dettaglio spaziale l'evoluzione della flotta di veicoli nelle varie tipologie. Nello specifico, nell'analisi vengono considerate le seguenti categorie: (i) autovetture, (ii) autocarri adibiti al trasporto merci, (iii) trattori stradali, (iv) autobus e (v) autoveicoli speciali.

##### 3.1.1 Autovetture

Viene presentato di seguito il parco circolante di autovetture, definite da ACI come *vetture destinate al trasporto di persone, aventi al massimo nove posti, incluso quello del conducente* [26]. Al 31 dicembre 2019 vengono registrate in circolazione in Lombardia 6,2 milioni di autovetture (corrispondenti a circa il 16% del totale nazionale, superiore a 39,5 milioni di unità). In Figura 3.1, Figura 3.2, Figura 3.3 viene presentata la distribuzione spaziale, con dettaglio comunale, del parco di autovetture circolante nel 2019, rispettivamente in valori assoluti, in valori procapite e in rapporto alla superficie territoriale.



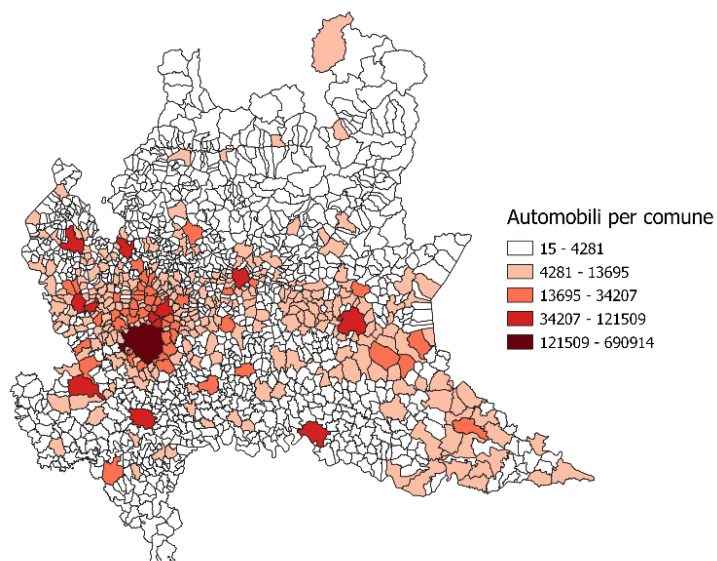


Figura 3.1 – Distribuzione del parco circolante di autovetture con dettaglio spaziale comunale nel 2019  
[Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI [25]]

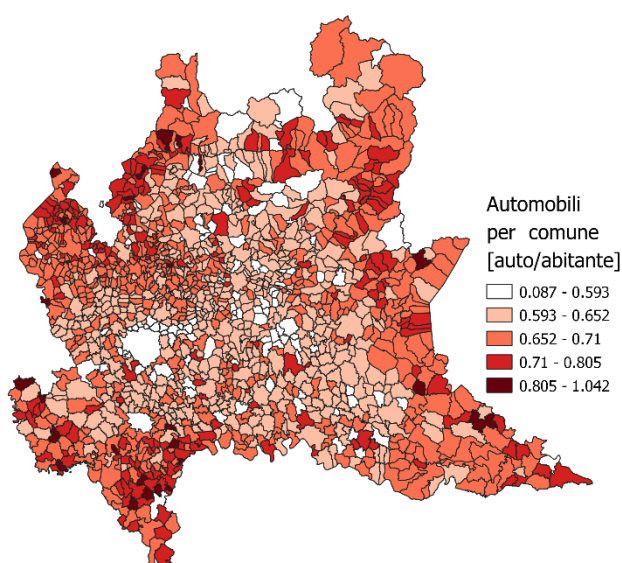


Figura 3.2 – Distribuzione del parco circolante di autovetture rapportato con la popolazione residente, con dettaglio spaziale comunale nel 2019 [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI [25]]



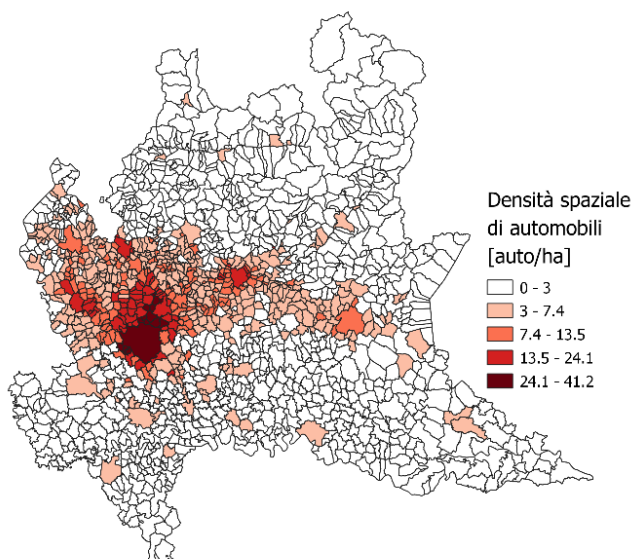


Figura 3.3 - Distribuzione del parco circolante di autovetture rapportato per unità di superficie (ettaro) con dettaglio spaziale comunale nel 2019 [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI [25]]

Dalla prima mappa si può notare che la distribuzione spaziale delle automobili nei comuni lombardi sia incentrata nei capoluoghi di provincia, che ospitano nella loro totalità 1,26 milioni di autovetture, ovvero il 20% sul totale. Ciononostante, la seconda mappa mostra come siano principalmente i piccoli comuni delle zone periferiche della regione ad avere la maggior concentrazione di autoveicoli per abitante, mentre i capoluoghi di provincia occupano i posti più bassi della classifica. Verosimilmente, pur ospitando il maggior numero di automobili, i grandi centri urbani presentano diverse alternative per la mobilità. La mappa della densità del parco veicolare (auto per unità di superficie territoriale), evidenzia la concentrazione di auto nella zona di Milano e nella fascia di territorio immediatamente a nord.

In Figura 3.4 viene presentata la ripartizione della flotta per tipologia di alimentazione e per classe ambientale. I periodi di immatricolazione corrispondenti alle classi ambientali sono riportati in Tabella 3.1.

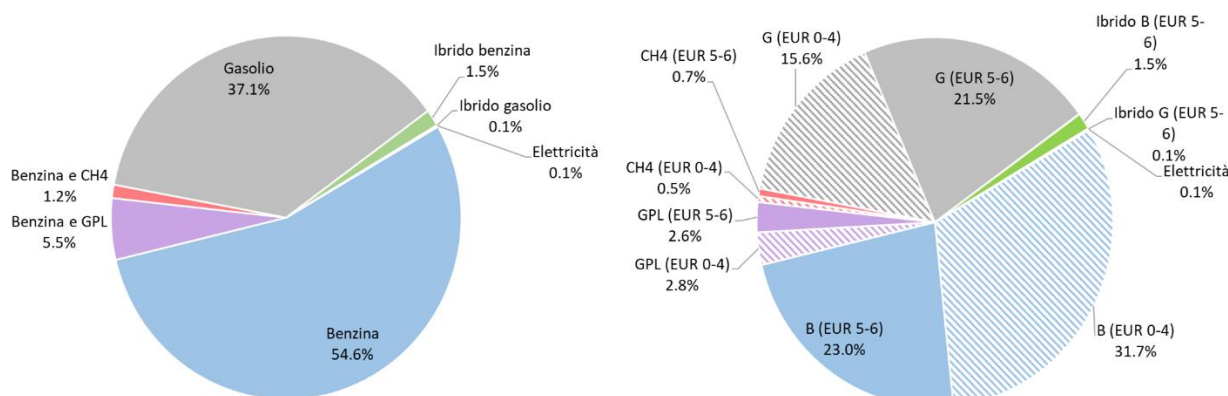


Figura 3.4 – Ripartizione dell'attuale parco circolante di autovetture per alimentazione (a sinistra) con un focus sulle classi ambientali (a destra) [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI 2019 [25] (CH4=metano, B=benzina, G=gasolio)]

Tabella 3.1 – Periodo di immatricolazione corrispondente alle diverse classi ambientali di emissione per le autovetture [Fonte: Wikipedia [27]]

Classe ambientale	Periodo di immatricolazione
EURO 0	Prima di dicembre 1992
EURO 1	Da gennaio 1993 a dicembre 1996
EURO 2	Da gennaio 1997 a dicembre 2000
EURO 3	Da gennaio 2001 a dicembre 2005
EURO 4	Da gennaio 2006 a dicembre 2010
EURO 5	Da gennaio 2011 ad agosto 2014
EURO 6	Da settembre 2015

Dall'analisi della flotta circolante, emerge che più del 91% risulti alimentata con combustibili fossili tradizionali, con la quota maggiore alimentata a benzina (quasi il 55%), contro un 37% a gasolio. Solamente una quota minore, corrispondente a circa il 6% risulta alimentata con combustibili alternativi (metano e GPL), o alimentazione elettrica ibrida (1,6% complessivo) e pura (con uno 0,1%)<sup>11</sup>.

In Figura 3.5 vengono presentate le ripartizioni per classe ambientale ed il numero assoluto di autovetture attualmente circolanti (nell'asse secondario) con dettaglio provinciale.

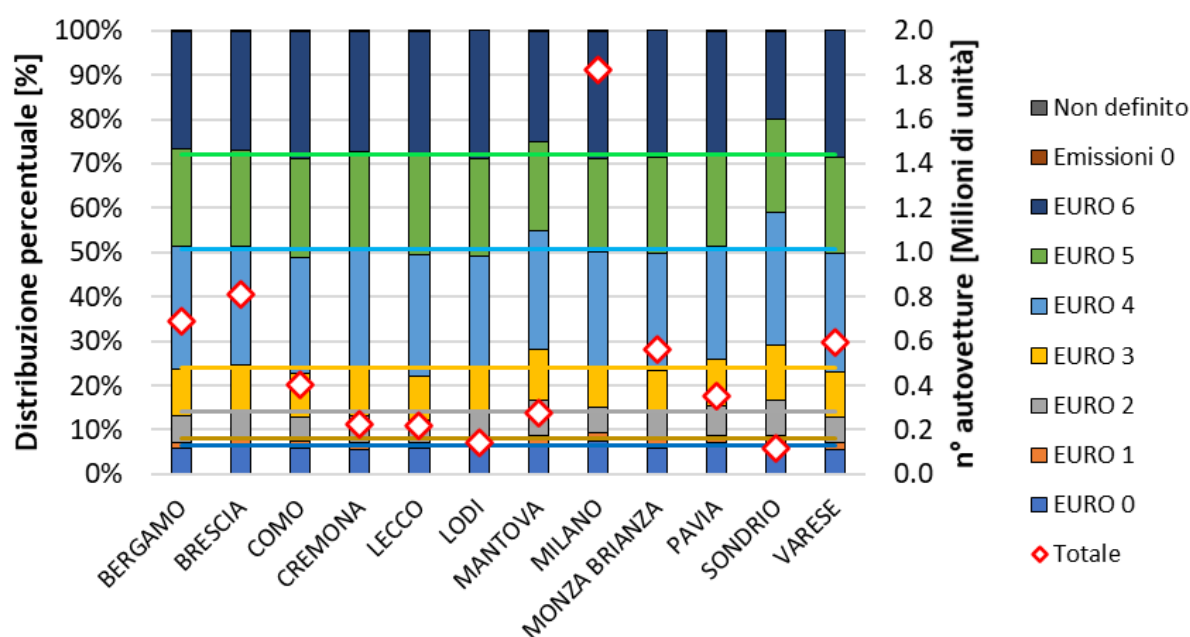


Figura 3.5 – Ripartizione del parco circolante di autovetture per classe ambientale (asse sinistro) e in numero assoluto (asse destro) nelle province della Lombardia; le linee orizzontali evidenziano i valori medi riscontrati a livello regionale, per facilitare il confronto con il dettaglio provinciale [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI 2019 [25]]

Nonostante lievi differenze nella composizione di alcune province (per esempio nella provincia di Sondrio, dove risultano maggiormente presenti le classi ambientali più emissive, sebbene il numero assoluto di veicoli corrisponda solamente all'1,9% del totale regionale), emerge mediamente che circa il 50% del parco

<sup>11</sup> Le informazioni riportate dall'ACI sono state integrate anche dai dati dell'Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri (UNRAE), le quali restituiscono nel documento "L'auto 2020 – sintesi statistica" [38] un'immagine delle immatricolazioni di vetture stradali negli ultimi 10 anni

circolante rientri nelle classi ambientali comprese fra EURO 0 e 4, ossia con una immatricolazione antecedente a dicembre 2010.

### 3.1.2 Autobus

La categoria successiva è costituita dagli autobus, ossia *vetture equipaggiate con più di nove posti (compreso il conducente)* [26]. Come si può vedere in Figura 3.6, i capoluoghi di provincia ospitano il più alto numero di autobus, 6499, pari al 60% del totale presente nel territorio regionale (10 853). Per gli altri comuni la distribuzione è più omogenea e distribuita. Il numero di autobus rapportato agli abitanti, in Figura 3.7, assume una maggiore omogeneità su tutto il territorio.

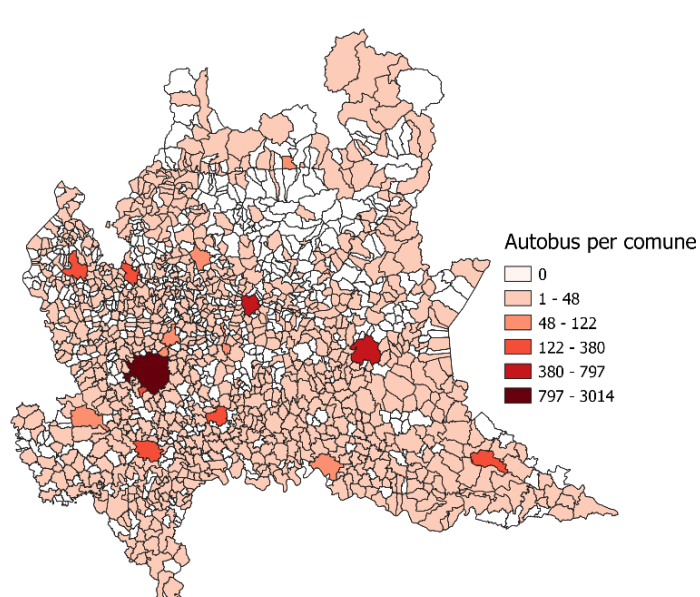


Figura 3.6 - Distribuzione del parco circolante di autobus con dettaglio comunale nel 2019  
[Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI [25]]

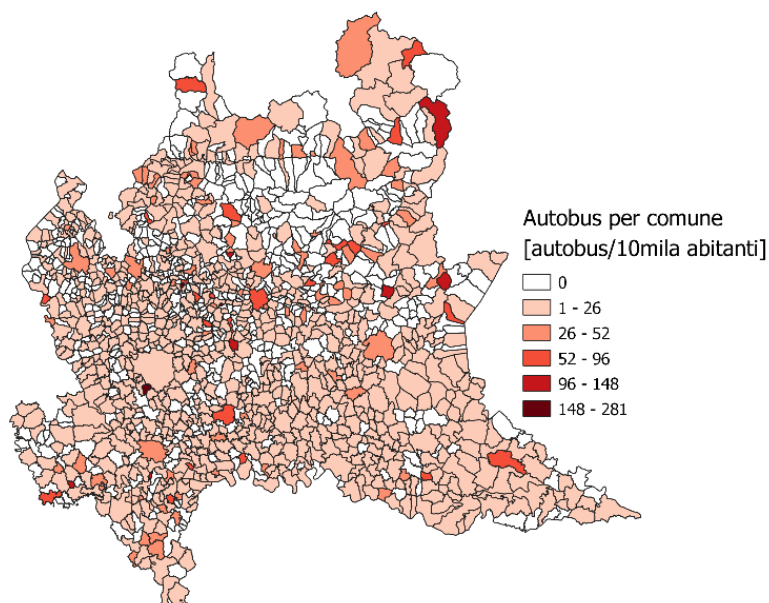


Figura 3.7 - Distribuzione del parco circolante di autobus rapportato rispetto alla popolazione, con dettaglio comunale nel 2019.  
[Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI 2019 [25]]

Per questa classe di veicoli, l'ACI fornisce informazioni sull'alimentazione e sull'anno di immatricolazione solamente a livello nazionale, mentre restituisce un dettaglio provinciale sulla destinazione d'uso, identificabile nelle classi: (i) noleggio, (ii) privato, (iii) pubblico, (iv) altri usi e (v) non contemplato. Come mostrato in Figura 3.8, una fetta maggioritaria (quasi il 60%) è destinata al trasporto pubblico. Seguono il noleggio (28%), l'uso privato (circa 11%) ed una quota marginale di altri usi. Va indicato che la distribuzione è eterogenea fra le province: per esempio, gli autobus destinati al trasporto pubblico costituiscono circa il 76% della flotta circolante nella provincia di Milano, mentre nelle province di Monza e Brianza tale quota si attesta ad un 15%, contro la media regionale del 59%.

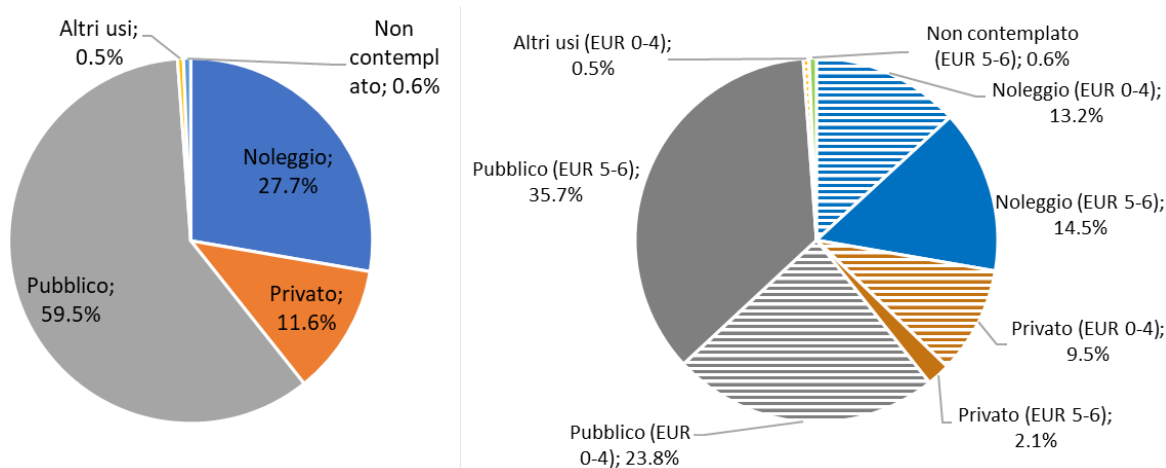


Figura 3.8 – Ripartizione della flotta circolante di autobus per tipologia di utilizzo (a sinistra) con un focus sulle classi ambientali (a destra) [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI 2019 [25]]

La flotta regionale è caratterizzata da una età media significativamente elevata, dal momento che più del 40% è stata immatricolata prima del 2003 (e solo un 16,5% successivamente al 2016). A livello nazionale, e presumibilmente a livello regionale, la quasi totalità dei mezzi viene alimentato a gasolio (circa il 94%), mentre un 4,7% risulta alimentato da benzina e metano, con una tendenza in crescita nel quinquennio 2014-2019 (si passa per quest'ultima categoria dalle circa 340 immatricolazioni nazionali negli anni 2014 e 2015 alle circa 670 del biennio 2018-2019).

