

Ricerca di Sistema elettrico



Diffusione delle PdC: valutazione dell'impatto
dell'utilizzo estensivo delle pompe di calore sul
paesaggio sonoro urbano (LA4.17)

G. Salvadori, F. Leccese, S.A. Boemi

Diffusione delle PdC: valutazione dell'impatto dell'utilizzo estensivo delle pompe di calore sul paesaggio sonoro urbano

LA4.17: Diffusione delle PdC: valutazione dell'impatto dell'utilizzo estensivo delle pompe di calore sul paesaggio sonoro urbano

Autori: G. Salvadori, F. Leccese, S.A. Boemi (Università di Pisa)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.7 – Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 4:17

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Raniero Trinchieri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Giacomo Salvadori, Università di Pisa

Mese inizio previsto: marzo 2023

Mese inizio effettivo: marzo 2023

Mese fine previsto: dicembre 2024

Mese fine effettivo: dicembre 2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: valutazione dell'impatto sul paesaggio sonoro urbano dell'utilizzo estensivo di pompe di calore

Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte l'Ing. Leonardo Andrea Bisogno Bernardini

Indice

1	Risultati attesi	6
2	Risultati ottenuti.....	7
3	Prodotti attesi	8
4	Prodotti sviluppati	9
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	10
6	Sintesi delle attività svolte	11
7	Dettaglio delle attività svolte.....	12
7.1	Sub-attività 1: realizzazione di un database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale	12
7.1.1	Finalità	12
7.1.2	Metodologia operativa	12
7.1.3	Risultati.....	12
7.1.4	Commenti.....	16
7.2	Sub-attività 2: analisi numerica dell'impatto di un uso estensivo delle pompe di calore sul paesaggio sonoro urbano	18
7.2.1	Finalità	18
7.2.2	Metodologia operativa	18
7.2.3	Risultati.....	23
7.2.4	Commenti.....	35
7.3	Sub-attività 3: sviluppo e validazione di un modello analitico semplificato per la previsione dei livelli di rumore prodotti da molteplici unità esterne di pompe di calore nei reticoli urbani.....	37
7.3.1	Finalità	37
7.3.2	Metodologia operativa	37
7.3.3	Risultati.....	38
7.3.4	Commenti.....	43
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	45
9	Pubblicazioni scientifiche	46
10	Eventi di disseminazione	47

Indice delle Figure

Figura 1 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla A alla J), dal quale possono essere osservate le caratteristiche censite per le differenti macchine.....	13
Figura 2 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla K alla R, le colonne A,B,C rimangono per l'identificazione delle macchine).....	13
Figura 3 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla S alla V, le colonne A,B,C rimangono per l'identificazione delle macchine).....	13
Figura 4 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla Y alla AE, le colonne A,B,C rimangono per l'identificazione delle macchine).....	14
Figura 5 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla AF alla AL, le colonne A,B,C rimangono per l'identificazione delle macchine).	14
Figura 6 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla AM alla AS, le colonne A,B,C rimangono per l'identificazione delle macchine).	14
Figura 7 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla AT alla colonna finale AZ, le colonne A,B,C rimangono per l'identificazione delle macchine).	15
Figura 8 – Distribuzione delle unità esterne di pompe di calore censite, per tipologia di sorgente termica utilizzata e per tipologia di fluido refrigerante impiegato.....	15
Figura 9 – Distribuzione delle unità esterne di pompe di calore censite, per tipologia di sorgente termica utilizzata e per tipologia di fluido refrigerante impiegato.....	15
Figura 10 – Distribuzione delle unità esterne di pompe di calore censite, per intervalli di potenza frigorifera nominale (è stata scelta la potenza frigorifera nominale, perché generalmente più bassa della potenza termica nominale a parità di macchina, condizioni nominali: in accordo a standard EN 14511).....	16
Figura 11 – Andamento del livello di potenza sonora in funzione della potenza frigorifera nominale, ottenuto per le unità esterne di pompe di calore censite del tipo Aria-Acqua.....	16
Figura 12 – Andamento del livello di potenza sonora in funzione della potenza frigorifera nominale, ottenuto per le unità esterne di pompe di calore censite del tipo Aria-Aria.	17
Figura 13 – Andamento del livello di potenza sonora in funzione della potenza frigorifera nominale, ottenuto per le unità esterne di pompe di calore censite che operano con fluido R410A.	17
Figura 14 – Andamento del livello di potenza sonora in funzione della potenza frigorifera nominale, ottenuto per le unità esterne di pompe di calore censite che operano con fluido R32.	17
Figura 15 – Immagini del caso di studio ID 1: A) vista aerea, B) Rappresentazione 2D e C) rappresentazione 3D del modello.	20