In Figura 3.9 viene presentata la suddivisione per classe ambientale nelle varie province. Dal grafico si riscontra una certa differenza fra le realtà provinciali.

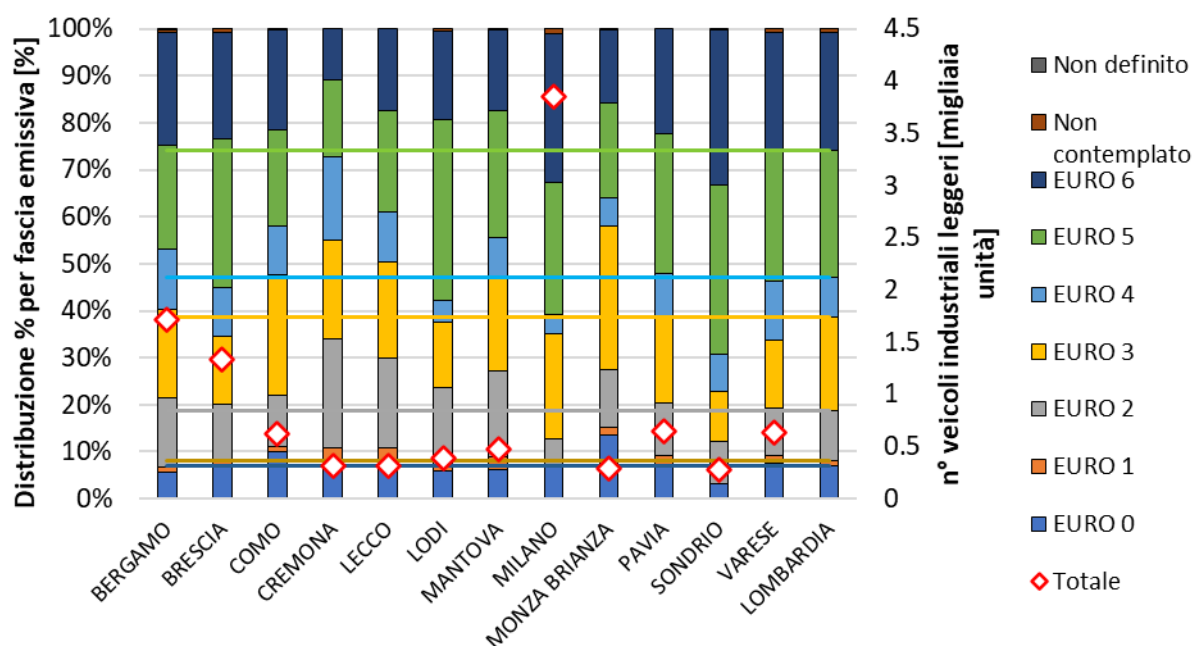


Figura 3.9 - Ripartizione del parco circolante di autobus per classe ambientale (asse sinistro) e in numero assoluto (asse destro) nelle province della Lombardia; le linee orizzontali evidenziano i valori medi riscontrati a livello regionale, per facilitare il confronto con il dettaglio provinciale [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI 2019 [25]]

### 3.1.3 Autocarri merci

Gli autocarri, intesi come *veicoli destinati al trasporto di cose e delle persone addette all'uso o trasporto di queste ultime* [26], vengono suddivisi in due (o più) categorie, a seconda della massa complessiva che li caratterizza. Si applicano qui le due categorie definite dal codice stradale: veicoli leggeri, con massa complessiva inferiore alle 3,5 tonnellate, e veicoli pesanti, con massa uguale o superiore a 3,5 t. In numero assoluto, in Lombardia a fine 2019 circolavano quasi 610 000 autocarri merci, di cui l'88% leggeri (58% con massa complessiva fino ad 1 tonnellata). Questo dato sembra rispecchiare la forte presenza sul territorio di piccole e medie imprese.

Il dataset considerato fornisce informazioni con un dettaglio spaziale provinciale per le alimentazioni tradizionali (a gasolio e a benzina), oltre che al numero complessivo di vetture circolanti. La categoria dei veicoli pesanti è alimentata a gasolio quasi nella sua totalità (99,4%) e da benzina per uno 0,4%, lasciando ai combustibili alternativi e alle nuove forme di trazione ibride un ruolo non ancora affermato. La situazione si modifica leggermente per i mezzi leggeri, soprattutto fra quelli con massa complessiva inferiore a 1

tonnellata. In Figura 3.10 si può valutare la composizione percentuale di quest'ultima flotta di veicoli leggeri (circa 354 300 in Lombardia), dove il peso dell'alimentazione a benzina si attesta ad una media regionale dell'8% mentre quella attraverso combustibili alternativi e sistemi ibridi è pari al 7%, con differenze più marcate fra le singole province (si noti che l'asse primario del grafico è compreso fra il 70% ed il 100%, per facilità di rappresentazione).

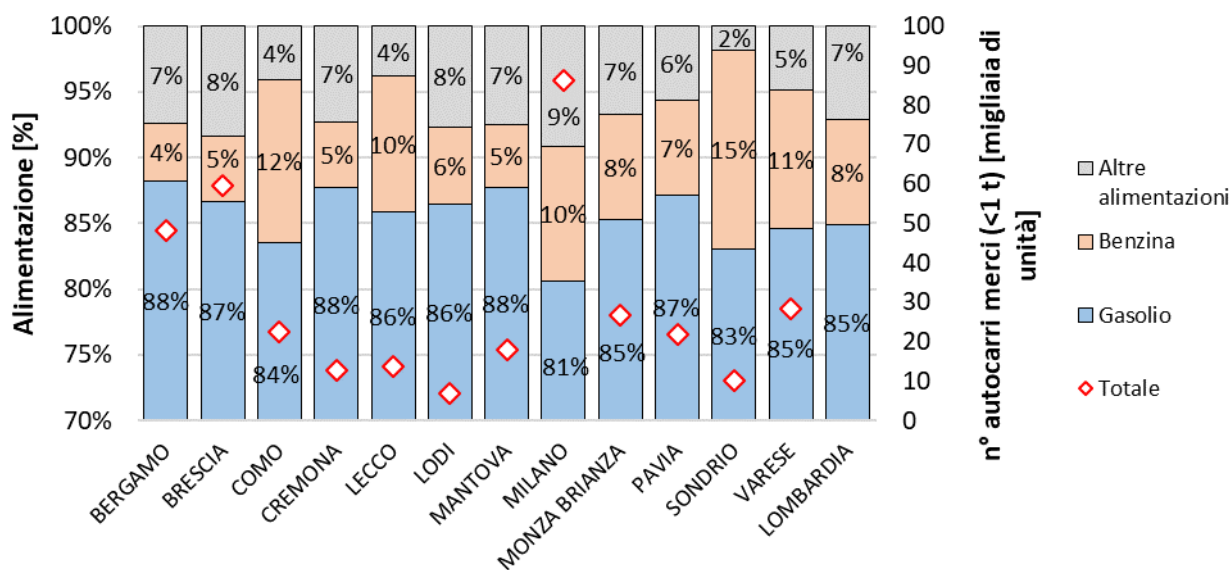


Figura 3.10 - Ripartizione del parco circolante di autocarri merci leggeri per alimentazione (asse sinistro) e numero complessivo circolante (asse destro), con un focus su quelli caratterizzati da una massa complessiva inferiore a 1 tonnellata, nelle province della Lombardia e confronto con la ripartizione regionale; si noti che l'asse primario presenta valori compresi fra il 70% ed il 100% per facilità di rappresentazione [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI 2019 [25]]

Analizzando l'età del parco circolante, emerge una situazione in linea con il resto dei trasporti pesanti, con circa il 40% delle vetture immatricolate prima del 2006. In Figura 3.11 vengono mostrati gli autocarri merci per anno di immatricolazione, con un dettaglio provinciale ed un confronto con la media regionale.



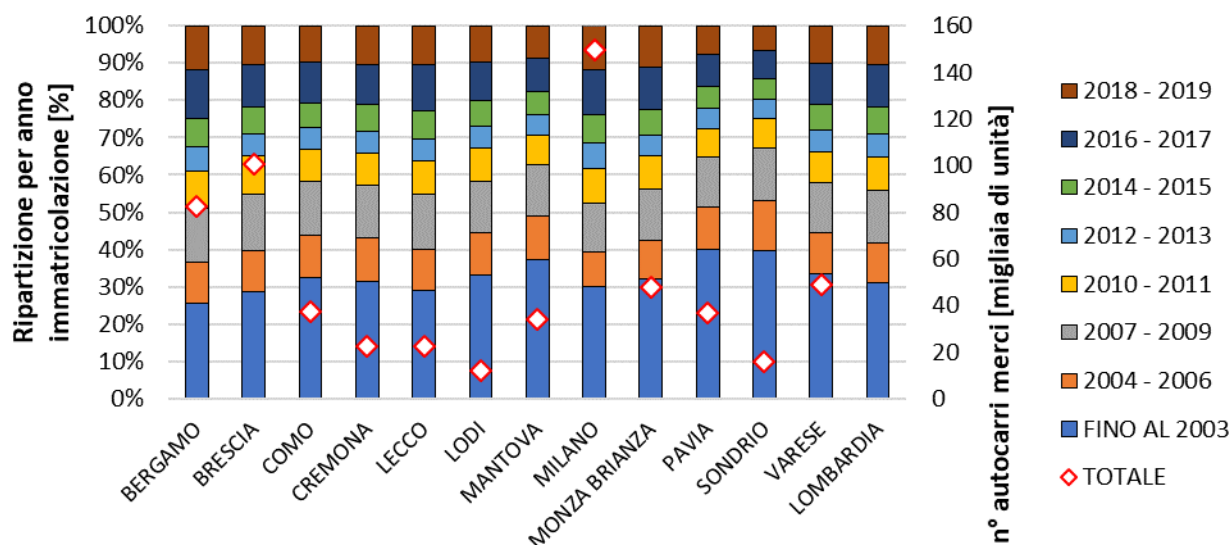


Figura 3.11 - Ripartizione del parco circolante di autocarri merci per anno di immatricolazione (asse sinistro) e numero complessivo circolante (asse destro), nelle province della Lombardia e confronto con la ripartizione regionale [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI 2019 [25]]

#### 3.1.4 Trattori stradali

Nella categoria del trasporto merci rientrano anche i trattori stradali, rappresentati da *veicoli destinati esclusivamente al traino su strada di rimorchi o semirimorchi* [26]. La mappa di Figura 3.12 ne mostra la distribuzione rapportata alla superficie del territorio, mostrando una densità maggiore nella zona attorno alle città di Milano e Bergamo.

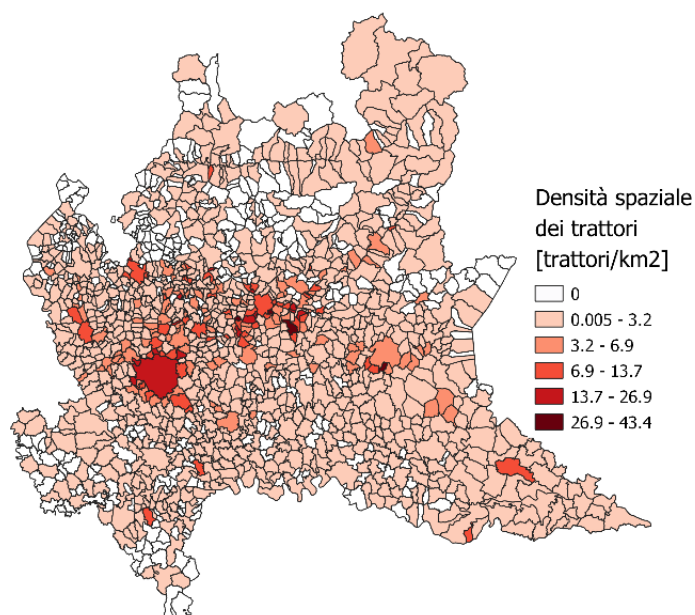


Figura 3.12 - Distribuzione del parco circolante di trattori stradali rapportato alla superficie del territorio [trattori stradali/km²], con dettaglio comunale, nel 2019 [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI [25]]

A fine 2019 risultano immatricolati in Lombardia 27 535 trattori stradali (il 14% del totale nazionale). La quasi totalità (il 97,8%) risulta alimentato a gasolio, mentre la porzione rimanente viene alimentata a benzina e a gas naturale (1,7%), allineandosi con i valori nazionali.

Il dataset ACI fornisce una fotografia del parco circolante anche rispetto alla massa complessiva di ciascun veicolo. Focalizzandosi sulla quota maggioritaria alimentata a gasolio, il 90% circa riguarda veicoli con massa complessiva di 14-20 tonnellate, composizione in linea in tutte le province della regione.

Restituisce infine un'immagine con un dettaglio nazionale sull'età del parco circolante di trattori stradali (la cui ripartizione per classe ambientale viene riportata in Figura 3.13), con una flotta relativamente giovane. Meno di un quarto di veicoli infatti è stato immatricolato prima del 2003 (23%), mentre più del 50% della flotta ha meno di 10 anni e circa il 30% dei trattori stradali circolanti presenti una età inferiore ai 5 anni.

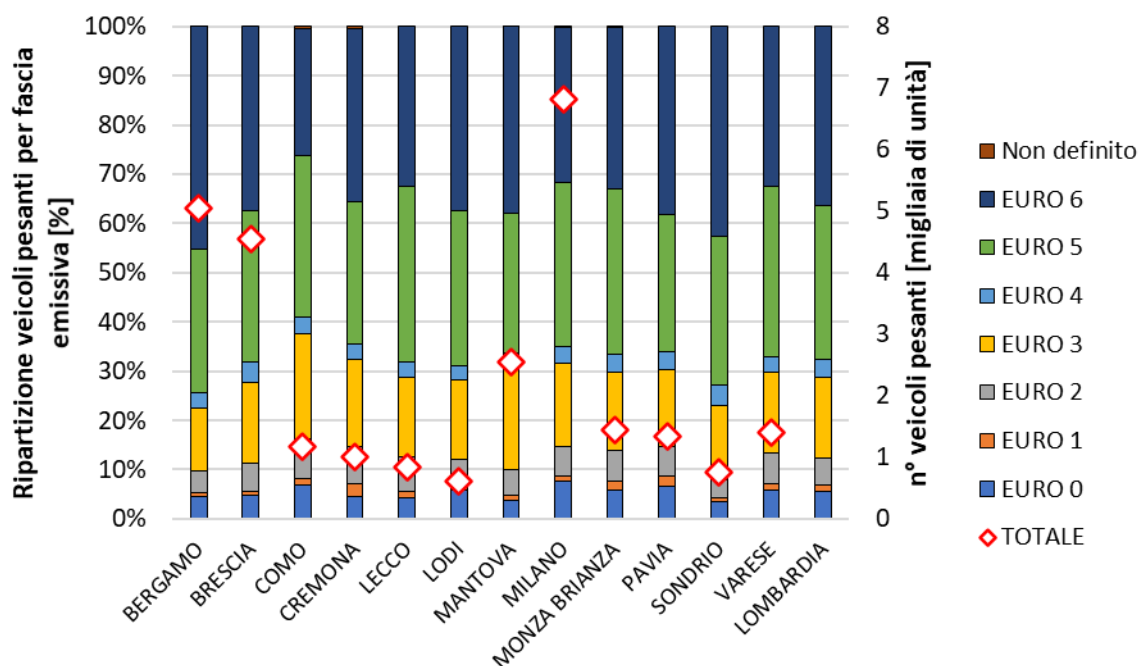


Figura 3.13 - Ripartizione del parco circolante di trattori stradali per classe ambientale (asse sinistro) e numero complessivo circolante (asse destro), nelle province della Lombardia e confronto con la ripartizione regionale [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI 2019 [25]]

### 3.1.5 Autoveicoli speciali

Nella categoria degli autoveicoli speciali rientrano in particolare i veicoli per campeggio, i veicoli isothermici, e i veicoli per il trattamento rifiuti. In Figura 3.14 viene mostrata la ripartizione complessiva provinciale.

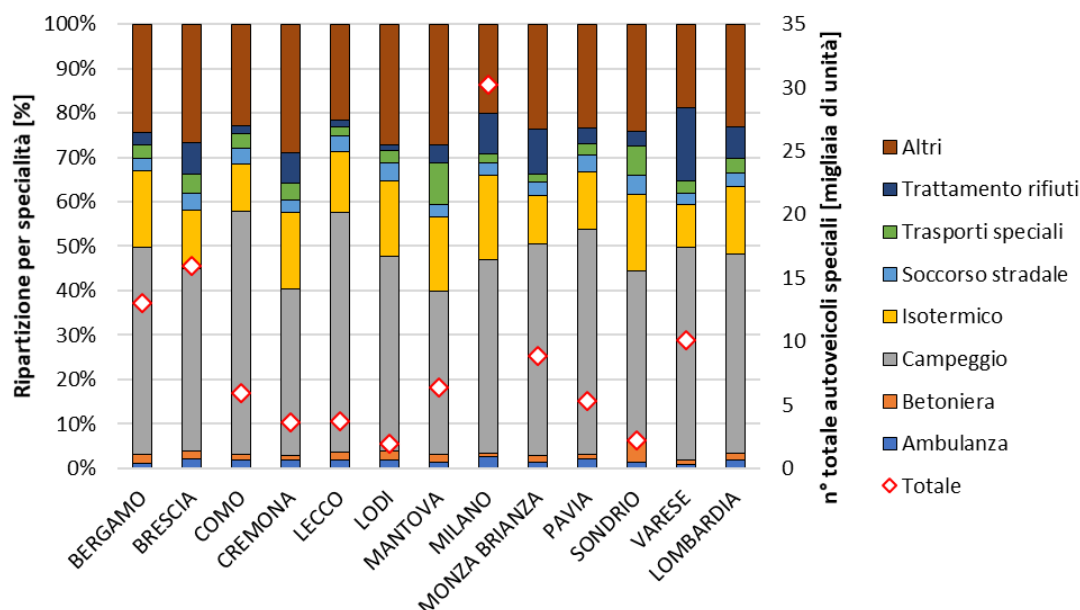


Figura 3.14 – Ripartizione del parco circolante di autoveicoli speciali per specialità (asse sinistro) e numero complessivo circolante (asse destro), nelle province della Lombardia e confronto con la ripartizione regionale; nella categoria “Altri” sono incluse gru, veicoli adibiti al trasporto funebre, ad altri utilizzi e non definiti; nella categoria “Trasporti speciali” sono inclusi il trasporto di carburanti, di liquidi, di merci pericolose ed il trasporto di altri veicoli [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI 2019 [25]]

Rispetto alle fonti di alimentazione e all’anno di immatricolazione, il dataset ACI fornisce un’informazione con dettaglio nazionale. La quasi totalità della flotta circolante è alimentata a gasolio (95%), con il rimanente che si distribuisce fra autoveicoli a benzina (3%), a metano (1%) e a GPL (1%). In Lombardia risulta essere circolante una quota di autoveicoli speciali pari al 14% del totale nazionale. Per quanto riguarda l’età del parco, si riscontra una flotta con una età mediamente elevata, dal momento che più del 47% è stato immatricolato prima del 2003, percentuale che sale fino al 72% per immatricolazioni antecedenti al 2010<sup>12</sup>.