Figura 16 – Immagini del caso di studio ID 2: A) vista aerea, B) Rappresentazione 2D e C) rappresentazione 3D del modello.	20
Figura 17 – Immagini del caso di studio ID 3: A) vista aerea, B) Rappresentazione 2D e C) rappresentazione 3D del modello.	21
Figura 18 – Immagini del caso di studio ID 4: A) vista aerea, B) Rappresentazione 2D e C) rappresentazione 3D del modello.	22
Figura 19 – Output delle simulazioni per i 6 scenari del caso di studio ID 1: planimetrie con indicazioni delle sorgenti sonore (sinistra), mappe in falsi colori dei livelli di rumorosità nel reticolo urbano (destra).....	25
Figura 20 – Output delle simulazioni per i 6 scenari del caso di studio ID 2: planimetrie con indicazioni delle sorgenti sonore (sinistra), mappe in falsi colori dei livelli di rumorosità nel reticolo urbano (destra).....	27
Figura 21 – Output delle simulazioni per i 6 scenari del caso di studio ID 3: planimetrie con indicazioni delle sorgenti sonore (sinistra), mappe in falsi colori dei livelli di rumorosità nel reticolo urbano (destra).....	30
Figura 22 – Output delle simulazioni per i 6 scenari del caso di studio ID 4: planimetrie con indicazioni delle sorgenti sonore (sinistra), mappe in falsi colori dei livelli di rumorosità nel reticolo urbano (destra).....	33
Figura 23 – Posizionamento delle PdC, considerate funzionanti, nel reticolo urbano: esempio del caso di studio ID 2.	34
Figura 24 – Esempio di schematizzazione del canyon urbano e sua rappresentazione tramite modello implementato in Matlab (con S sono indicate le diverse sorgenti sonore, cioè le unità esterne di pompe di calore).	38
Figura 25 – Identificazione in pianta (output simulazioni numeriche a sinistra, immagine aerea a destra) dei canyon urbani utilizzati per la validazione del modello semplificato.	39
Figura 26 – Vista prospettica (sinistra) e rappresentazione nel modello semplificato delle 10 combinazioni utilizzate per la validazione del modello semplificato.....	43
Figura 27 – Risultati del modello analitico: livello di pressione sonora in funzione della larghezza del canyon urbano per differenti taglie di PdC (le PdC presenti sono complessivamente 12, 6 sul confine destro e 6 sul confine sinistro, installate con passo in altezza di 3.5 m a partire da 0.1 m dalla superficie orizzontale inferiore del canyon).	44
Figura 28 – Risultati del modello analitico: livello di pressione sonora in funzione della taglia delle PdC per differenti larghezze del canyon urbano (le PdC presenti sono complessivamente 12, 6 sul confine destro e 6 sul confine sinistro, installate con passo in altezza di 3.5 m a partire da 0.1 m dalla superficie orizzontale inferiore del canyon).	44

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Identificazione e caratteristiche essenziali dei casi di studio modellati.....	19
Tabella 2 – Definizione delle caratteristiche delle 6 configurazioni (da A.I a B.II) utilizzate per le simulazioni nei 4 casi di studio.	22

Tabella 3 – Caratteristiche dell'emissione sonora delle PdC in funzione della taglia (potenza termica nominale) ottenute dalla sub-attività 1 ed utilizzate nelle simulazioni (L_w = livello di potenza sonora).	22
Tabella 4 – Numero di unità abitative e numero di pompe di calore attive (di differenti taglie) considerate nei vari scenari analizzati.	33
Tabella 5 – Percentuale dell'area totale del reticolo urbano, per la quale si rileva un determinato livello di rumorosità (valutato con il livello di pressione sonora L_p in dB), complessivamente generato delle unità esterne delle pompe di calore: caso di studio ID 1.	35
Tabella 6 – Percentuale dell'area totale del reticolo urbano, per la quale si rileva un determinato livello di rumorosità (valutato con il livello di pressione sonora L_p in dB), complessivamente generato delle unità esterne delle pompe di calore: caso di studio ID 2.	35
Tabella 7 – Percentuale dell'area totale del reticolo urbano, per la quale si rileva un determinato livello di rumorosità (valutato con il livello di pressione sonora L_p in dB), complessivamente generato delle unità esterne delle pompe di calore: caso di studio ID 3.	36
Tabella 8 – Percentuale dell'area totale del reticolo urbano, per la quale si rileva un determinato livello di rumorosità (valutato con il livello di pressione sonora L_p in dB), complessivamente generato delle unità esterne delle pompe di calore: caso di studio ID 4.	36
Tabella 9 – Risultati della validazione per i 10 test effettuati: confronto tra valori di pressione sonora al ricettore previsti dall'analisi numerica e i valori ottenuti dal modello analitico semplificato.	43