### 3.1.6 Vendite di combustibile per trasporto su gomma

Di seguito vengono riportati i dati delle vendite di combustibile per la mobilità dichiarati dal Ministero della Transizione Ecologica [29]. La Tabella 3.2 mostrano le distribuzioni spaziali delle vendite di benzina e gasolio a livello provinciale per l’anno 2019, con un diretto confronto con il numero totale di veicoli (ovvero autoveicoli, veicoli industriali leggeri e pesanti e trattori stradali), rispettivamente a benzina e a gasolio, presenti in ciascuna provincia [25]. Come è possibile notare, esiste disomogeneità tra le province, (e.g. in provincia di Cremona le vendite di benzina rapportate al numero di veicoli è il doppio della provincia di Monza e Brianza, e più del doppio di gasolio dei veicoli della provincia di Lecco).

<sup>12</sup> Per confronto, per gli impianti di sollevamento (e.g. gru mobili) tipicamente la vita utile degli elementi strutturali è pari a 20 anni, mentre si scende a 10 anni per i componenti meccanici [28]

*Tabella 3.2 – Vendita di benzina e gasolio per motori per provincia nell'anno 2019 [Mton] e confronto diretto con il numero di veicoli a benzina e a gasolio [29]*

Provincia	Vendita benzina totale [ton]	Rapporto Vendita benzina/Veicoli benzina	Vendita Gasolio per motori totale [ton]	Rapporto Vendita gasolio/Veicoli gasolio
Bergamo	124 895	0,354	362 467	0,979
Brescia	167 487	0,453	650 567	1,396
Como	88 704	0,341	288 032	1,725
Cremona	73 128	0,706	230 993	1,814
Lecco	42 434	0,340	78 218	0,723
Lodi	26 970	0,407	80 100	1,046
Mantova	38 923	0,322	134 304	0,811
Milano	531 833	0,493	1 193 475	1,572
Monza e della Brianza	104 523	0,314	189 034	0,779
Pavia	68 872	0,385	227 425	1,214
Sondrio	24 472	0,370	72 428	1,109
Varese	125 921	0,337	214 113	0,867

### 3.1.7 Altre modalità di trasporto

Vengono presentate di seguito le principali informazioni relative alle modalità di spostamento differenti dal trasporto su gomma.

Per il **trasporto ferroviario**, Rete Ferroviaria Italiana (RFI) [30] riporta un'immagine dello stato delle infrastrutture adibite al trasporto passeggeri e merci su ferro a livello regionale. La Lombardia presenta a fine 2020 circa 2600 km di linee ferroviarie, di cui 859 km a doppio binario (queste ultime tutte elettrificate). La quota non elettrificata copre circa il 10,9% (283 km, tutti a binario singolo) ed è percorsa da treni alimentati a diesel. Queste ultime riguardano tutte linee complementari, collocandosi principalmente nel Pavese e nel triangolo compreso fra Mantova, Brescia e Cremona, ma con alcune reti che collegano il triangolo compreso fra Lecco, Como e Monza, o linee come la Brescia-Iseo-Edolo (si veda la sezione 3.2.3 per gli ultimi accordi di sviluppo in merito a quest'ultima linea di collegamento).

Per il **trasporto navale interno**, il *Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti* per gli anni 2018-2019 [31] fornisce alcune informazioni sulla flotta di imbarcazioni destinate al trasporto pubblico entro i confini regionali. Al 2018 la flotta in servizio sui laghi di Garda, Como, Iseo e Maggiore era composta da 112 unità (e.g. traghetti, motonavi, aliscafi e catamarani) ripartite rispettivamente in: 29 (Garda), 33 (Como), 14 (Iseo) e 36 (Maggiore). La situazione viene confermata sempre dal Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili (MIT), attraverso la Gestione Governativa Navigazione Laghi Maggiore, di Garda e di Como [32]: nel 2021 per le flotte di navi dei laghi di Garda e Maggiore si contano 64 unità (una in meno nel lago di Garda),

mentre si aggiunge una imbarcazione in servizio sul lago di Como, la cui flotta raggiunge così le 34 navi<sup>13</sup>. Vengono fornite descrizioni dettagliate sui modelli in uso (fra cui i sistemi di propulsione impiegati), senza però riportare informazioni sulla tipologia di alimentazione.

### 3.1.8 Analisi degli spostamenti critici per il trasporto pubblico

La matrice Origine-Destinazione messa a disposizione in versione open-data da Regione Lombardia [33] permette di ricostruire e analizzare i collegamenti da e per i diversi comuni della Lombardia. La matrice riporta indici di spostamento per diverse modalità di trasporto (auto, moto, bici, treno, ecc.) e per diverse motivazioni (lavoro, studio, occasionale o affari, e ritorno) rilevati da indagine campionaria sugli spostamenti dei cittadini con un dettaglio di 24 ore.

Un'analisi della matrice permette di evidenziare i collegamenti verosimilmente più critici. Per fare ciò, si è guardato il numero di spostamenti giornalieri lungo tutte le direttrici (i.e. collegamenti origine-destinazione), mantenendo la distinzione fra i mezzi di trasporto. Per ogni direttrice è stato calcolato il rapporto degli indici di spostamento fra ferrovia e auto e fra trasporto pubblico su gomma e auto. Nei grafici successivi (Figura 3.15 e Figura 3.17) vengono mostrati i collegamenti con indice di spostamento in auto più grande. Di questi, vengono mappati i primi venti collegamenti con i rapporti ferrovie/automobili inferiori a 0,4 (Figura 3.16) e rapporti autotrasporti/automobili inferiori a 0,05 (Figura 3.18). Secondo i dati della matrice, i collegamenti tra il capoluogo e i comuni limitrofi sembrano essere i più critici per entrambe le modalità di trasporto pubblico locale. Nel caso del trasporto ferroviario, risultano di interesse anche i collegamenti tra Mantova e comuni limitrofi e Brescia e comuni limitrofi.

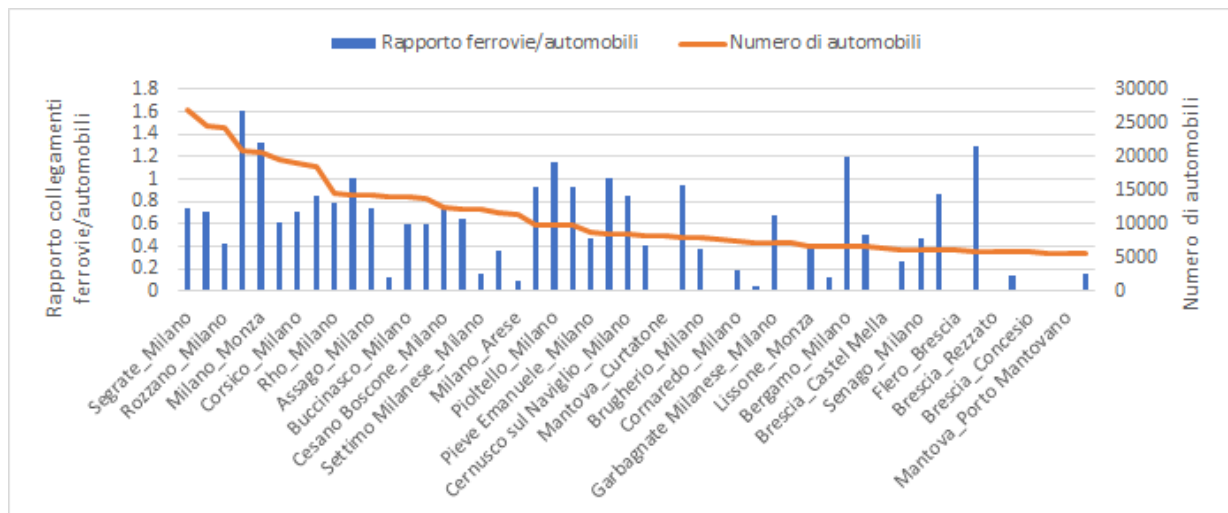


Figura 3.15 – Collegamenti tra comuni in Lombardia con più alto numero di spostamenti in automobile (asse destro) e rapporto fra spostamenti in treno e in automobile (asse sinistro). [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati matrice O/D di Regione Lombardia [33]]

<sup>13</sup> La Gestione Governativa Navigazione non include il lago d'Iseo, per il quale non vengono quindi riportate informazioni.



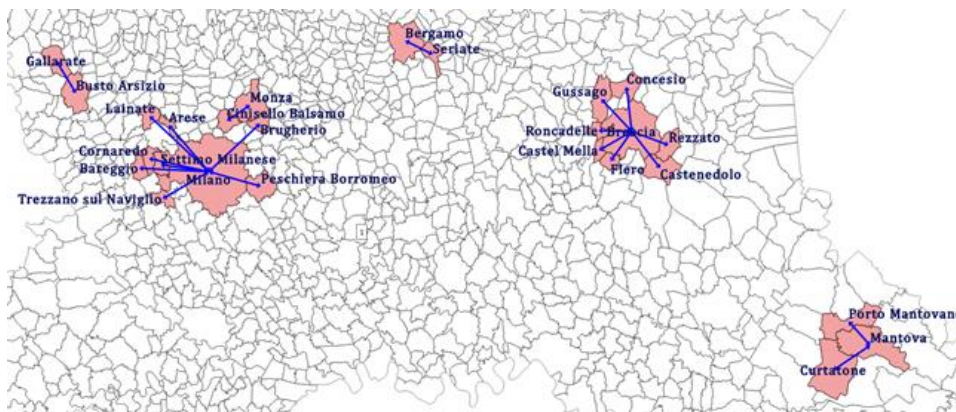


Figura 3.16 – Collegamenti tra comuni in Lombardia con più alto numero di spostamenti in automobile e con rapporto fra spostamenti in treno e in automobile minori di 0,4. [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati matrice O/D di Regione Lombardia [33]]

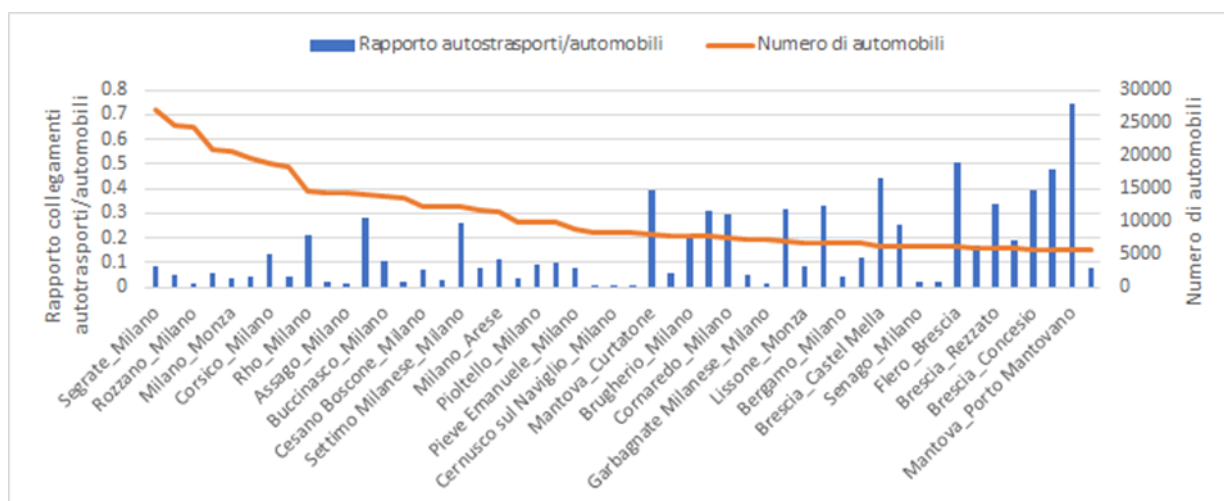


Figura 3.17 – Collegamenti tra comuni in Lombardia con più alto numero di spostamenti in automobile (asse destro) e rapporto fra spostamenti via trasporto pubblico su gomma e in automobile (asse sinistro). [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati matrice O/D di Regione Lombardia [33]]

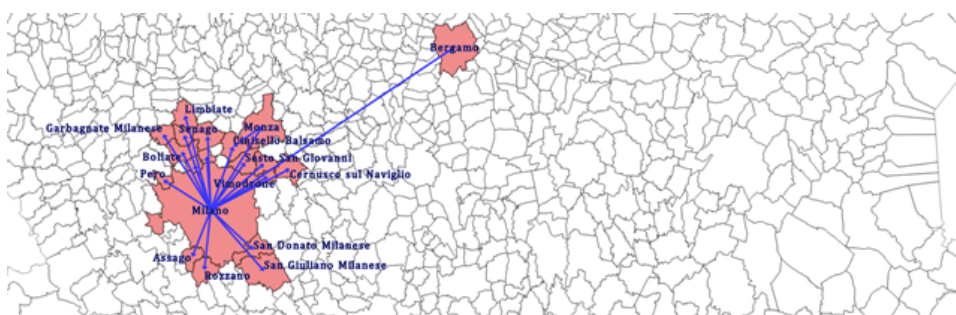


Figura 3.18 - Collegamenti tra comuni in Lombardia con più alto numero di spostamenti in automobile e con rapporto fra spostamenti via trasporto pubblico su gomma e in automobile minori di 0,05. [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati matrice O/D di Regione Lombardia [33]]



## 3.2 Possibili scenari di evoluzione della domanda di trasporto e del parco circolante

In questa sezione vengono definiti dei possibili scenari di evoluzione del settore trasporti, a partire principalmente dalle assunzioni e dagli obiettivi indicati dai piani e dalle strategie nazionali vigenti. In particolare, viene trattata l'evoluzione della domanda di trasporto di passeggeri e merci (Sezione 3.2.1) e l'evoluzione del parco circolante (Sezione 3.2.2 e 3.2.3).

### 3.2.1 Profili di evoluzione della domanda di passeggeri e merci

La costruzione di profili di evoluzione della domanda di trasporto si è basata sull'osservazione dei dati storici di traffico di merci e persone, partendo dalle informazioni contenute nel *"Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti"* del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT) [31]. Per l'orizzonte temporale del 2030 è stato preso come riferimento il *PNIEC* [16], con la consapevolezza, tuttavia, che gli obiettivi di riduzione delle emissioni debbano essere aggiornati, in linea con la nuova soglia del -55% [34], e che le condizioni al contorno siano cambiate con la situazione pandemica<sup>14</sup>. Per valutare uno scenario di decarbonizzazione completa è stata presa come riferimento la *Strategia nazionale di lungo termine sulla riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra* (LTS) [17], con orizzonte al 2050.

In Figura 3.19 viene riportato l'andamento storico registrato fino al 2019 per il trasporto di persone, integrato con gli scenari di PNIEC (al 2030) e LTS (al 2050).

---

<sup>14</sup> Nella definizione dei profili di evoluzione non sono stati infatti conteggiati gli effetti legati alla pandemia di COVID-19 e le modifiche derivanti nelle abitudini della popolazione (come, per esempio, l'impiego del lavoro a distanza o da remoto) sia nell'andamento storico registrato che in quello possibile a tendere. A titolo esemplificativo, quest'ultimo può infatti avere delle ripercussioni sia nell'evoluzione dei flussi degli spostamenti che sulla distribuzione nei consumi energetici nel settore civile

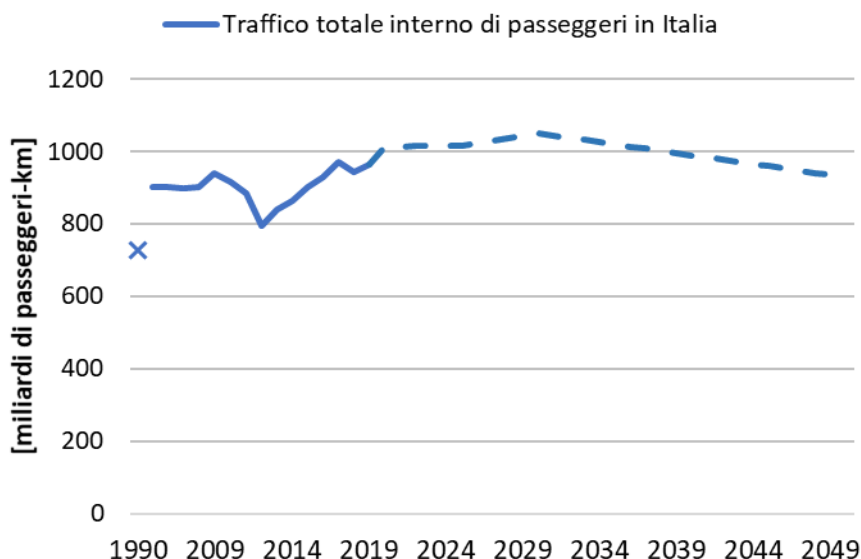


Figura 3.19 – Traffico totale interno di passeggeri in Italia; si noti che nella serie storica vengono riportate le informazioni del singolo anno 1990 e successivamente quelle a partire dal 2005; nella definizione delle previsioni di evoluzione sono stati assunti degli andamenti lineari fra i vari orizzonti temporali, anche intermedi, definiti nel PNIEC e nella LTS (Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati di Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti 2019 [31], PNIEC [16] e LTS [17])

L'indicazione che emerge riguarda l'attesa crescita in numero assoluto degli spostamenti su suolo nazionale fino al 2030, salvo poi seguire una decrescita e assestarsi a valori simili a quelli odierni per il 2050. Le informazioni contenute nei documenti sopra presentati permettono di osservare con maggiore dettaglio la composizione degli spostamenti di passeggeri, come evidenziato in Figura 3.20.

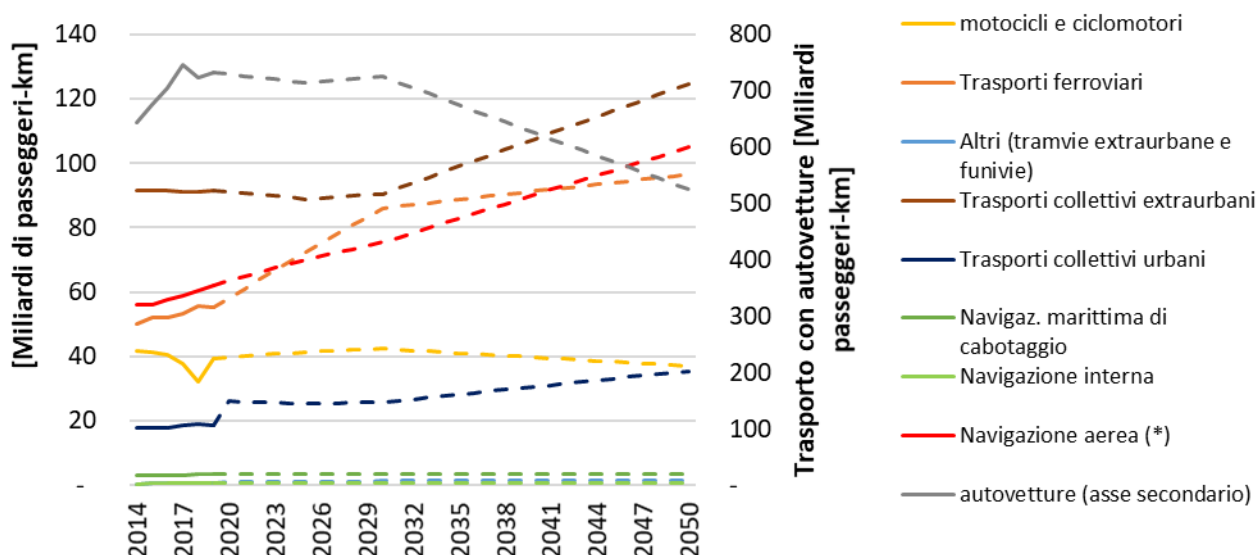


Figura 3.20 - Traffico interno di passeggeri in Italia con dettaglio per tipologia di mezzo di spostamento (gli spostamenti in autovettura vengono presentati su un asse secondario); nella definizione delle previsioni di evoluzione sono stati assunti degli andamenti lineari fra i vari orizzonti temporali, anche intermedi, definiti nel PNIEC e nella LTS; (\*) per la navigazione aerea si riporta il traffico di passeggeri complessivo, nazionale ed internazionale (Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati di Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti 2019 [31], PNIEC [16] e LTS [17])

Si può osservare un andamento pressoché stazionario degli spostamenti con mezzi privati fino al 2030, salvo poi decrescere in favore dei trasporti pubblici, i quali acquistano un ruolo di crescente importanza, con una crescita nel comparto ferroviario e su gomma. Infatti, secondo la strategia di lungo termine, viene previsto uno spostamento del trasporto passeggeri verso il trasporto pubblico, in ottemperanza di una politica di riduzione dei consumi necessaria per consentire la decarbonizzazione completa. Il traffico aereo presenta un forte incremento, arrivando quasi a raddoppiare in valore assoluto al 2050. In questa direzione si muovono anche gli studi della European Environment Agency, che nell'“*European Aviation Environmental Report 2019*” [35] stimano un incremento del numero di voli all'interno del continente (EU28+EFTA<sup>15</sup>) pari al 42% al 2040 rispetto al 2017. Nonostante sia plausibile attendersi un ulteriore incremento del fattore di occupazione dei posti disponibili sul singolo volo (già superiore all'80% nel 2017), così come il possibile aumento in numero assoluto di questi ultimi, è presumibile attendersi che questi due effetti possano solo limitare la crescita nella domanda di trasporto aereo.

Per quanto riguarda il traffico interno di merci sono stati definiti i possibili scenari di evoluzione seguendo la medesima procedura; in Figura 3.21 è riportato l'andamento complessivo, mentre in Figura 3.22 si mostra il dettaglio per tipologia di mezzo di trasporto.

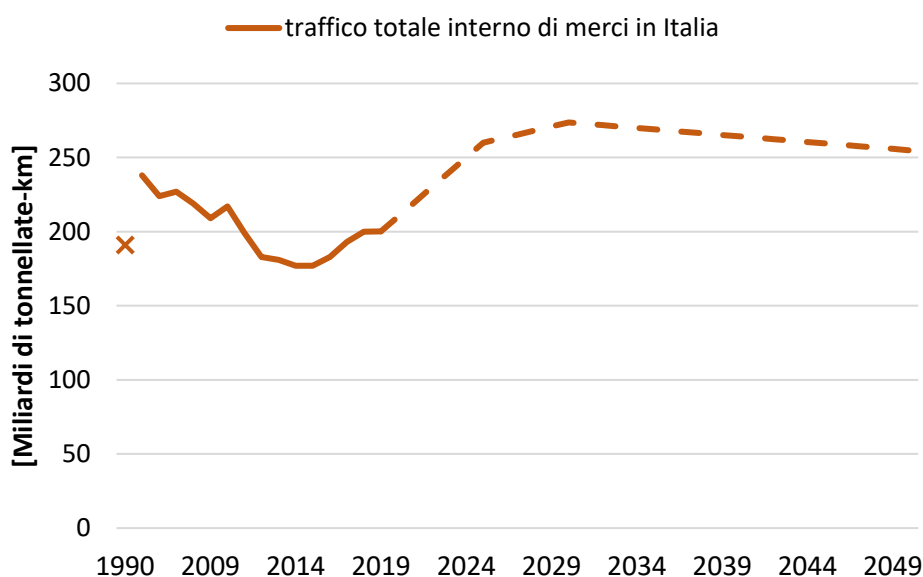


Figura 3.21 - Traffico totale interno di merci in Italia; si noti che nella serie storica vengono riportate le informazioni del singolo anno 1990 e successivamente quelle a partire dal 2005; nella definizione delle previsioni di evoluzione sono stati assunti degli andamenti lineari fra i vari orizzonti temporali, anche intermedi, definiti nel PNIEC e nella LTS (Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati di Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti 2019 [31], PNIEC [16] e LTS [17])

<sup>15</sup> La EFTA, acronimo che sta per European Free Trade Association, comprende gli stati di Svizzera, Liechtenstein, Islanda e Norvegia

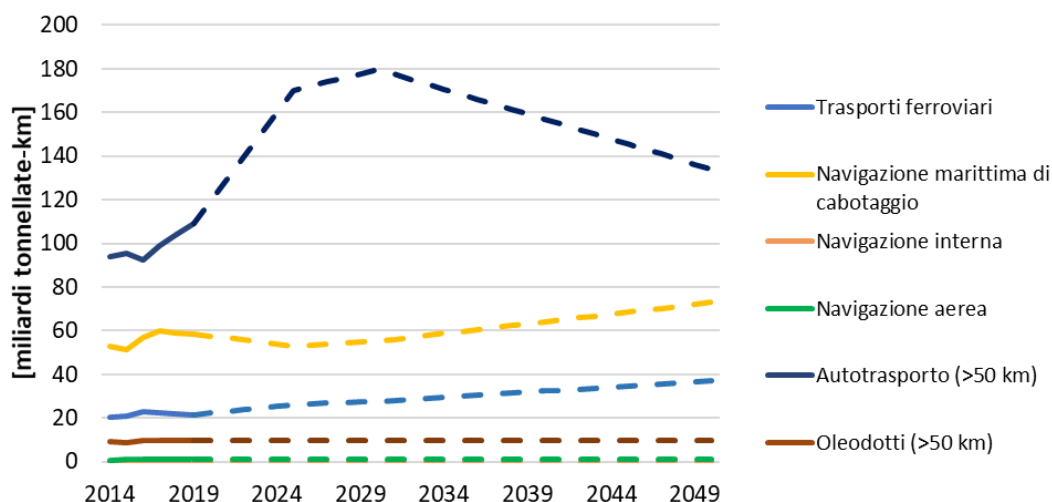


Figura 3.22 - Traffico interno di merci in Italia con dettaglio per tipologia di mezzo di spostamento; per il traffico di merci via aereo o attraverso oleodotti non vengono fornite indicazioni, ma si assume un andamento costante, a fronte di una tendenza storica sostanzialmente stabile; nella definizione delle previsioni di evoluzione sono stati assunti degli andamenti lineari fra i vari orizzonti temporali, anche intermedi, definiti nel PNIEC e nella LTS (Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati di partire da Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti 2019 [31], PNIEC [16] e LTS [17])

Ad un primo periodo di crescita nello scenario PNIEC, con circa 270 miliardi di tonnellate-km complessive previste per il 2030, segue una leggera decrescita, determinata da una azione complementare fra traffico merci su gomma (in forte decrescita) e attraverso le reti ferroviarie ed il trasporto marittimo (in crescita più contenuta, ma lungo più fronti). Queste evoluzioni vengono viste nella LTS come misure per la riduzione della domanda di energia.

### 3.2.2 Possibile evoluzione del parco circolante su gomma

Il percorso di decarbonizzazione del settore trasporti si traduce in un processo di elettrificazione e di ricorso a vettori energetici alternativi, quali i biocombustibili, l'idrogeno o combustibili sintetici di sua derivazione. A seconda però della modalità di trasporto, la penetrazione di queste soluzioni può variare significativamente.

#### Automobili

Per quanto riguarda la flotta di **automobili**, in Figura 3.23 sono presentati e messi a confronto vari scenari di penetrazione di veicoli elettrici (EV) al 2030 secondo diversi studi. Lo scenario del PNIEC è il più "accelerato" (nonostante non sia aggiornato con gli ultimi obiettivi approvati in sede europea), con un obiettivo minimo di 4 milioni di vetture elettriche pure (o Battery Electric Vehicle, BEV), e 2 milioni di veicoli a trazione ibrida di tipo plug-in (o Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV). Il secondo scenario fa riferimento a uno studio dell'Energy & Strategy Group del Politecnico di Milano, che prevede una penetrazione di poco inferiore alle 5 milioni di unità. Segue uno scenario che si poggia su analisi effettuate dal Centro Nazionale di Ricerca (CNR) con MOTUS-E (con una previsione di circa 4,5 milioni di EV) ed infine uno scenario ricavato dalle informazioni dei Piani di Sviluppo di Terna.

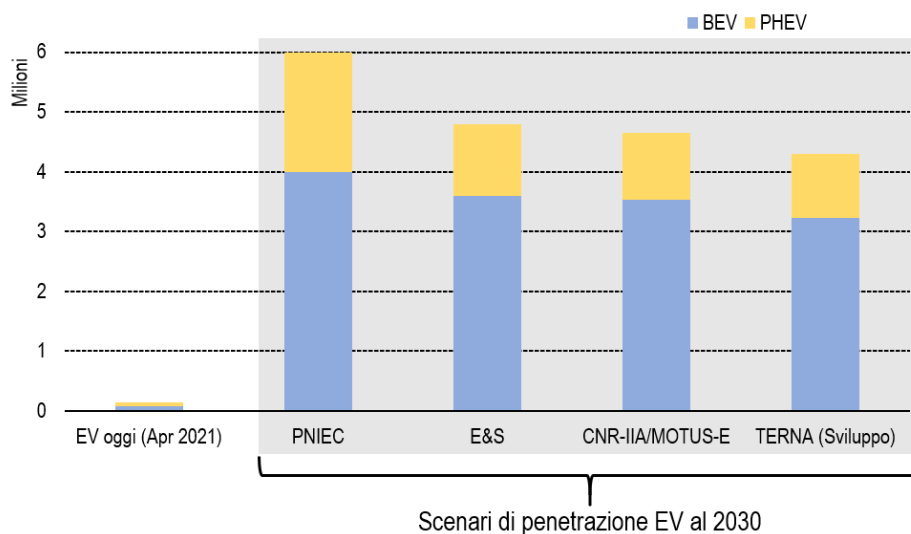


Figura 3.23 - Flotta elettrica ad oggi (2021) vs scenari di penetrazione italiana al 2030, per veicoli full-electric a batteria (BEV) e ibridi plugin (PHEV). Elaborazione Fondazione Politecnico su dati di diversi documenti istituzionali (PNIEC, Piani di Sviluppo Terna) o centri di ricerca (Energy & Strategy Group, CNR con MOTUS-E).

Ad oggi la Lombardia occupa i primi posti per immatricolato elettrico tra le regioni italiane, seconda solo al Trentino-Alto Adige. Considerando di mantenere per la Lombardia uno share sul totale italiano del 15-20%, gli scenari proposti in Figura 3.23 indicano un minimo di 630mila e un massimo di 1,2 milioni di EV in Regione al 2030. Guardando all'obiettivo di decarbonizzazione completa, la strategia di lungo termine prevede un totale nazionale di 24 milioni di autovetture circolanti, con un contributo maggioritario di BEV (19 milioni), seguito da circa 4 milioni di veicoli alimentati ad idrogeno (tramite celle a combustibile) ed 1 milione di veicoli a trazione termica alimentati con combustibili sintetici. Il pacchetto di proposte presentato dalla Commissione Europea "Fit for 55" [36], inoltre, indica l'intenzione di vietare nuove immatricolazioni che non siano a zero emissioni a partire dal 2035 e si va ad aggiungere al regolamento della Unione Europea 2019/631 circa gli obiettivi intermedi di riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub> per le nuove immatricolazioni [37]. Per quanto riguarda l'evoluzione delle vetture alimentate a metano, il PNIEC indica circa 793 ktep di biometano al 2030 (assente nel 2017).

In Lombardia, a fine 2019, circolano 6,2 milioni di autoveicoli, con una ripartizione in linea con i valori nazionali: quasi il 92% sono auto a trazione tradizionale, seguite poi da GPL (5,5%), metano (1,2%) ed una presenza leggermente maggiore rispetto al valore nazionale di veicoli ibridi<sup>16</sup> (1,6%), ed infine elettrici puri (0,1%). È dunque possibile assumere di mantenere una proporzione stabile con il parco circolante nazionale, di cui le strategie nazionali definiscono un possibile percorso di evoluzione.

Complessivamente, integrando le considerazioni esposte, è possibile definire una possibile evoluzione del parco circolante regionale in linea con gli obiettivi di decarbonizzazione completa e gli obiettivi intermedi. In Tabella 3.3 vengono presentati i possibili tassi di penetrazione delle autovetture con sistemi di alimentazione alternativi e le possibili quote negli orizzonti 2030 e 2050. Nella costruzione dello scenario, il rispetto dei limiti sulle emissioni di anidride carbonica medie sul venduto imposti in [37], restituisce una composizione

<sup>16</sup> In questo valore si intendono tutte le tipologie di autovetture a trazione ibrida: (i) *Mild hybrid* e (ii) *Full hybrid*, i quali sfruttano un sistema di trazione elettrica ausiliario di piccole dimensioni, dando la possibilità di ricarica dell'accumulo elettrochimico attraverso il motore endotermico o sistemi di recupero dell'energia cinetica in frenata; (iii) e *Plug-in hybrid*, il quale prevede batterie di dimensioni maggiori e abilita la possibilità di ricarica collegandosi alla rete elettrica.



del parco circolante di autovetture al 2030 che si avvicina agli obiettivi del PNIEC, prevedendo circa 4,2 milioni di BEV e 1,8 milioni di PHEV sul territorio nazionale.

*Tabella 3.3 – Totale circolante di autovetture in Lombardia nel 2019, e stima al 2030 e al 2050, immatricolazioni annuali nei periodi di transizione al 2030 e al 2050; (\*) i valori riportati sono le immatricolazioni medie (fra parentesi i valori di minimo e massimo); (\*\*) viene fatta l'assunzione di prevedere una diffusione di queste tecnologie uniformemente distribuita nell'arco temporale 2030-2050<sup>17</sup>*

*[Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati di Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti 2019 [31], Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri (UNRAE) [38], ACI [25], PNIEC [16] e LTS [17]]*

	Totale circolante 2019	Immatricolazioni annuali 2020-2030 (*)	Totale circolante (PNIEC 2030)	Immatricolazioni annuali 2030-2050	Totale circolante (LTS 2050)
<b>Elettriche (BEV)</b>	3954	66 697 (13 977 – 109 771)	737 616	130 478	3 305 438
<b>Ibride (PHEV)</b>	3362	32 420 (1338 – 70 528)	359 987	0	0
<b>Idrogeno (FC) (**)</b>	0	0	0	31 420	628 392
<b>E-fuels (**)</b>	0	0	0	7855	157 098
<b>Totale circolante</b>	6 212 479		6 584 940		4 090 928

Il totale circolante nazionale previsto per il 2030 è stato ottenuto riproporzionando il dato attuale sulla base del rapporto fra le domande di trasporto al 2030 (definita dal PNIEC) e al 2019 (fonte: Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti). Sia al 2030, sia al 2050, il parco circolante regionale è stato ottenuto ripartendo il dato nazionale di autoveicoli previsti mantenendo le proporzioni attuali della Lombardia rispetto al totale.

### Trasporto merci

Il PNIEC e la LTS non forniscono informazioni sulla evoluzione del parco circolante di **autocarri merci e trattori stradali**, ma definiscono l'evoluzione del traffico merci (tonnellate-km) al 2030 o al 2050. Si aggiungono inoltre due considerazioni: (i) nello scenario delineato dalla Strategia di lungo termine [17], in un contesto di completa decarbonizzazione al 2050 il settore dei trasporti raggiunge un'elettrificazione di circa il 50% dei veicoli a motore (principalmente attribuita alle automobili - per il trasporto merci non viene indicata l'elettrificazione come principale soluzione di decarbonizzazione, se non presumibilmente per i veicoli di massa minore), mentre la quota di idrogeno copre più del 50% dei consumi finali di settore; (ii) per l'orizzonte del 2030 lo scenario del PNIEC vede favorite le tecnologie alimentate a metano compresso (GNC) o liquefatto (GNL), elettriche pure o ibride per gli autoveicoli pesanti (con massa complessiva superiore a 3,5 t) adibiti al trasporto merci di nuova immatricolazione.