1 Risultati attesi

I risultati attesi, descritti nel presente report tecnico, si riferiscono all'attività di ricerca denominata "Valutazione dell'impatto sul paesaggio sonoro urbano dell'utilizzo estensivo di pompe di calore".

L'attività è inserita nel Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024, per quanto attiene l'Obiettivo "1. Tecnologie, tema di ricerca "1.7 Tecnologie per la penetrazione del vettore elettrico negli usi finali"; nello specifico, essa fa parte del Work package "4: Pompe di calore e Climatizzazione Sostenibile" e rappresenta la linea di attività 4.17 del progetto 1.7.

In conformità a quanto stabilito dall'accordo di collaborazione siglato tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (D.E.S.Te.C.) dell'Università di Pisa in data 12/01/2024, la linea di attività 4.17 è suddivisa in 3 sub-attività, i cui risultati attesi sono di seguito riepilogati.

Dalla prima sub-attività è previsto che sia realizzato un database delle emissioni sonore delle pompe di calore, con particolare riferimento alle unità esterne di macchine dedicate alla climatizzazione invernale/estiva ed alla produzione di acqua calda sanitaria per gli edifici.

Dalla seconda sub-attività è previsto che siano ottenuti, e resi disponibili anche per la successiva sub-attività, i risultati di una campagna di simulazioni avanzate della propagazione del rumore in ambiente urbano. In particolare, i risultati delle simulazioni saranno utili per individuare configurazioni di installazione delle pompe di calore con impatti critici sul paesaggio sonoro urbano.

Dalla terza sub-attività è previsto che siano ottenuti i risultati di valutazione dell'impatto delle pompe di calore sul paesaggio sonoro urbano, effettuate con un modello di calcolo analitico di tipo semplificato. Tale strumento, validato per confronto con i risultati delle simulazioni avanzate, potrà essere utile nelle prime fasi progettuali per la scelta della tipologia e configurazione di installazione delle pompe di calore in base all'ambiente urbano considerato, ai fini di una minimizzazione degli impatti acustici.

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti sono stati in linea con quelli attesi e hanno riguardato le tre sub-attività descritte nella precedente sezione.

In particolare, la prima sub-attività si è concretizzata con un'accurata raccolta di dati ed un'analisi delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore commerciali; con particolare riferimento alle unità esterne di pompe di calore a compressione di vapore azionate elettricamente, dedicate alla climatizzazione invernale/estiva ed alla produzione di acqua calda sanitaria degli edifici residenziali, cioè di taglia medio-piccola (0.3-100 kW di potenza elettrica di alimentazione). La raccolta di dati è stata effettuata esaminando la documentazione tecnica messa a disposizione dai principali produttori di pompe di calore disponibili sul territorio nazionale. I dati delle emissioni sonore sono stati raccolti in termini di livelli sonori globali e, ove resi disponibili, in termini di distribuzione spettrale in bande d'ottava. Con tutti i dati raccolti ed analizzati è stato realizzato un database delle emissioni sonore delle pompe di calore, implementato in ambiente "Excel", che potrà essere reso fruibile per indagini tecnico-scientifiche sugli impatti acustici di queste macchine.

La seconda sub-attività si è concretizzata nella la valutazione numerica dell'impatto acustico dovuto all'uso estensivo di pompe di calore in ambiente urbano. La valutazione è stata effettuata sfruttando uno specifico software di simulazione avanzata della propagazione del rumore. La valutazione è stata condotta realizzando modelli dei reticoli urbani (porzioni dei centri cittadini) per 4 differenti casi di studio, caratterizzati da significative differenze geometriche dei reticoli stessi. In questi modelli sono state disposte le pompe di calore (sorgenti rumorose, le cui emissioni saranno derivate dalla precedente sub-attività) e sono stati simulati gli impatti acustici prodotti sul paesaggio sonoro. Le simulazioni sono state ripetute per numero crescente di pompe di calore installate per unità di volume urbano, per diverse geometrie di disposizione delle pompe di calore nel reticolo urbano e diverse categorie nelle quali sono state raggruppate le pompe di calore.

La terza sub-attività si è concretizzata nella valutazione analitica dell'impatto acustico prodotto dall'uso estensivo di pompe di calore. Per effettuare tale valutazione è stato realizzato un modello di calcolo semplificato, in grado di riprodurre l'impatto delle emissioni rumorose delle pompe di calore sul paesaggio sonoro, attraverso semplici relazioni analitiche, valide per reticoli urbani di dimensioni fissate. Il modello semplificato è stato validato con confronto tra i risultati ottenuti attraverso il modello stesso e quelli ottenuti dalle simulazioni della precedente sub-attività. Questo strumento potrà consentire, nelle fasi di progettazione preliminare relative ad interventi massivi di installazione di pompe di calore in ambiente urbano, di valutare i livelli di rumorosità complessivi ed eventualmente identificare le configurazioni più critiche per il loro impatto sul paesaggio sonoro.

3 Prodotti attesi

In conformità a quanto stabilito dall'accordo di collaborazione siglato tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (D.E.S.Te.C.) dell'Università di Pisa in data 12/01/2024, per la presente linea di attività (4.17) è prevista la stesura di un report tecnico completo con la descrizione delle attività di ricerca svolte e dei risultati ottenuti. Inoltre, è previsto che sia reso disponibile, in formato elettronico, un database delle emissioni rumorose delle pompe di calore, ottenuto dall'indagine condotta nella prima sub-attività di cui è composta la linea di attività.

4 Prodotti sviluppati

I prodotti ottenuti sono stati assolutamente in linea con quelli attesi.

Il principale prodotto è il presente rapporto tecnico, descrittivo delle 3 sub-attività, e un database delle emissioni rumorose delle pompe di calore, ottenuto dall'indagine condotta nella prima sub-attività, reso disponibile in formato elettronico (formato xlsx). Tale database è collocato su di web-repository pubblico, raggiungibile dal seguente link:

<https://data.mendeley.com/datasets/t5tvcym7m7/1>

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

L'attività è stata completata nella sua interezza, pertanto non si segnalano scostamenti tecnici significativi in relazione a quanto preventivato.

Il preventivo di spesa è stato rispettato, pertanto non si segnalano scostamenti economici significativi in relazione a quanto preventivato.

6 Sintesi delle attività svolte

In relazione ai risultati attesi, sono state svolte attività di ricerca inerenti 3 sub-attività.

- 1: ricerca, archiviazione, analisi critica dei dati e creazione di un database su supporto informatico, delle emissioni sonore di unità esterne di pompe di calore (PdC) impiegate nell'edilizia residenziale, contenente oltre 1000 modelli.
- 2: campagna di simulazioni con software dedicato alla propagazione del rumore in esterno, finalizzata alla valutazione dell'impatto di un uso estensivo delle PdC sul paesaggio sonoro, con modellazione di 4 differenti reticoli urbani, simulazione e discussione dei risultati di 24 differenti scenari, caratterizzati da varie configurazioni di installazione delle PdC.
- 3: sviluppo e validazione (per confronto con i risultati ottenuti nella sub-attività 2) di un modello semplificato, che, tramite relazioni analitiche di facile utilizzo, consente una stima previsionale dell'impatto della presenza e disposizione delle PdC sul paesaggio sonoro urbano.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Sub-attività 1: realizzazione di un database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale

7.1.1 Finalità

Al fine di analizzare l'impatto di un uso estensivo delle pompe di calore sul paesaggio sonoro urbano, è necessario conoscere le caratteristiche di emissione sonora delle unità esterne delle pompe di calore. Per questo motivo è stato effettuato un censimento dei dati di emissione sonora delle pompe di calore. I dati raccolti sono stati archiviati, organizzati e analizzati criticamente, creando un database su supporto elettronico pubblicamente accessibile.