In aggiunta a PNIEC e LTS, le *Linee Guida Preliminari della Strategia Nazionale Idrogeno*, di fine 2020 [39] definiscono per il 2030 l'obiettivo di circa il 2% della domanda energetica finale coperta da idrogeno, con circa 5 GW di capacità di elettrolizzatori installati. Il documento definisce un potenziale di penetrazione nel

<sup>17</sup> Sebbene i veicoli alimentati a idrogeno presentino un livello di maturità tecnologica più avanzato per il comparto dei trasporti pesanti, favorito dai limiti di autonomia e peso dell'alternativa a trazione puramente elettrica, è poco probabile attendersi una penetrazione di autovetture a celle a combustibile nel breve periodo. Per i veicoli alimentati con combustibili sintetici valgono considerazioni simili, dal momento che non è ancora sviluppata l'infrastruttura di produzione o di approvvigionamento di questi ultimi e dalla loro dipendenza diretta dalla filiera dell'idrogeno verde (o blu), anch'essa in una prima fase di sviluppo.

trasporto pesante delle merci, con la previsione di almeno il 2% della flotta di camion a lungo raggio alimentati ad idrogeno (con un potenziale fino al 5-7%), pari a circa 4000 unità sul suolo nazionale.

Complessivamente, integrando le informazioni, è possibile formulare delle possibili evoluzioni della flotta, come presentato in Tabella 3.4 e in Tabella 3.5, e descritto di seguito. L'intento è fornire una prima fotografia sulle grandezze in gioco.

*Tabella 3.4 – Totale circolante di autocarri merci leggeri (con massa complessiva inferiore a 3,5 t) in Lombardia nel 2019, stima al 2030 e al 2050 e immatricolazioni annuali nei periodi di transizione al 2030 e al 2050; (\*) in riferimento al parco circolante del 2019, si vedano le assunzioni fatte per i veicoli con alimentazioni alternative proposte nel testo; (\*\*) i valori riportati sono le immatricolazioni medie (fra parentesi i valori di minimo e massimo); (\*\*\*) viene fatta l'assunzione di prevedere una diffusione di queste tecnologie uniformemente distribuita nell'arco temporale solo a partire dal 2030 [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati di Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti 2019 [31], Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri (UNRAE) [38], ACI [25], PNIEC [16] e LTS [17]]*

	Totale circolante 2019 (*)	Immatricolazioni annuali 2020-2030 (**)	Totale circolante 2030	Immatricolazioni annuali 2030-2050	Totale circolante 2050
<b>Elettrici</b>	937	2465 (92-5826)	28 053	11 780	263 660
<b>Ibridi</b>	336	5377 (1570-12 310)	59 481	0	0
<b>Idrogeno (FC) (***)</b>	0	0	0	16 479	329 575
<b>E-fuels (***)</b>	0	0	0	3296	65 915
<b>Metano</b>	16 497	315 (0 – 1385)	19 956	0	0
<b>Totale circolante</b>	536 981		884 309		659 150

*Tabella 3.5 – Immatricolazioni e totale circolante di autocarri merci pesanti (con massa complessiva superiore a 3,5 t) e trattori stradali in Lombardia nel 2019, e stima al 2030 e al 2050, immatricolazioni annuali nei periodi di transizione al 2030 e al 2050; (\*) in riferimento al parco circolante del 2019, si vedano le assunzioni fatte per i veicoli con alimentazioni alternative proposte nel testo; (\*\*) i valori riportati sono le immatricolazioni medie (fra parentesi i valori di minimo e massimo); (\*\*\*) si vedano le assunzioni proposte nel testo sulla penetrazione di veicoli alimentazioni a idrogeno e con combustibili sintetici nel periodo 2020-2030 [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati di Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti 2019 [31], Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri (UNRAE) [38], ACI [25], PNIEC [16] e LTS [17]]*

	Totale circolante 2019 (*)	Immatricolazioni annuali 2020-2030 (**)	Totale circolante 2030	Immatricolazioni annuali 2030-2050	Totale circolante 2050
<b>Elettrici</b>	13	7 (1 – 18)	94	241	4919
<b>Ibridi</b>	2	15 (1 – 38)	163	0	0
<b>Idrogeno (FC) (***)</b>	0	48	531	3663	73 796
<b>E-fuels (***)</b>	0	0	0	615	12 299
<b>Metano</b>	562	260 (122 – 567)	3422	0	0
<b>Totale circolante</b>	100 197	n/d	157 817	n/d	91 014

Il dataset ACI (riferito all'anno 2019) fornisce il numero complessivo regionale di veicoli circolanti, sia per gli autocarri che per i trattori stradali, mentre per le tipologie di alimentazione, il dettaglio regionale si limita ai veicoli alimentati a gasolio e a benzina (la flotta con alimentazioni alternative è stata ricavata per differenza, e ripartendo poi il valore fra le tecnologie mantenendo la proporzione nazionale). Il possibile totale circolante nel medio e lungo termine è stato definito in proporzione alla evoluzione del traffico merci, definito nella sezione 3.2.1. Per mancanza di ulteriori informazioni, si è assunto di mantenere un valore costante di tonnellate-km per veicolo nell'arco temporale considerato.

Per le immatricolazioni comprese nel decennio 2020-2030 è stata definita una penetrazione crescente delle tecnologie rinnovabili, a discapito di quelle tradizionali. Si è partiti dalle previsioni di evoluzione del traffico, sfruttando poi le informazioni sulle nuove immatricolazioni presentate nel report dell'Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri (UNRAE) [38], del luglio 2021. Sono state così definite delle traiettorie di evoluzione delle nuove immatricolazioni, combinandole con gli obiettivi per il settore dei trasporti menzionati nel pacchetto di proposte *Fit for 55*. Per quanto riguarda i veicoli alimentati a idrogeno o con carburanti di origine sintetica, viene assunta una loro penetrazione solamente a partire dal 2030, ritenendo poco probabile una loro diffusione nel periodo antecedente. Nel settore dei veicoli leggeri l'elettrificazione presenta un livello di maturità tecnologica più avanzato rispetto alle alternative a idrogeno (più adatte nel trasporto pesante, dove le maggiori potenze e le autonomie richieste sono forti limiti per l'elettrificazione), o all'impiego di carburanti sintetici, dal momento che l'infrastruttura per l'intera filiera non è ancora sviluppata. Per quanto riguarda invece il trasporto pesante, si fa riferimento alle linee guida preliminari della strategia nazionale idrogeno, secondo cui al 2030 almeno il 2% dei camion a lungo raggio sarà alimentata a idrogeno.

Per ricostruire uno scenario di completa decarbonizzazione al 2050 che fosse in linea con le indicazioni della LTS, è stata fatta l'assunzione di avere l'elettrificazione di circa la metà della flotta complessiva di veicoli a motore. La strategia di lungo termine fornisce poi una indicazione precisa per la categoria delle autovetture, dividendola per tipologia di alimentazione. Integrando queste due informazioni, viene ricavato il numero di veicoli a trazione elettrica circolanti per le categorie rimanenti, per poi definire i livelli di penetrazione delle tecnologie rinnovabili al 2050 come segue: nella categoria di autocarri merci leggeri si è assunto di avere il parco circolante composto da veicoli elettrici (40%), veicoli a idrogeno (50%) e veicoli alimentati a combustibili sintetici (10%); per la flotta di autocarri merci pesanti e trattori stradali si assume invece una elettrificazione al 30%, a favore di una maggiore penetrazione dell'idrogeno (60%) e con i combustibili sintetici ad alimentare la quota rimanente.

Un'analisi più completa sul grado di impiego delle soluzioni di decarbonizzazione per il settore merci, sia nel medio che nel lungo termine, non può prescindere da valutazioni sullo sviluppo della rete di infrastrutture nel contesto sovra-regionale o internazionale. Nel settore del trasporto merci è previsto infatti lo spostamento di materie prime, lavorati o prodotti finiti lungo rotte commerciali che attraversano differenti zone geografiche. Lo sviluppo di una singola tecnologia potrebbe dunque essere accelerato o fortemente penalizzato qualora oltre i confini fosse presente o meno una adeguata rete di infrastrutture di rifornimento. Da un altro punto di vista, può essere importante che la scelta di indirizzo del percorso di decarbonizzazione del settore non venga presa individualmente. Le politiche per la promozione di questi carburanti alternativi dovrebbero quindi tenere conto di strategie nazionali o europee sul medesimo tema, al fine di favorire un coordinamento nelle azioni, indirizzando le strategie delle varie realtà settoriali e riducendo i rischi legati agli investimenti.

Nel caso della propulsione a gas naturale il PNIEC fissa degli obiettivi per lo sviluppo di una rete di nuove stazioni di rifornimento sul suolo nazionale. La *Natural & bio Gas Vehicle Association* (NGVA Europe) [40] restituisce una mappa aggiornata circa i punti di vendita di gas naturale compresso o liquefatto nel continente europeo. In tale contesto, l'Italia presenta ad oggi la rete più sviluppata di strutture per il rifornimento di GNC (circa 1460 stazioni), risultando, assieme alla Germania (che conta circa 800 unità), uno dei pochi paesi con una infrastruttura capillare dedicata. Sempre per l'Europa centrale, si segnalano le circa 220 stazioni in Repubblica Ceca, o le installazioni nei Paesi affacciati sul Mare del Nord, come Paesi Bassi (187) o Belgio (159), fino ad arrivare ai valori più contenuti, soprattutto rapportati alla superficie del territorio, di Francia (152) e Spagna (108). Questa tendenza si riscontra anche nelle stazioni di rifornimento di GNL, con l'Italia sempre nel ruolo di apripista (103 punti attualmente in servizio), seguita da Spagna (75), Germania (71), Francia (52) e poi Paesi Bassi (28) e Belgio (19).

## Autobus

Le strategie nazionali promuovono in generale una migrazione dei flussi di passeggeri dalla mobilità privata a quella pubblica. Non forniscono informazioni puntuali rispetto alla possibile composizione futura del parco circolante degli **autobus**, ma forniscono indicazioni in merito alla flotta di veicoli del settore pubblico, riassunte di seguito:

- Nel PNIEC si definisce l'obbligo per gli enti locali di dotare il proprio parco di veicoli (autovetture, autobus e di servizio di pubblica utilità), al momento del suo rinnovo, di almeno il 25% di veicoli elettrici o alimentati a GNL o a GNC. Nello specifico, vengono definite delle soglie di penetrazione crescenti nel periodo di transizione dal 2020 al 2030. Questa percentuale sale al 30% entro il 2022, al 50% entro il 2025 per poi arrivare all'85% entro il 2030. Per gli autobus si indica la preferenza per veicoli elettrici o a metano (mentre vi è un indirizzamento verso l'idrogeno nella LTS).
- Nella LTS non vengono fornite indicazioni specifiche per il trasporto pubblico su gomma, ma si individuano come soluzioni alla decarbonizzazione sia la modifica della tecnologia motrice (e.g. impiegando soluzioni a trazione elettrica pura, oppure tramite celle a combustibile a idrogeno), sia la sostituzione dei carburanti fossili con combustibili rinnovabili (e.g. biometano o metanolo sintetico). Come per i veicoli commerciali pesanti, l'elettrificazione completa sembra essere di più difficile attuazione rispetto alle autovetture, per via dei maggiori requisiti di potenza, per il soddisfacimento della quale risulterebbero necessarie infrastrutture di ricarica superveloce, con un impatto significativo sulla rete elettrica. L'idrogeno può risultare una opzione valida, prevedendo opportuni sistemi di stoccaggio, mentre i carburanti di origine biologica o sintetica potrebbero invece sfruttare l'infrastruttura di rifornimento esistente, senza richiedere modifiche ai tradizionali sistemi di trazione, sebbene siano presumibili limiti di capacità produttiva nel lungo termine.

Di seguito viene presentata un'analisi qualitativa sulle tempistiche necessarie ad un rinnovamento completo delle attuali flotte circolanti delle varie categorie di veicoli. I calcoli presentati presentano delle assunzioni semplificative circa la possibile evoluzione dei parchi circolanti, le quali vengono assunte rimanere costanti nel tempo. Il fine ultimo è infatti quello di valutare quanti anni sarebbero necessari per completare la sostituzione dell'intero parco circolante di veicoli su gomma se si introducessero da subito soluzioni a zero o basse emissioni, mantenendo i livelli di nuove immatricolazioni registrati negli ultimi anni.

Si è partiti dalle informazioni presentate dall'Automobile Club d'Italia nei suoi "Annuari statistici" [41] per il quinquennio 2015-2019, dalle quali sono stati estratti i dati sul parco circolante delle varie categorie di veicoli (sia per il trasporto di persone che di merci). A queste sono state poi integrate le informazioni pubblicate nel report [38] della UNRAE, circa le nuove immatricolazioni per categoria. È stato così definito un tasso di rinnovamento, inteso come rapporto fra le nuove immatricolazioni registrate in un determinato anno ed il totale di veicoli circolanti per quella data classe. Avendo osservato un andamento pressoché stabile sia delle immatricolazioni che della flotta circolante, è stato stimato un tasso di rinnovamento medio, impiegato nelle analisi, presentate nella Tabella 3.6.

*Tabella 3.6 – Tassi di rinnovamento e anni necessari per la riconversione completa del parco circolante per categoria; (\*) calcolato sullo storico 2015-2019; (\*\*) assumendo costante nel tempo il totale dei veicoli circolanti per categoria [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ACI [41], UNRAE [38]]*

Classe di veicoli	Ambito geografico	Tasso di rinnovamento medio [%] (*)	Parco circolante nel 2019 [milioni di unità]	Anni necessari per una conversione completa della flotta (**)
Autovetture	Lombardia	4,8%	6,23	21 anni

	Italia	4,6%	39,72	21 anni
Autocarri merci leggeri (<3,5 t)	Lombardia	5,9%	0,54	17 anni
	Italia	5,0%	3,61	20 anni
Autocarri merci pesanti (>3,5 t) e trattori stradali	Lombardia	4,0%	0,1	25 anni
	Italia	3,0%	0,76	34 anni
Autobus	Lombardia	3,8%	0,01	27 anni
	Italia	2,5%	~0,1	40 anni

La presente tabella mostra un confronto fra il contesto nazionale ed un focus all'interno dei confini regionali. Dalle osservazioni storiche emerge la propensione ad un maggiore rinnovamento in Lombardia rispetto al resto della nazione, con la conseguenza di restituire tassi di rinnovamento più elevati. Ciò abbassa quindi la soglia temporale richiesta per poter sostituire completamente il parco circolante (assumendo di mantenere ritmi di sostituzione della flotta in linea con la tendenza storica osservata). In percentuale, il numero di nuove immatricolazioni più basse rispetto al parco circolante si registra nella categoria dei trasporti pesanti, sia pubblici che di merci, determinando come orizzonte temporale di completo rinnovamento il periodo successivo al 2050, anno in cui raggiungere gli obiettivi europei di decarbonizzazione completa.

Infine, per le categorie specifiche dove non vengono fornite informazioni specifiche nelle strategie nazionali (per esempio gli autoveicoli speciali), si possono ritenere comunque valide le considerazioni espresse per le categorie precedenti. A seconda infatti dell'autonomia, della potenza richiesta e della massa complessiva dei veicoli, possono risultare più adatte alcune soluzioni a discapito di altre: a titolo esemplificativo, si potrebbe prevedere una più facile elettrificazione per le flotte di autoveicoli speciali leggeri (e.g. ambulanze o trasporti funebri), o con alimentazioni a idrogeno o carburanti sintetici per i veicoli pesanti (e.g. gru o trasporti speciali).

### 3.2.3 Possibile evoluzione delle altre modalità di trasporto

Di seguito vengono presentate alcune considerazioni sulla possibile evoluzione per le modalità di trasporto, di merci e persone, al di fuori di quello stradale. Si guardano in particolare il trasporto ferroviario, il trasporto navale e il trasporto aereo. Come per il trasporto su gomma, anche per queste modalità di trasporto il percorso di decarbonizzazione tende all'elettrificazione dove possibile e al ricorso a vettori energetici alternativi, quali i biocombustibili, l'idrogeno o combustibili sintetici di sua derivazione. Ancora una volta, sono da tenere in considerazione le evoluzioni del parco e della rete di infrastrutture nel contesto sovra-regionale, nazionale o internazionale, in quanto lo sviluppo o meno di una tecnologia può essere fortemente condizionato dalla sua presenza nelle realtà limitrofe.

#### Trasporto ferroviario

Per quanto riguarda il **trasporto ferroviario**, che presenta al 2021 quasi il 90% delle linee di collegamento già elettrificate, sono presenti differenti opzioni di decarbonizzazione allo stato dell'arte. La prima soluzione consiste nell'elettrificazione della linea stessa. Questa può tuttavia presentare difficoltà di tipo progettuale (per esempio laddove siano presenti gallerie dalla sezione di passaggio troppo stretta), che possono richiedere interventi aggiuntivi, determinando un aggravio sul costo complessivo dell'opera. In alternativa, si può agire direttamente sui convogli ferroviari, modificandone i sistemi di trazione. Ad oggi, lungo tutte le linee nazionali non elettrificate vengono impiegate motrici alimentate a gasolio. Le possibili alternative a



minore impatto emissivo sono rappresentate da veicoli ferroviari ibridi, veicoli a idrogeno oppure alimentati con carburanti di origine sintetica.

Tipicamente le motrici ibride sono a trazione diesel-elettrica, dove uno o più motori alimentati a gasolio sono integrati con set di accumuli elettrochimici, riducendo i consumi di carburante e le emissioni di gas climalteranti. Questa soluzione presenta un livello di maturità tecnologica più avanzato, con la presenza sul mercato di soluzioni commerciali già esistenti, risultando quindi una soluzione più indicata per il breve e medio termine. È di novembre 2018 uno dei primi accordi relativi alla decarbonizzazione della mobilità ferroviaria regionale, tra FNM S.p.A. e Stadler, per la fornitura di almeno 30 nuovi convogli (con un tetto massimo di 50 nuovi treni) a trazione ibrida [42].

I veicoli a idrogeno sfruttano la tecnologia delle celle a combustibile per convertire il vettore energetico in energia elettrica ed alimentare quindi i gruppi di propulsione elettrici. Anche questa opzione presenta un livello di maturità tecnologica avanzato e proprio in Lombardia è in programma l'impiego di convogli a idrogeno lungo la linea ferroviaria Brescia-Iseo-Edolo. FNM S.p.A. e Trenord hanno definito infatti un accordo (a novembre 2020), secondo cui verranno acquistati 6 elettrotreni alimentati a idrogeno, consegnati entro il 2023, con la possibilità di estendere la fornitura ad altri 8 [43]. Differentemente dalle soluzioni ibride precedenti, per le quali la rete di rifornimento di gasolio è una realtà ben consolidata, per l'opzione a idrogeno questa infrastruttura è ancora assente e deve essere progettata per intero. L'accordo menzionato va in questa direzione, prevedendo la costruzione di impianti di produzione e accumulo di idrogeno dedicati, partendo da metano/biometano e catturando le emissioni di biossido di carbonio risultante e successivamente integrandoli con impianti di produzione da elettrolisi.