7.1.2 Metodologia operativa

I dati di emissione sonora sono stati estratti da documenti pubblici (cataloghi e schede tecniche) messi a disposizione dai rispettivi produttori. La raccolta dei dati si è focalizzata su unità esterne di pompe di calore dedicate alla climatizzazione e/o alla produzione di acqua calda sanitaria, di comune impiego nell'edilizia residenziale e commercializzate in Italia. In particolare, si è optato per analizzare le caratteristiche delle unità esterne di sistemi a maggiore diffusione nel residenziale, cioè con potenza nominale medio-piccola, utilizzando come soglia massima il valore di 100 kW per la potenza frigorifera nominale dichiarata dal produttore. Le tecnologie maggiormente presenti nel database fanno riferimento, dunque, a unità esterne di pompe di calore aria-acqua, aria-aria del tipo monosplit, multisplit e sistemi VRF/VRV. Ad ogni modello censito è stato associato un numero identificativo, indicate le principali caratteristiche operative e specificate le caratteristiche di emissione sonora, in termini di livello globale di potenza sonora emessa o, alternativamente, livello globale di pressione sonora ad 1 m di distanza dalla macchina. Ove dichiarata dal produttore, è stata aggiunta anche la distribuzione in frequenza (per frequenze centrali di banda d'ottava) del rumore emesso dalla macchina (in termini di potenza o pressione sonora @1m). Sono state collezionate complessivamente oltre 1300 configurazioni di unità esterne di pompe di calore, relative a oltre 800 differenti modelli (alcuni modelli compaiono più volte, perché presentano emissioni sonore diverse in funzione della configurazione operativa della macchina scelta).

7.1.3 Risultati

Come risultato essenziale della sub-attività, è stato creato un database su supporto elettronico (formato.xlsx) contenente tutti i dati raccolti e archiviati. Il database segue una precisa organizzazione, per facilitarne la consultazione, ed è collocato su un web-repository pubblicamente accessibile e raggiungibile dal seguente indirizzo:

<https://data.mendeley.com/datasets/t5tvcym7m7/1>

In dettaglio, nelle seguenti Figure da 1 a 7 si mostra il database creato, per le sue prime righe (ciascuna corrispondente ad una differente configurazione di unità esterna di pompe di calore), le altre righe sono compilate in maniera analoga. Nelle Figure da 8 a 10 sono riportate elementi statistici essenziali per la descrizione delle macchine censite.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	ID	Produttore	Modello unità esterna	Specifiche	Destinazione d'uso	Tipo	Categoria	Potenza elettrica nominale assorbita a caldo [kW]	Potenza elettrica nominale assorbita a freddo [kW]	Potenza termica nominale [kW]
1	1	AERMEC	ANKIO20	(Standard) - (230V - 50 Hz/400V 3N - 50 Hz) Prestazioni in raffreddamento	Climatizzazione e A.C.S.	ARIA-ACQUA	Pompa di calore reversibile	1.9	2	6.2
2	1	AERMEC	ANKIO20	(CON POMPA INVERTER) - (230V - 50 Hz/400V 3N - 50 Hz) Prestazioni in	Climatizzazione e A.C.S.	ARIA-ACQUA	Pompa di calore reversibile	1.9	2	6.1
3	2	AERMEC	ANKIO25	(Standard) - (230V - 50 Hz/400V 3N - 50 Hz) Prestazioni in raffreddamento	Climatizzazione e A.C.S.	ARIA-ACQUA	Pompa di calore reversibile	2.4	2.6	7.8
4	2	AERMEC	ANKIO25	(CON POMPA INVERTER) - (230V - 50 Hz/400V 3N - 50 Hz) Prestazioni in	Climatizzazione e A.C.S.	ARIA-ACQUA	Pompa di calore reversibile	2.4	2.6	7.7
5	3	AERMEC	ANKIO40	(Standard) - (230V - 50 Hz/400V 3N - 50 Hz) Prestazioni in raffreddamento	Climatizzazione e A.C.S.	ARIA-ACQUA	Pompa di calore reversibile	3	3.2	9.3
6	3	AERMEC	ANKIO40	(CON POMPA INVERTER) - (230V - 50 Hz/400V 3N - 50 Hz) Prestazioni in	Climatizzazione e A.C.S.	ARIA-ACQUA	Pompa di calore reversibile	3	3.1	9.2
7	4	AERMEC	ANKIO45	(Standard) - (230V - 50 Hz/400V 3N - 50 Hz) Prestazioni in raffreddamento	Climatizzazione e A.C.S.	ARIA-ACQUA	Pompa di calore reversibile	4.1	4.3	12.3
8	4	AERMEC	ANKIO45	(CON POMPA INVERTER) - (230V - 50 Hz/400V 3N - 50 Hz) Prestazioni in	Climatizzazione e A.C.S.	ARIA-ACQUA	Pompa di calore reversibile	4	4.2	12.2
9	5	AERMEC	ANKIO70	(Standard) - (230V - 50 Hz/400V 3N - 50 Hz) Prestazioni in raffreddamento	Climatizzazione e A.C.S.	ARIA-ACQUA	Pompa di calore reversibile	4.8	4.8	15.3
10										