L'ultima opzione consiste nella sostituzione del carburante utilizzato, prevedendo non più gasolio di origine fossile, bensì impiegando carburanti di origine sintetica. Questa opzione avrebbe come vantaggio la possibilità di sfruttare le infrastrutture di rifornimento esistenti, limitando le modifiche al convoglio ferroviario. Tuttavia, questa soluzione presenta dei rendimenti inferiori rispetto all'impiego diretto dell'idrogeno, dovendo prevedere numerosi processi di trasformazione (e conseguenti spese energetiche ed economiche) per poter ottenere il carburante sintetico richiesto.

#### *Trasporto navale*

Relativamente al **trasporto navale**, ad oggi vengono impiegati come sistemi di trazione solamente soluzioni che consumano combustibili petroliferi. Relativamente alla navigazione interna (lungo i corsi d'acqua o sui laghi), il ventaglio di opzioni di decarbonizzazione risulta essere più ampio rispetto al settore marittimo nel suo complesso. La navigazione in mare aperto è infatti caratterizzata dalla necessità di autonomie e di potenze di propulsione significativamente maggiori, dovendo percorrere rotte molto più lunghe. Come riportato nell'Allegato 2 della LTS, *"Dettagli sulle tecnologie di decarbonizzazione"* [17], le possibili soluzioni di decarbonizzazione del trasporto navale vanno dall'elettificazione diretta, con motori elettrici e con batterie a bordo, a navi con motori elettrici ma alimentati da celle a combustibile ed accumuli di idrogeno o metanolo (in sperimentazione). Infine, come si è visto per il trasporto ferroviario, possono essere prese in considerazione soluzioni con motori endotermici, alimentati però con carburanti di origine biologica o sintetica, oppure soluzioni a trazione ibrida.

L'elettificazione diretta e l'impiego di accumuli elettrochimici direttamente sulle imbarcazioni risultano una opzione fattibile solamente per traghetti o navi che coprono brevi percorrenze (a causa della limitata densità energetica delle batterie). Devono essere inoltre previste adeguate infrastrutture per la ricarica presso i porti, con un impatto sulla rete elettrica non trascurabile. Discorso analogo si applica per le navi alimentate a idrogeno o metanolo, per le quali deve essere progettata una rete di rifornimento dedicata. Un primo progetto pilota di imbarcazione con un sistema di propulsione elettrico a celle a combustibile alimentate a

idrogeno è stato avviato in Norvegia nel 2019, da ABB e SINTEF, per sviluppare una flotta di navi a idrogeno per la navigazione interna [44].

Come per gli altri settori di trasporto, l'impiego di carburanti di origine sintetica beneficerebbe della possibilità di utilizzo di infrastrutture per il rifornimento esistenti, al più prevedendo modifiche di minore entità nei sistemi di propulsione. Questa soluzione richiede tuttavia ancora un notevole sviluppo per l'infrastruttura di produzione e approvvigionamento dei carburanti sintetici, presentando numerose incognite circa la potenziale capacità produttiva nel lungo termine.

Una soluzione di più adatta nel breve e medio termine risulta essere quella della propulsione ibrida. Come per il trasporto ferroviario, ad un sistema di trazione alimentato a gasolio (o con altri prodotti petroliferi) viene associato un motore elettrico collegato a delle batterie. Risulta quindi possibile alternare una propulsione ibrida, dove il motore endotermico fornisca la potenza principale e gli accumuli elettrochimici operano da supporto, oppure (per brevi tratti) è possibile navigare in modalità puramente elettrica. Una prima applicazione nel contesto regionale si riscontra sul Lago Maggiore, dove la Gestione Governativa Navigazione Laghi ha presentato nella primavera del 2021 un'imbarcazione a trazione ibrida diesel-elettrica [45].

#### *Trasporto aereo*

La decarbonizzazione del **trasporto aereo** pone maggiori difficoltà. La criticità principale è legata alla richiesta di una elevata autonomia necessaria per poter mantenere le attuali rotte sia nazionali che internazionali. Questa modalità di trasporto rientra quindi nei settori di difficile decarbonizzazione (o hard-to-abate), dal momento che soluzioni come l'elettrificazione diretta risultano di difficile applicazione. Quest'ultima, infatti, è di fatto limitata agli aerei di piccola taglia e con limitate esigenze di autonomia, per via dei limiti di densità energetica che comporterebbero un peso eccessivo per il velivolo. Diversamente, si stanno investigando soluzioni a idrogeno o che prevedano l'utilizzo di carburanti di origine sintetica o biologica. Per l'opzione a idrogeno si segnalano alcuni progetti internazionali, come la recente collaborazione lanciata da British Airways e ZeroAvia, al fine di convertire l'attuale flotta ricorrendo all'idrogeno e raggiungere l'obiettivo aziendale di neutralità climatica al 2050 [46] e l'obiettivo di Airbus di mettere in commercio i primi aerei a idrogeno entro il 2035 [47]. Questi ultimi sfrutterebbero il vettore energetico in due maniere distinte, impiegandolo in turbine a gas per ottenere la propulsione principale e convertendolo in apposite celle a combustibile per ricavare l'energia elettrica necessaria per tutte le altre operazioni.

L'impiego di carburanti di origine sintetica o biologica risulta infine più indicata in questo settore piuttosto che nelle altre modalità di trasporto, per via della necessità di elevata autonomia e della difficoltà (o impossibilità) di rifornimento nelle rotte intercontinentali. In tale direzione si muovono alcune proposte della Commissione Europea, fra cui la *"Regulation of the european parliament and of the council - on ensuring a level playing field for sustainable air transport"* del luglio 2021 [48], attraverso la quale si vuole definire un percorso di progressiva penetrazione di carburanti di origine sintetica (noti con l'acronimo di Sustainable Aviation Fuels, SAF), per i quali è previsto un potenziale di almeno il 28% del mix di carburanti utilizzati al 2050.

Risulta in generale strategica la pianificazione di una adeguata rete di infrastrutture per l'approvvigionamento ed il rifornimento di vettori energetici come l'idrogeno o i carburanti sintetici da esso derivati negli scali aeroportuali presenti sul suolo regionale, al fine di garantirne la loro idoneità come scali nelle future rotte nazionali o internazionali.

### 3.3 Infrastrutture di ricarica elettrica e rifornimento di combustibili alternativi

Nella presente sezione si propone un'analisi circa le infrastrutture di ricarica elettrica e circa gli impianti di rifornimento di metano e di idrogeno, con l'intenzione di fotografare la situazione attuale e fornire delle indicazioni sulla possibile evoluzione futura.

#### 3.3.1 *Modalità di ricarica e infrastrutture pubbliche*

Esistono quattro principali modalità di ricarica dei veicoli elettrici: la ricarica domestica, la ricarica presso il posto di lavoro, la ricarica pubblica (su suolo pubblico) e la ricarica presso le destinazioni (esercizi).

La ricarica domestica è la ricarica ad oggi sfruttata per la maggior parte degli eventi di ricarica e dell'energia ricaricata. Avviene presso il domicilio, quindi a potenze limitate dal contatore dell'utenza domestica (in genere 3,3 kW), tramite wallbox collegata a una presa elettrica domestica.

La ricarica presso il posto di lavoro è la ricarica principale per quanto riguarda le flotte e le auto business. Essa richiede un'infrastruttura di ricarica (IdR) privata aziendale posta nel parcheggio o garage aziendale e in genere connessa al contatore aziendale. Per questo motivo, la potenza di ricarica può essere anche elevata e generalmente a costo limitato, in quanto considerabile consumo energetico marginale presso un'utenza che ha un costo specifico in €/kWh generalmente basso e che ha già sostenuto i costi fissi (connessione, quota fissa e quota potenza della bolletta elettrica).

La ricarica pubblica è la ricarica che avviene su suolo pubblico presso IdR accessibili a tutti. Essa richiede colonnine elettriche presso parcheggi, aree di servizio o altri stalli. Generalmente, l'accesso avviene tramite servizio (app, carta o altro tipo di servizio) che permette di iniziare e fermare l'erogazione di energia nonché di effettuare transazioni economiche per il pagamento della stessa. In generale, il costo dell'energia presso questa IdR è elevato, in quanto si serve di colonnine sottese a punti di connessione dedicati, che sostengono quindi costi fissi e variabili. Ciò si ribalta sull'utenza con prezzi all'utente elevati, utili a ripagare i costi e a fornire il margine del fornitore del servizio. Ad oggi, la ricarica pubblica rappresenta una bassa percentuale del totale dell'energia ricaricata. Tuttavia, la maggior diffusione dell'IdR pubblica è considerato un importante driver per la crescita della mobilità elettrica.

La ricarica presso le destinazioni è caratterizzata da IdR situate presso esercizi commerciali o servizi, solitamente gestita dal proprietario o operatore dei servizi e accessibile ai clienti o utenti (b2c). Si configura per l'utenza in maniera simile alla ricarica pubblica. È caratterizzata però da un costo generalmente inferiore per la fornitura del servizio, in quanto, come per la ricarica sul posto di lavoro, l'energia proviene dall'utenza elettrica dell'esercente (ossia con costi fissi già affrontati e un costo specifico in €/kWh generalmente basso). Anche dal punto di vista del prezzo per l'utenza, esso può essere molto vario: alcuni servizi possono offrire gratuitamente o con un forte sconto la ricarica all'utenza che presenta una carta fidelizzante (carta socio, carta fedeltà, tessera sanitaria che dimostra la residenza in un certo Comune, altro).

La seguente torta (Figura 3.24) dei consumi energetici per la ricarica è stata considerata dall'Autorità di regolazione per energia reti e ambiente (ARERA) nel 2019 [49]: addirittura l'87% dell'energia viene da ricarica domestica, seguita dall'8% di ricarica presso il posto di lavoro.

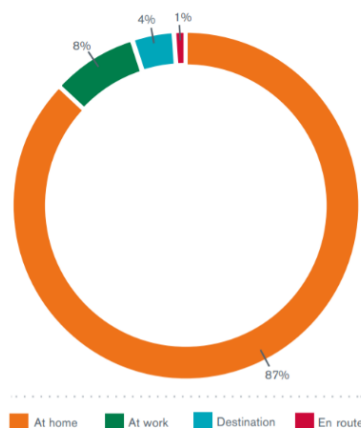


Figura 3.24 - Ripartizione percentuale dell'energia ricaricata sui veicoli nelle diverse situazioni [Fonte: ARERA [49]]

Una fotografia dell'attuale installato per quanto riguarda i punti di ricarica elettrica distribuiti sul territorio è restituita dal report *"Il futuro della mobilità elettrica: l'infrastruttura di ricarica in Italia @2030"*, pubblicato da MOTUS-E in collaborazione con Strategy& [50]. Secondo il report, nel 2020, sono in particolare 3330 unità i punti di ricarica pubblici situati in Lombardia, i.e. circa il 17% dei 19 300 presenti a livello nazionale in circa 9 700 infrastrutture. Il rapporto fra punti di ricarica e popolazione è in linea con la media nazionale. I punti di ricarica presentano potenze eterogenee: a livello nazionale, il 22,4% ha potenze inferiori a 7,4 kW, l'1,1% ha potenze comprese fra 7,4 e 21 kW, un 73% ha potenze comprese fra 22 e 43 kW, un 3,1% ha potenze comprese fra 44 e 100 kW<sup>18</sup> ed uno 0,4% presenta potenze superiori a 100 kW. Le infrastrutture pubbliche sono distribuite a livello nazionale per un 80% su suolo pubblico, a fronte di un 20% di stazioni di rifornimento su suolo privato a uso pubblico (e.g. centri commerciali). Il report stima anche, a livello nazionale, circa 60 000 punti di ricarica privata e circa 10 000 punti per la ricarica condivisa sul posto di lavoro. Il numero di posti auto o garage presenti sul territorio, potenziali punti di ricarica privata, sono stimati pari a circa 17 milioni.

Il report, infine, registra una distribuzione di circa il 30% delle infrastrutture di ricarica in città metropolitane. Considerando che nelle città metropolitane (Milano, Roma, Torino, Bologna, Firenze, Venezia, Napoli, Genova, Reggio Calabria, Bari e Palermo) vive circa il 15% della popolazione nazionale, si ottiene una densità specifica di circa 4000 abitanti per singola Infrastruttura di Ricarica (IdR). Il rapporto sale a circa 8500 abitanti per IdR nel contesto di zone suburbane e città minori, in cui si concentra il rimanente 85% della popolazione.

Come viene anche avallato dalla letteratura, è presumibile attendersi un più ampio peso delle modalità di ricarica non domestiche per il futuro, anche come conseguenza della più ampia infrastrutturazione.

La possibile evoluzione della fruizione delle tipologie di ricarica dipende anche dal costo della stessa in ciascuna tipologia. L'ARERA ha presentato uno studio sui costi energetici legati a ogni tipo di ricarica [51]. Essi includono il costo energetico e i costi legati alla tariffa elettrica. A partire da questi, tramite un'elaborazione sviluppata rispetto al suddetto studio, nella Tabella 3.7 vengono proposti i costi per il servizio di ricarica. Nei costi qui espressi sono considerati i costi per l'elettricità, le componenti tariffarie (costi di rete e oneri generali di sistema), le imposte, ma non gli eventuali margini per il fornitore del servizio di ricarica.

<sup>18</sup> Le infrastrutture di ricarica con potenze inferiori a 44 kW sono caratterizzate tipicamente da tecnologie a corrente alternata, mentre per gestire potenze superiori, il rifornimento avviene in corrente continua.

Tabella 3.7 – Costi per il servizio di ricarica [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico su dati ARERA [51]]

Modo	Costo del servizio (€/kWh)
Ricarica domestica	0.176
Ricarica domestica (in caso di box auto con POD separato)	0.316
Ricarica presso il posto di lavoro (PMI)	0.203
Ricarica presso il posto di lavoro (industria)	0.185
Ricarica pubblica	0.294
Ricarica alle destinazioni (centro commerciale)	0.178
Ricarica alle destinazioni (esercizio commerciale)	0.234

### 3.3.2 Possibile evoluzione delle infrastrutture di ricarica elettrica

Nella presente Sezione vengono presentati gli obiettivi delle strategie nazionali e ulteriori considerazioni circa la diffusione di infrastrutture di ricarica elettrica.

Vengono definiti degli obiettivi numerici per l'orizzonte del 2030 all'interno del PNIEC e del Piano nazionale infrastrutturale per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica (PNIRE) del giugno 2016 (ma aggiornato al 2020) [52]. Per quanto riguarda le infrastrutture di ricarica elettrica, il PNIRE prevede l'installazione di circa 110 000 stazioni di rifornimento pubbliche al 2030, al netto delle infrastrutture già installate. Nello specifico, vengono previste circa 78 600 infrastrutture per la ricarica lenta (ossia con potenze installate inferiori ai 7,4 kW) e circa 31 500 per la ricarica veloce (con potenze comprese fra i 22 e i 50 kW) [52]. Mentre le prime sono previste essere distribuite interamente nei centri urbani, per le infrastrutture di ricarica veloce si prevede una ripartizione al 62% nei centri urbani e al 32% ai nodi extra-urbani, con un 6% circa nelle arterie autostradali.

Analizzando il possibile sviluppo della rete di infrastrutture di ricarica elettrica, la letteratura si attende per il futuro un più ampio peso delle altre modalità di ricarica rispetto al contributo principale fornito da quella domestica. Questo avviene anche come conseguenza della più ampia diffusione delle infrastrutture pubbliche, oggi collocata in un primo stadio di avanzamento. Per un orizzonte temporale in linea con gli obiettivi dei piani nazionali al 2030, può essere stimata la ripartizione di energia riportata in Figura 3.25, sulla base di analisi di letteratura scientifica, istituzionale e industriale. Si nota come la ricarica domestica abbia ancora un ruolo primario, rappresentando circa la metà della richiesta energetica, mentre il resto delle ricariche è suddiviso in maniera equa tra ricarica presso il posto di lavoro, quella alle destinazioni ed infine la ricarica pubblica presso IdR dedicate lungo la rete stradale. È bene precisare però che un mix di questo tipo potrà essere raggiunto solamente se vi sarà una effettiva diffusa infrastrutturazione e implementazione di IdR anche sul posto di lavoro, come la letteratura stima.



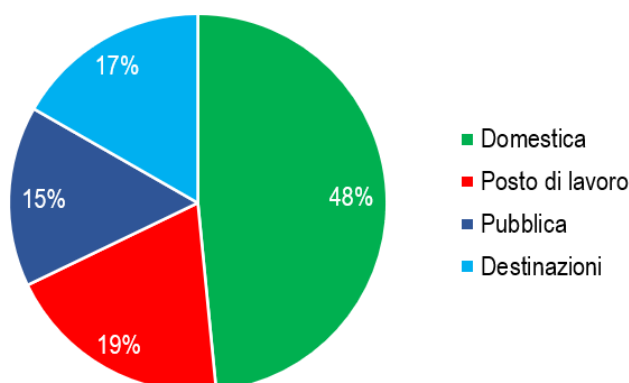
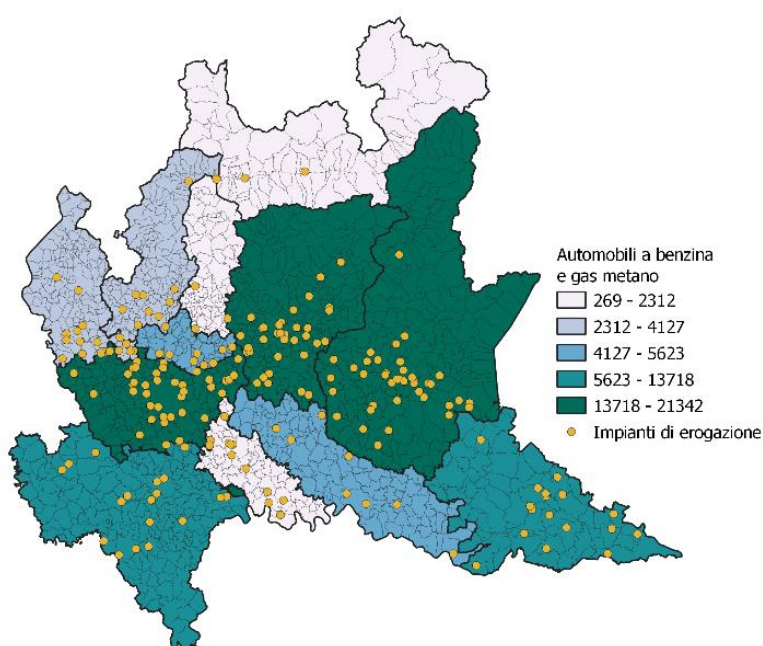


Figura 3.25 – Suddivisione delle infrastrutture per fabbisogno energetico soddisfatto [Fonte: Elaborazione Fondazione Politecnico]

### 3.3.3 Infrastrutture di erogazione carburanti alternativi

Per quanto riguarda i punti di rifornimento di metano, una fotografia con dettaglio nazionale si trova nel PNIEC, con riferimento al gas naturale, in due tipologie: il Gas Naturale Compresso (GNC) ed il Gas Naturale Liquefatto (GNL). Per il primo, identifica la presenza a fine 2016 di circa 1100 punti vendita eroganti il servizio, mentre per il GNL dichiara essere installate solamente poche decine di strutture nel medesimo anno. Un'informazione più recente è fornita da Ecomotori.net, secondo la quale nel 2021 sono attivi circa 1500 impianti di rifornimento di GNC, di cui circa 210 in Lombardia [53] e 103 stazioni per il GNL, di cui 15 nel territorio lombardo. Regione Lombardia [54] mette inoltre a disposizione un dataset (aggiornato al 2021) che elenca le stazioni di servizio che erogano metano compresso. La distribuzione spaziale è mostrata insieme al numero di veicoli con doppia alimentazione a benzina e metano, in Figura 3.26. Risulta evidente una correlazione a livello provinciale fra il numero di veicoli e il numero di impianti di erogazione. Nelle province di maggior diffusione, il rapporto tra il numero di veicoli e gli impianti di erogazione ricade in un intervallo tra 300 e 500 veicoli per impianto.