Figura 1 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla A alla J), dal quale possono essere osservate le caratteristiche censite per le differenti macchine.

	A	B	C	K	L	M	N	O	P	Q	R
	ID	Produttore	Modello unità esterna	Potenza frigorifera nominale [kW]	Fluido refrigerante	Compressore	Numero compressori	COP	SCOP	EER	SEER
1	1	AERMEC	ANKIO20	5.8	R 410 A	ROTARY DC INVERTER	1	3.23		2.93	
2	1	AERMEC	ANKIO20	5.9	R 410 A	ROTARY DC INVERTER	1	3.23		3	
3	2	AERMEC	ANKIO25	7.3	R 410 A	ROTARY DC INVERTER	1	3.18		2.75	
4	2	AERMEC	ANKIO25	7.4	R 410 A	ROTARY DC INVERTER	1	3.19	3.83	2.82	4.25
5	3	AERMEC	ANKIO40	9.4	R 410 A	ROTARY DC INVERTER	1	3.06	3.4	2.94	3.76
6	3	AERMEC	ANKIO40	9.5	R 410 A	ROTARY DC INVERTER	1	3.07	3.6	3.01	4.38
7	4	AERMEC	ANKIO45	11.7	R 410 A	ROTARY DC INVERTER	1	3.01	3.2	2.75	3.77
8	4	AERMEC	ANKIO45	11.8	R 410 A	ROTARY DC INVERTER	1	3.02	3.35	2.81	4.37
9	5	AERMEC	ANKIO70	13.7	R 410 A	SCROLL	1	3.18	3.5	2.82	3.49
10											

Figura 2 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla K alla R, le colonne A,B,C rimangono per l'identificazione delle macchine).

	A	B	C	S	T	U	V
	ID	Produttore	Modello unità esterna	LIVELLO POT. SONORA. (raffr.) [dB(A)]	LIVELLO POT. SONORA. (risc.) [dB(A)]	LIVELLO PRES. SONORA. (raffr.) [dB(A)]	LIVELLO PRES. SONORA. (risc.) [dB(A)]
1	1	AERMEC	ANKIO20	64	65	49.4	50.4
2	1	AERMEC	ANKIO20	64	65.00	49.4	50.4
3	2	AERMEC	ANKIO25	65.4	68.6	50.8	54
4	2	AERMEC	ANKIO25	65.4	68.60	50.8	54
5	3	AERMEC	ANKIO40	66.7	69.80	51.5	54.5
6	3	AERMEC	ANKIO40	66.7	69.80	51.5	54.5
7	4	AERMEC	ANKIO45	67.7	70.00	52.4	54.7
8	4	AERMEC	ANKIO45	67.7	70.00	52.4	54.7
9	5	AERMEC	ANKIO70	67.7	67.70	52.3	52.3
10							

Figura 3 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla S alla V, le colonne A,B,C rimangono per l'identificazione delle macchine).

	A	B	C	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
ID	Produttore	Modello unità esterna		Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RISCALDAMENTO] [dB][A] 125 Hz	Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RISCALDAMENTO] [dB][A] 250 Hz	Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RISCALDAMENTO] [dB][A] 500 Hz	Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RISCALDAMENTO] [dB][A] 1000 Hz	Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RISCALDAMENTO] [dB][A] 2000 Hz	Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RISCALDAMENTO] [dB][A] 4000 Hz	Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RISCALDAMENTO] [dB][A] 8000 Hz
1	AERMEC	ANKIO20								
2	AERMEC	ANKIO20								
3	AERMEC	ANKIO25								
4	AERMEC	ANKIO25								
5	AERMEC	ANKIO40								
6	AERMEC	ANKIO40								
7	AERMEC	ANKIO45								
8	AERMEC	ANKIO45								
9	AERMEC	ANKIO70								
10	AERMEC	ANKIO70								

Figura 4 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla Y alla AE, le colonne A,B,C rimangono per l'identificazione delle macchine).