*Figura 3.26 – Distribuzione spaziale degli impianti di erogazione di metano compresso per autotrazione ad uso pubblico nel 2021 e del parco circolante di autovetture alimentate a benzina e gas metano [Fonte: Regione Lombardia [54], ACI [25]]*

Per quanto riguarda la possibile evoluzione futura, il PNIEC fornisce un obiettivo nazionale al 2030 per le stazioni eroganti GNC, con un passaggio dalle attuali 1500 unità a circa 2400. Per quanto riguarda invece il GNL, il piano fissa l'obiettivo di circa 800 punti vendita nel 2030.

Per quanto riguarda il possibile sviluppo e potenziamento delle infrastrutture di rifornimento di idrogeno, il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) [55], pubblicato nel 2021, raccoglie le indicazioni delle varie associazioni di settore sulla necessità di sviluppare un'adeguata rete, prevedendo l'installazione di 40 stazioni di rifornimento per autotrazione e 9 dedicate al trasporto ferroviario.

Lungo questa direzione si colloca anche la proposta della Commissione Europea presentata nel recente luglio 2021 all'interno del più ampio pacchetto *Fit for 55*, sullo sviluppo di una infrastruttura per i carburanti alternativi e la revisione della precedente direttiva sull'infrastruttura per carburanti alternativi (DAFI) del 2014 [56]. La proposta definisce, per l'orizzonte temporale del 2030, degli obiettivi di sviluppo di nuovi punti di ricarica e rifornimento dei principali vettori energetici alternativi. Per l'idrogeno si avanza l'obiettivo di prevedere delle stazioni di rifornimento accessibili al pubblico ad una distanza massima di 150 km lungo le arterie principali della rete trans-europea di trasporti (TEN-T) ed entro intervalli di 450 km lungo la rete secondaria<sup>19</sup>. I punti adibiti al rifornimento devono presentare una capacità di fornitura pari a 2 t di idrogeno al giorno, essendo poi equipaggiate con almeno un erogatore a 700 bar. Sempre entro il 2030 il documento definisce l'obiettivo di prevedere almeno un impianto di erogazione di idrogeno per ciascun nodo urbano, considerando nella scelta della località anche la possibile presenza di sinergie con altre modalità di trasporto a idrogeno (e.g. trasporto ferroviario).

### 3.4 Interazione fra veicoli elettrici e sistema elettrico

Nella presente sezione vengono presentate alcune considerazioni sulle interazioni fra la rete elettrica ed il parco di vetture elettriche stimato sul suolo regionale in uno scenario al 2030. Dapprima si analizza il possibile impatto sulla rete (Sezione 3.4.1); segue poi una analisi sulla possibile impronta emissiva collegata al settore della generazione elettrica (Sezione 3.4.2), sulle possibili azioni per mitigare gli effetti sul carico elettrico, anche mediante la modalità di ricarica intelligente (Sezione 3.4.3).

#### 3.4.1 Impatto sulla rete

La ricarica di veicoli elettrici comporta un aumento dell'energia richiesta al sistema elettrico e un aumento di potenza potenzialmente concentrato in alcuni periodi di tempo.

La ricarica domestica avviene principalmente alla fine dell'orario lavorativo, quando i veicoli rientrano, e prosegue poi nelle ore notturne come ricarica lenta. Visto l'elevato numero di ore a disposizione, gli eventi di ricarica domestica sono generalmente caratterizzati da molta energia prelevata. La ricarica presso il posto di lavoro avviene invece principalmente nell'orario di ufficio, mentre la ricarica pubblica viene fruita in tutte

---

<sup>19</sup> La Trans-European Transport Network (TEN-T) [57] riunisce e promuove lo sviluppo di una rete di collegamenti sia stradali, che ferroviari, fluviali, marittimi e aerei lungo tutto il continente europeo. Si suddivide in due raggruppamenti: (i) il cuore (core), che include i progetti di connessione fra i principali centri urbani, prevedendo lo sviluppo (o il potenziamento), entro il 2030, di arterie come quella fra Paesi scandinavi e Mediterraneo (da Helsinki fino a Palermo) e (ii) la rete secondaria (comprehensive network), che entro il 2050 ambisce a coprire tutte le regioni europee

le ore, con una concentrazione più elevata generalmente nelle ore diurne. Nei punti di ricarica presso le destinazioni, il profilo di potenza richiesto è generalmente corrispondente a quello della fruizione dell'esercizio di destinazione (esercizi commerciali, servizi, ecc.).

Una stima di massima del carico elettrico marginale orario in Lombardia al 2030 dovuto alla mobilità elettrica viene proposta nella seguente Figura 3.27. Viene considerata la ripartizione degli eventi di ricarica coerente con la stima al 2030 riportata nella sezione precedente, secondo la quale è attesa un maggiore contributo da parte della ricarica elettrica presso luoghi di interesse o luoghi pubblici (a discapito di quella domestica). Il numero di veicoli elettrici è stimato in 1,40 milioni, suddivisi in 1,02 milioni di BEV (73%) e 0,38 milioni di PHEV (27%) come da ripartizione PNIEC.

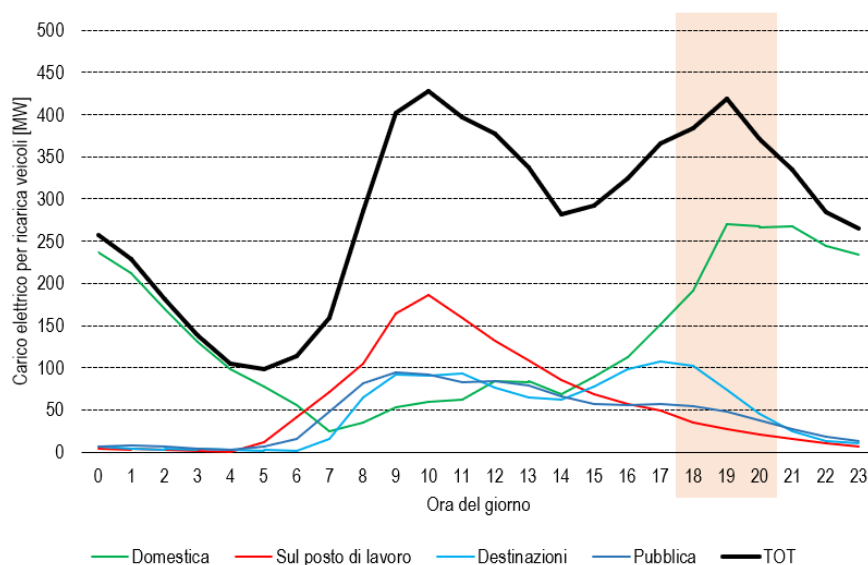


Figura 3.27 – Stima del carico elettrico marginale orario in Lombardia al 2030 (scenario di Riferimento) dovuto alla mobilità elettrica [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico]

Come si può notare dai profili orari, la ricarica domestica si discosta in maniera rilevante dalle altre tipologie. In particolare, essa richiede maggior potenza nella fascia oraria 18-21. Ciò significa che, dal punto di vista dell'impatto sulla rete, la ricarica domestica implica un carico marginale durante il picco di domanda elettrica serale e va ad accentuare la cosiddetta "duck curve" (i.e. bassa domanda nelle ore centrali e ripido aumento nelle ore serali). La ricarica domestica è, ad oggi e a tendere, la modalità di ricarica principale. Le altre tipologie di ricarica (in particolare la ricarica sul posto di lavoro), presentano invece un picco di domanda nelle ore diurne che, in uno scenario futuro (al 2030 e oltre), potrebbe essere soddisfatto in grande maggioranza o in toto da energia fotovoltaica, diminuendo drasticamente l'intensità carbonica ( $g_{CO2eq}/kWh$ ) dell'elettricità per la ricarica e di conseguenza della mobilità elettrica.

Nella Figura 3.28 di seguito viene proposta un'analisi di sensitività per considerare le situazioni più critiche. In particolare, rispetto allo scenario precedentemente, di riferimento, si evidenziano le seguenti differenze:

- Si considerano le code di probabilità degli scenari di penetrazione di veicoli elettrici, con uno scenario Accelerato (in cui si assumono 2 milioni di veicoli elettrici in Lombardia al 2030) e Rallentato (con 0,9 milioni di veicoli).

- Si considera una diversa distribuzione dell'energia ricaricata nei vari modi di ricarica, in particolare adottando la distribuzione menzionata da ARERA e considerata valida per il 2019 (si veda la Figura 3.24), per evidenziare il rischio che la ricarica domestica rimanga fortemente prevalente, con le problematiche già citate.

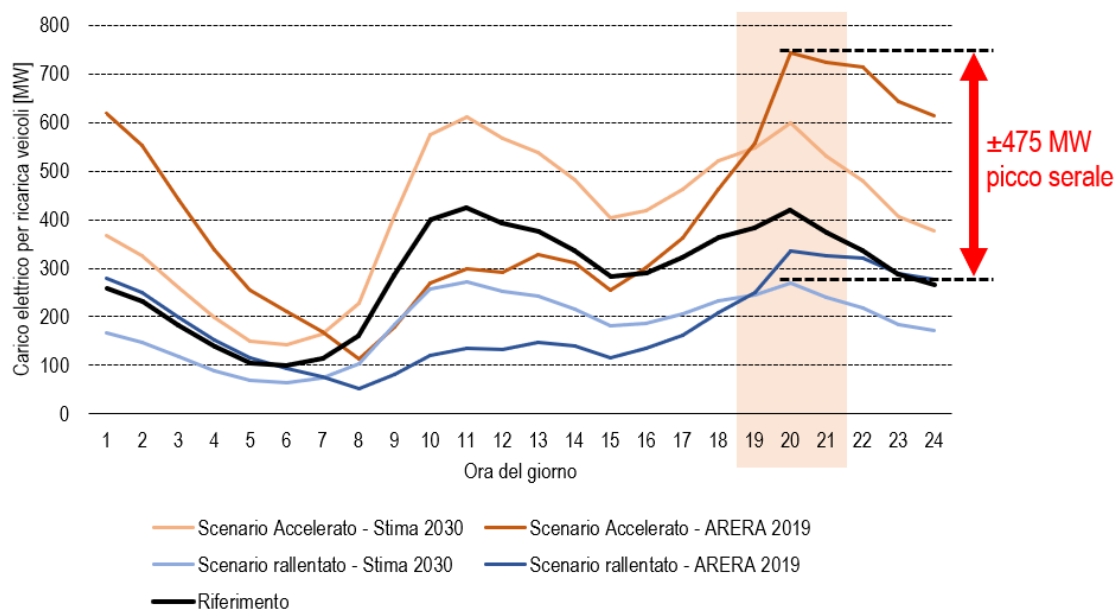


Figura 3.28 – Confronto del carico elettrico marginale orario in Lombardia al 2030 nei differenti scenari considerati [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico]

Dal confronto dei profili presentati in Figura 3.28 rispetto allo scenario di riferimento emerge come, oltre ad avere un aumento di carico totale, concentrato in alcuni intervalli di tempo, si possa avere un impatto più rilevante in particolari contesti geografici. Per questo, una analisi più puntuale dei flussi, a valle di una disponibilità dei profili di carico delle varie sottostazioni della rete, può essere di interesse per la pianificazione di interventi, ad esempio per il cambio modale (modal shifting) della mobilità in contesti specifici (orari e geografici).

In aggiunta all'aumento di potenza, l'ARERA fa notare che la ricarica pubblica può richiedere l'introduzione di punti di prelievo (POD) dedicati alla ricarica di veicoli elettrici [51], i quali presentano di conseguenza un costo per il servizio più elevato (sono da considerarsi i costi fissi tariffari), oltre che un incremento della complessità della rete. L'aumento di POD dedicati può essere messo in relazione con la frazione di ricarica che avviene presso strutture pubbliche: considerando il ventaglio di scenari proposto in precedenza, si possono stimare fino a diverse migliaia di nuovi POD dedicati alla ricarica in Lombardia al 2030. In alternativa, la ricarica alle destinazioni può fornire un servizio in parte omologo alla ricarica pubblica senza richiesta di POD dedicati e con costo inferiore per il servizio: il collegamento della IdR avviene utilizzando l'utenza elettrica già esistente alla destinazione, eventualmente con aumento di potenza per le utenze di piccole dimensioni.

### 3.4.2 Intensità carbonica dell'energia ricaricata

Se da un lato è già ad oggi in Italia dimostrato il minor impatto climalterante a livello di ciclo di vita di un veicolo elettrico rispetto ai veicoli a combustione interna [58], è indubbio che in uno scenario al 2030 sarà importante diminuire ancora l'impronta carbonica ( $g_{CO2eq}/km$ ) della mobilità elettrica. L'efficientamento dei sistemi di produzione, l'aumento del rendimento energetico in movimento e l'incremento del recupero di materiali in fase di smaltimento rappresentano sicuramente possibili miglioramenti delle tecnologie in direzione sostenibile. A livello di sistema, un minore impatto sul clima si ottiene con una minore intensità carbonica dell'energia elettrica utilizzata per la ricarica. Si riporta di seguito in Figura 3.29 una stima dell'intensità carbonica (espressa in  $g_{CO2eq}/kWh$ ) del mix di produzione elettrica italiano nelle diverse ore del giorno al 2030<sup>20</sup>. Appare evidente come l'elettricità prodotta nelle ore diurne, di provenienza maggiormente legata al fotovoltaico e in generale alla produzione da FER non programmabili, produce minori emissioni climalteranti. Concentrare la ricarica in quelle ore potrebbe fornire un esempio di carico intelligente e aumentare la sostenibilità ambientale della mobilità elettrica.

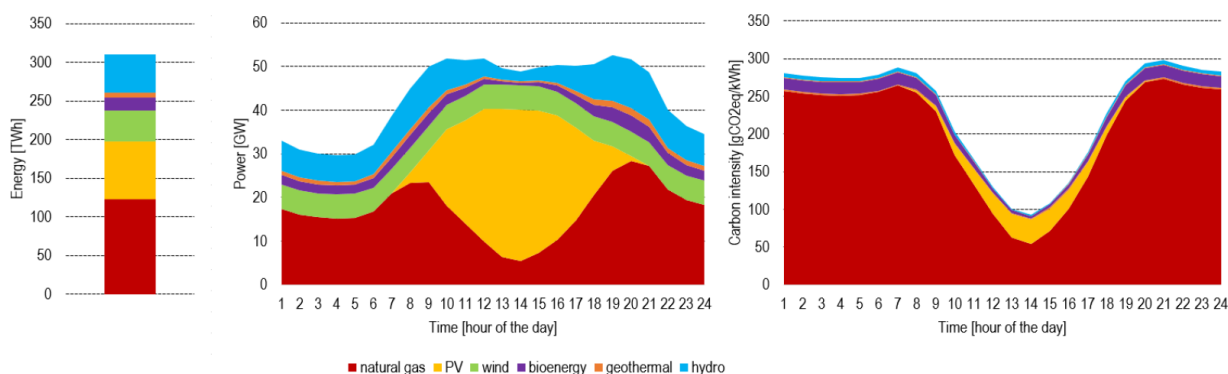


Figura 3.29 – Stima della generazione elettrica ripartita per fonte e dell'intensità carbonica ad esso associata al 2030; nel grafico a sinistra viene presentata la generazione annuale di energia elettrica (espressa in TWh); nel grafico centrale si riporta il profilo giornaliero medio della potenza generata, mentre nell'immagine a destra viene riportata l'intensità carbonica ad esso associata (espressa in g di CO<sub>2</sub> equivalente per kWh elettrico generato) [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico]

### 3.4.3 Ricarica smart domestica e altre possibili azioni di mitigazione

Fra le azioni che è possibile implementare per ridurre le problematiche collegate alla interazione delle vetture elettriche con la rete, si identificano le seguenti categorie di interventi e le loro finalità:

- Incentivi per una specifica modalità di ricarica, utili ad aumentare il peso di una tipologia di ricarica ritenuta vantaggiosa per il sistema sotto i diversi profili precedentemente illustrati.
- Incentivi all'infrastrutturazione, per aumentare la diffusione di IdR di vari tipi: ad esempio, utili a far prediligere la ricarica alle destinazioni a quella pubblica o viceversa.

<sup>20</sup> Fonte: elaborazione degli autori su dati Terna e scenari PNIEC.



- Incentivi ai fini della ricarica intelligente (o smart charging), utili a modificare le abitudini di un particolare utente e di conseguenza il profilo orario di un modo di ricarica. A tal proposito, una sperimentazione è già avviata per lo smart charging domestico dal GSE.

La misura in fase di avvio dedicata alla “Ricarica di veicoli elettrici presso luoghi non accessibili al pubblico” prevede la possibilità di incrementare la potenza prelevata, senza costi, nelle ore notturne (fascia F3) presso punti di ricarica (dedicati o meno) in cui avvenga ricarica di veicoli elettrici. Ad esempio, questa misura può essere applicata a utenze domestiche o box auto. La necessità di questa misura è dovuta al fatto che la ricarica domestica si concentra nelle ore di picco serale, potenzialmente aggravando il carico delle cabine secondarie (e in generale della rete elettrica) in un intervallo di tempo già congestionato. La situazione descritta è visibile nei grafici sottostanti (Figura 3.30), di fonte ARERA [59].

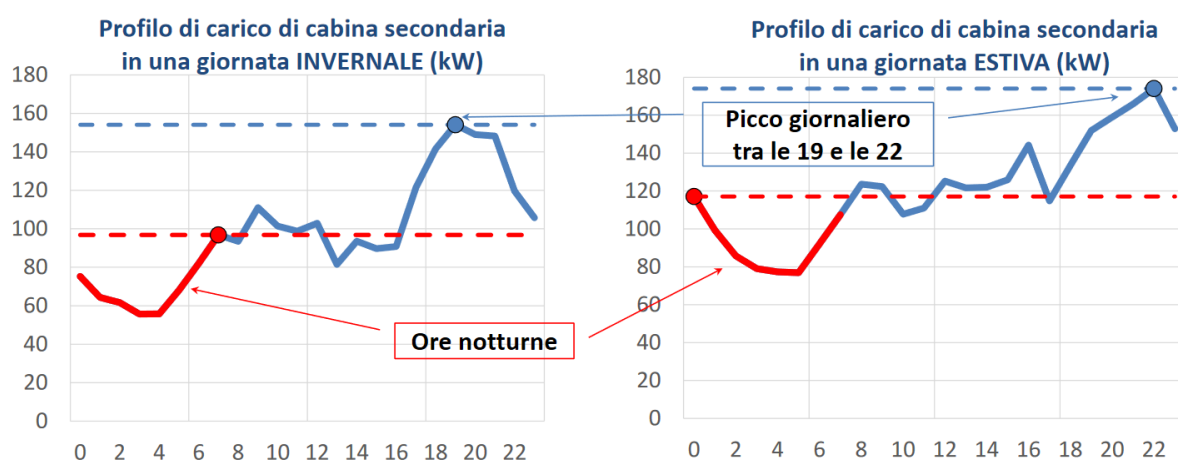


Figura 3.30 – Esempi di cabine secondarie a servizio di due quartieri milanesi, ciascuno con 380-400 abitazioni (Fonte: ARERA [59] su dati RSE [58])

La misura proposta, i cui possibili risultati per l’utente sono proposti nei grafici di Figura 3.31, mira a spostare parte del carico elettrico legato alla ricarica dalla fascia 18-22 alla fascia 23-06, concedendo in quell’intervallo orario maggior potenza disponibile senza costi aggiuntivi. La registrazione di un POD a tale sperimentazione è aperta e gratuita.

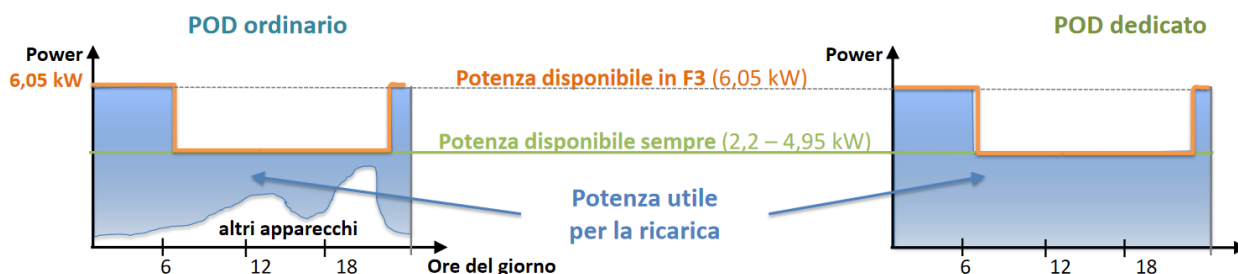
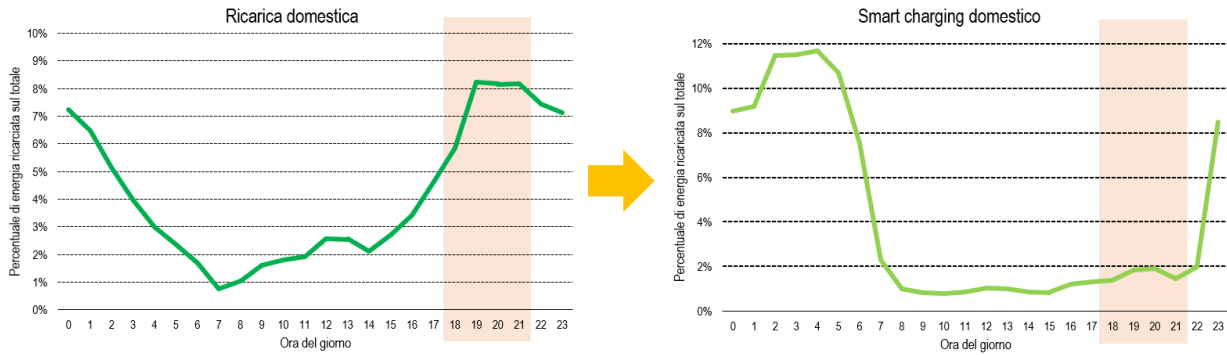


Figura 3.31 – Confronto nella profilazione del carico elettrico legato alla ricarica al 2030; a sinistra viene riportato quello di un punto di prelievo (POD) ordinario, a destra invece nel caso di un POD dedicato [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico]

Il possibile risultato atteso a livello di profilo orario della ricarica domestica può essere esemplificato come nei grafici che seguono (Figura 3.32): come si vede, una netta diminuzione del carico potrebbe avvenire nella

fascia oraria compresa fra le 18 e le 21. Di conseguenza, anche il totale dell'aumento di carico inerente alla ricarica elettrica sarebbe meno gravoso in quella fascia temporale.



*Figura 3.32 – Confronto fra un profilo di ricarica domestico in condizioni normali (sinistra) con un profilo di ricarica intelligente sempre in contesto domestico (destra). (Fonte: elaborazione degli autori su dati di letteratura) [Fonte: Elaborazioni Fondazione Politecnico]*

## Bibliografia

- [1] Istat – 11° Censimento permanente popolazione e abitazioni e dei censimenti dell'industria e servizi, (2011). Web: <https://www.istat.it/it/censimenti/popolazione-e-abitazioni>
- [2] Istat – 9° Censimento industria e servizi, (2011). Web: <https://www.istat.it/it/censimenti-permanenti/censimenti-precedenti/industria-e-servizi/imprese-2011>
- [3] "Dati Cened." Web. <[www.cened.it/dati-cened](http://www.cened.it/dati-cened)>.
- [4] "Open data CURIT." Web. <[www.curit.it/opendata](http://www.curit.it/opendata)>.
- [5] Pozzi M., Spirito G., Fattori F., Dénarié A., Famiglietti J., Motta M. "Synergies between buildings retrofit and district heating. The role of DH in a decarbonized scenario for the city of Milano", Energy Reports, 2021. (in press).
- [6] Perelli B. e Radaelli M. "Analisi critica degli ACE rilasciati da Regione Lombardia." 2014
- [7] Dall'O' Giuliano, Annalisa Galante e Giulia Pasetti. "A Methodology for Evaluating the Potential Energy Savings of Retrofitting Residential Building Stocks" 2012.
- [8] Decreto "Requisiti Minimi", 26 giugno 2015.
- [9] ERA5 hourly data. Web: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>
- [10] DPR 412 - Regolamento Recante Norme Per La Progettazione, L'Installazione, L'Esercizio e La Manutenzione Degli Impianti Termici Degli Edifici Ai Fini Del Contenimento Dei Consumi Di Energia., 26 agosto 1993.
- [11] GSE, "Valutazione del potenziale nazionale e regionale di applicazione della cogenerazione ad alto rendimento e del teleriscaldamento efficiente", 2016.
- [12] Agenzia delle entrate – Osservatorio del mercato immobiliare.  
<https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/web/guest/aree-tematiche/osservatorio-del-mercato-immobiliare-omi>
- [13] Ministero della Transizione Ecologica – Bilancio Gas Naturale. Web <https://dgsaie.mise.gov.it/bilancio-gas-naturale>
- [14] M. Daszykowski, B. Walczak, Density-Based Clustering Methods, Compr. Chemom. 2 (2009) 635–654. doi:10.1016/B978-044452701-1.00067-3.
- [15] AIRU, "Valutazione del potenziale di diffusione del teleriscaldamento efficiente sul territorio nazionale – Focus sui sistemi di nuova generazione con fonti di calore di scarto e rinnovabile", 2020.
- [16] PNIEC – Piano Nazionale Integrato Energia e Clima, gennaio 2020, Web. <https://www.mise.gov.it/index.php/it/198-notizie-stampa/2040668-pniec2030>.
- [17] LTS – Strategia Italiana di Lungo Termine sulla riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra (Long Term Strategy), gennaio 2021, Web. [https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-long-term-strategies\\_en](https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-long-term-strategies_en).
- [18] Simon Pezzutto. "Open Data Set for the EU28". In: *Hotmaps* (2019).
- [19] Eurostat. *Cooling and heating degree days by country - monthly data*. 2021. Web: [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg\\_chdd\\_m&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_chdd_m&lang=en).
- [20] IEA, "The future of cooling – opportunities for energy efficiency air-conditioning", 2018.
- [21] GSE, "Atlaimpianti". Web. <[https://atla.gse.it/atlaimpianti/project/Atlaimpianti\\_Internet.html](https://atla.gse.it/atlaimpianti/project/Atlaimpianti_Internet.html)>.
- [22] ISTAT, "Popolazione residente al 1° gennaio". Web. <[http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCIS\\_POPRES1#](http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCIS_POPRES1#)>.
- [23] Parlamento Europeo, "Nomenclatura comune delle unità territoriali statistiche (NUTS)", Maggio 2021, Web. < <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/99/nomenclatura-comune-delle-unita-territoriali-statistiche-nuts->>.
- [24] EUROSTAT, "Local Administrative Units (LAU)", Web. <<https://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts/local-administrative-units>>.

- [25]ACI – Automobile Club d'Italia, "Autoritratto 2019", Web. <<https://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/autoritratto/autoritratto-2019.html>>.
- [26]ACI – Automobile Club d'Italia, "Note Open Parco Veicoli – Classificazione dei veicoli", Web. <<http://www.opv.aci.it/WEBDMCircolante/noteOPV.html>>.
- [27]Wikipedia, "Standard europei sulle emissioni inquinanti", Web. <[https://it.wikipedia.org/wiki/Standard\\_europei\\_sulle\\_emissioni\\_inquinanti](https://it.wikipedia.org/wiki/Standard_europei_sulle_emissioni_inquinanti)>.
- [28]Strabla G., "La vita residua delle gru – parte 1", Cenpi Formazione s.r.l., Web. <<https://www.cenpiformazione.it/approfondimenti/la-vita-residua-della-gru-parte-1/>>.
- [29]Ministero della Transizione Ecologica, "Consumi petroliferi", Web. <<https://dgsaie.mise.gov.it/consumi-petroliferi>>.
- [30]RFI – Rete Ferroviaria Italiana, "La rete oggi regione per regione – Lombardia", Web. <[https://www.rfi.it/it/rete/la-rete-oggi/La\\_rete\\_oggi\\_regione\\_per\\_regione/lombardia.html](https://www.rfi.it/it/rete/la-rete-oggi/La_rete_oggi_regione_per_regione/lombardia.html)>.
- [31]Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibili, "Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti – Anni 2018-2019", 8 agosto 2020, <<https://www.mit.gov.it/node/13456>>.
- [32]Gestione Governativa Navigazione Laghi Maggiore, di Garda e di Como, "La flotta", Web. <<https://www.navigazionelaghi.it/flotta-como?web=1&wdLOR=cFA28B234-A1BC-449D-92B2-774D2164F057#>>.
- [33]Regione Lombardia, "Matrice Origine/Destinazione Passeggeri 2016", Web. <<https://www.dati.lombardia.it/Mobilit-e-trasporti/Matrice-OD2016-Passeggeri/tezw-ewgk/data>>.
- [34]Commissione Europea, "Legge europea sul clima", 2021, Web. <[https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action/law\\_it](https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action/law_it)>.
- [35]European Environment Agency, "European Aviation Environmental Report 2019", 2019, Web. <[https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr\\_uploaded/219473\\_EASA\\_EAER\\_2019\\_WEB\\_LOW-RES.pdf](https://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/219473_EASA_EAER_2019_WEB_LOW-RES.pdf)>.
- [36]Commissione Europea, "European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions", luglio 2021, Web. <[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_21\\_3541](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_3541)>.
- [37]Parlamento Europeo, Consiglio dell'Unione Europea, "Regolamento (UE) 2019/631 che definisce i livelli di prestazione in materia di emissioni di CO2 delle autovetture nuove e dei veicoli commerciali leggeri nuovi e che abroga i regolamenti (CE) n. 443/2009 e (UE) n. 510/2011", aprile 2019, Web. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631>>.
- [38]Unione Nazionale Rappresentati Autoveicoli Esteri – UNRAE, "L'auto 2020 – Sintesi statistica", luglio 2021, Web. <<http://unrae.it/pubblicazioni/sintesi-statistica/5466/lauto-2020-sintesi-statistica-unrae>>.
- [39]Ministero dello Sviluppo Economico, "Strategia Nazionale Idrogeno - Linee Guida Preliminari", novembre 2020, Web. <[https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/Strategia\\_Nazionale\\_Idrogeno\\_Linee\\_guida\\_preliminari\\_nov20.pdf](https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/Strategia_Nazionale_Idrogeno_Linee_guida_preliminari_nov20.pdf)>.
- [40]NGVA, "Stations map", Web. <<https://www.ngva.eu/stations-map/>>.
- [41]ACI – Automobile Club d'Italia, "Annuari statistici", Web. <<https://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/annuario-statistico.html>>.
- [42]Ferrovie Nord, "Nuovi treni diesel-elettrici, FNM e Stadler firmano Accordo Quadro", novembre 2018, Web. <<https://www.ferrovienord.it/documents/28346/112592/Nuovi+treni+diesel-elettrici%2C+FNM+e+Stadler+firmano+Accordo+Quadro/9ba1aa77-8df0-4eb1-bf1c-ffa6b9af639b>>.
- [43]Trenord, "FNM e Trenord lanciano la prima Hydrogen Valley italiana", novembre 2020, Web. <<https://www.trenord.it/news/trenord-informa/comunicati-stampa/fnm-e-trenord-lanciano-la-prima-hydrogen-valley-italiana/>>.
- [44]ABB, SINTEF, "ABB, SINTEF and Fiskerstrand test fuel cells for the world's first conversion of a hydrogen hybrid ferry", aprile 2019, Web. <<https://new.abb.com/news/detail/18654/abb-sintef-and-fiskerstrand-test-fuel-cells-for-the-worlds-first-conversion-of-a-hydrogen-hybrid-ferry>>.

- [45] Gestione Governativa Navigazione Laghi , “Topazio, la gemma dei laghi”, aprile 2021, Web. <https://www.navigazioneilaghi.it/area-stampa>
- [46] British Airways, “British Airways partners with Zeroavia to speed up the switch to hydrogen-powered passenger aircraft”, dicembre 2020, Web. <https://mediacentre.britishairways.com/news/12122020/british-airways-partners-with-zeroavia-to-speed-up-the-switch-to-hydrogen-powered-passenger-aircraft>
- [47] AIRBUS, “ZEROe - Towards the world’s first zero-emission commercial aircraft”, Web. <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html>
- [48] Commissione Europea, “Regulation of the european parliament and of the council - on ensuring a level playing field for sustainable air transport”, luglio 2021, Web. <https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/refuelev aviation - sustainable aviation fuels.pdf>
- [49] ARERA, “Criteri per l’aggiornamento infra-periodo della regolazione tariffaria relativa ai servizi di distribuzione e misura dell’energia elettrica”, luglio 2019, Web. <https://www.arera.it/allegati/docs/19/318-19.pdf>.
- [50] MOTUS-E, Strategy&, “Il futuro della mobilità elettrica: l’infrastruttura di ricarica in Italia @2030”, ottobre 2020, Web. <https://www.motus-e.org/wp-content/uploads/2020/10/Il-futuro-della-mobilit%C3%A0-elettrica-linfrastruttura-di-ricarica-in-Italia-2030-2.pdf>
- [51] ARERA - Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente, “Scheda tecnica - Prezzi dei servizi di ricarica per veicoli elettrici e sistema tariffario dell’energia elettrica”, luglio 2018, Web. [https://www.arera.it/allegati/elettricit%C3%A0/schede/TariffePrezziRicariche\\_st.pdf](https://www.arera.it/allegati/elettricit%C3%A0/schede/TariffePrezziRicariche_st.pdf).
- [52] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Piano nazionale infrastrutturale per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica (PNIRE), Web. <https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNire.pdf>
- [53] Ecomotori.net, “Mappa distributori Italia”, Web. <https://www.ecomotori.net/distributori/Ing/Italy>
- [54] Regione Lombardia, “Impianti di erogazione metano”, Web. <https://www.dati.lombardia.it/Commercio/Impianti-di-erogazione-metano/5n8b-t34h/data>
- [55] “Piano Nazionale Ripresa e Resilienza”, 2021, Web. [https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR\\_0.pdf](https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR_0.pdf).
- [56] Commissione Europea, “Regulation of the european parliament and of the council on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council”, luglio 2021, Web. [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/revision\\_of\\_the\\_directive\\_on\\_deployment\\_of\\_the\\_alternative\\_fuels\\_infrastructure\\_with\\_annex\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/revision_of_the_directive_on_deployment_of_the_alternative_fuels_infrastructure_with_annex_0.pdf).
- [57] Commissione Europea, “Trans-European Transport Network (TEN-T)”, Web. [https://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/ten-t\\_en](https://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/ten-t_en).
- [58] RSE – Ricerca sul Sistema Energetico, “Dossier 11/2019 - auto elettrica e de-carbonizzazione: facciamo chiarezza”, novembre 2019, Web. <https://dossierse.it/11-2019-auto-elettrica-e-de-carbonizzazione-facciamo-chiarezza/>
- [59] ARERA - Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente, “Sperimentazione finalizzata a facilitare la ricarica dei veicoli elettrici nelle fasce orarie notturne e festive”, Web. [https://www.arera.it/it/elettricit%C3%A0/veicoli\\_541-20.htm#](https://www.arera.it/it/elettricit%C3%A0/veicoli_541-20.htm#)