	A	B	C	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL
ID	Produttore	Modello unità esterna		Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RAFFREDDAMENTO] [dB][A] 125 Hz	Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RAFFREDDAMENTO] [dB][A] 250 Hz	Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RAFFREDDAMENTO] [dB][A] 500 Hz	Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RAFFREDDAMENTO] [dB][A] 1000 Hz	Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RAFFREDDAMENTO] [dB][A] 2000 Hz	Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RAFFREDDAMENTO] [dB][A] 4000 Hz	Pressione sonora per freq. cent. di banda (1 m.) [RAFFREDDAMENTO] [dB][A] 8000 Hz
1	AERMEC	ANKIO20								
2	AERMEC	ANKIO20								
3	AERMEC	ANKIO25								
4	AERMEC	ANKIO25								
5	AERMEC	ANKIO40								
6	AERMEC	ANKIO40								
7	AERMEC	ANKIO45								
8	AERMEC	ANKIO45								
9	AERMEC	ANKIO70								
10	AERMEC	ANKIO70								

Figura 5 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla AF alla AL, le colonne A,B,C rimangono per l'identificazione delle macchine).

	A	B	C	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS
ID	Produttore	Modello unità esterna		Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RISCALDAMENTO] [dB] 125 Hz	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RISCALDAMENTO] [dB] 250 Hz	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RISCALDAMENTO] [dB] 500 Hz	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RISCALDAMENTO] [dB] 1000 Hz	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RISCALDAMENTO] [dB] 2000 Hz	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RISCALDAMENTO] [dB] 4000 Hz	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RISCALDAMENTO] [dB] 8000 Hz
1	AERMEC	ANKIO20		57.4	60.5	55.8	54.2	51.9	46.7	34.4
2	AERMEC	ANKIO20		57.4	60.5	55.8	54.2	51.9	46.7	34.4
3	AERMEC	ANKIO25		57.5	61.8	57.5	55	56.1	50	37
4	AERMEC	ANKIO25		57.5	61.8	57.5	55	56.1		
5	AERMEC	ANKIO40		52.5	58.8	61	61.7	59.4		
6	AERMEC	ANKIO40		52.5	58.8	61	61.7	59.4		
7	AERMEC	ANKIO45		56.3	59.7	61.8	62.5	60.1		
8	AERMEC	ANKIO45		56.3	59.7	61.8	62.5	60.1		
9	AERMEC	ANKIO70		53.9	60.2	62.1	62.2	60.6		
10	AERMEC	ANKIO70		53.9	60.2	62.1	62.2	60.6		

Figura 6 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla AM alla AS, le colonne A,B,C rimangono per l'identificazione delle macchine).

	A	B	C	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ
	ID	Produttore	Modello unità esterna	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RAFFREDDAMENTO] [dB] 125 Hz	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RAFFREDDAMENTO] [dB] 250 Hz	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RAFFREDDAMENTO] [dB] 500 Hz	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RAFFREDDAMENTO] [dB] 1000 Hz	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RAFFREDDAMENTO] [dB] 2000 Hz	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RAFFREDDAMENTO] [dB] 4000 Hz	Livello potenza sonora per freq. cent. di banda [RAFFREDDAMENTO] [dB] 8000 Hz
1		AERMEC	ANKI020	57.4	60.5	55.8	54.2	51.9	46.7	34.4
2		AERMEC	ANKI020	57.4	60.5	55.8	54.2	51.9	46.7	34.4
3		AERMEC	ANKI025	57.5	61.8	57.5	55	56	50	37.1
4		AERMEC	ANKI025	57.5	61.8	57.5	55	56.1		
5		AERMEC	ANKI040	52.5	58.8	61	61.7	59.4		
6		AERMEC	ANKI040	52.5	58.8	61	61.7	59.4		
7		AERMEC	ANKI045	56.3	59.7	61.8	62.5	60.1		
8		AERMEC	ANKI045	56.3	59.7	61.8	62.5	60.1		
9		AERMEC	ANKI070	53.9	60.2	62.1	62.2	60.6		
10		AERMEC	ANKI070	53.9	60.2	62.1	62.2	60.6		

Figura 7 – Estratto del database delle emissioni sonore delle unità esterne di pompe di calore di comune impiego nell'edilizia residenziale (colonne dalla AT alla colonna finale AZ, le colonne A,B,C rimangono per l'identificazione delle macchine).

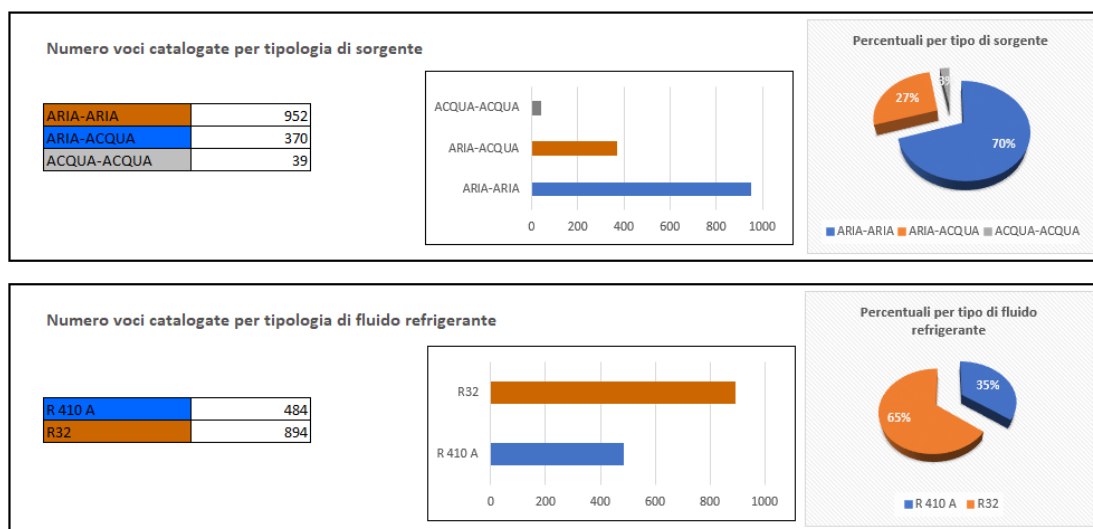


Figura 8 – Distribuzione delle unità esterne di pompe di calore censite, per tipologia di sorgente termica utilizzata e per tipologia di fluido refrigerante impiegato.

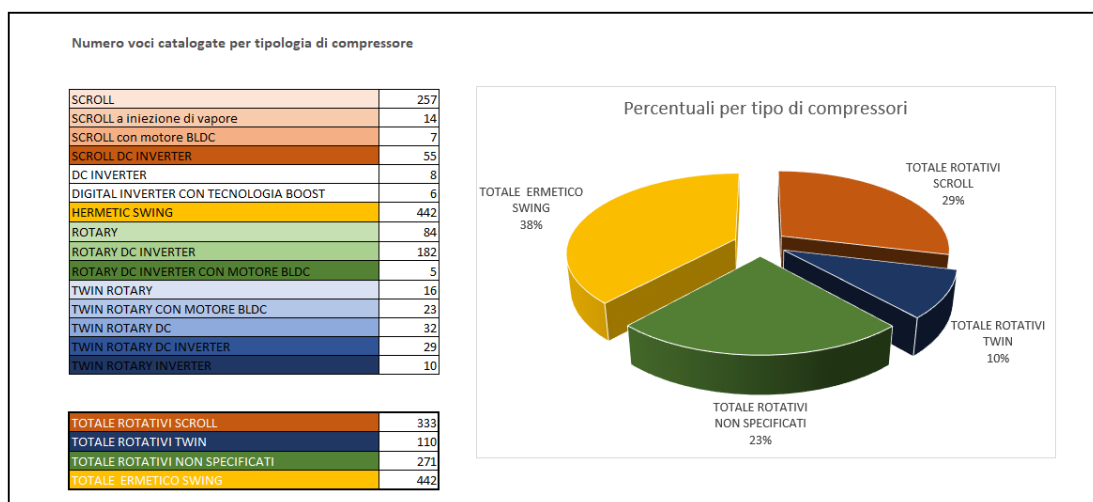


Figura 9 – Distribuzione delle unità esterne di pompe di calore censite, per tipologia di sorgente termica utilizzata e per tipologia di fluido refrigerante impiegato.

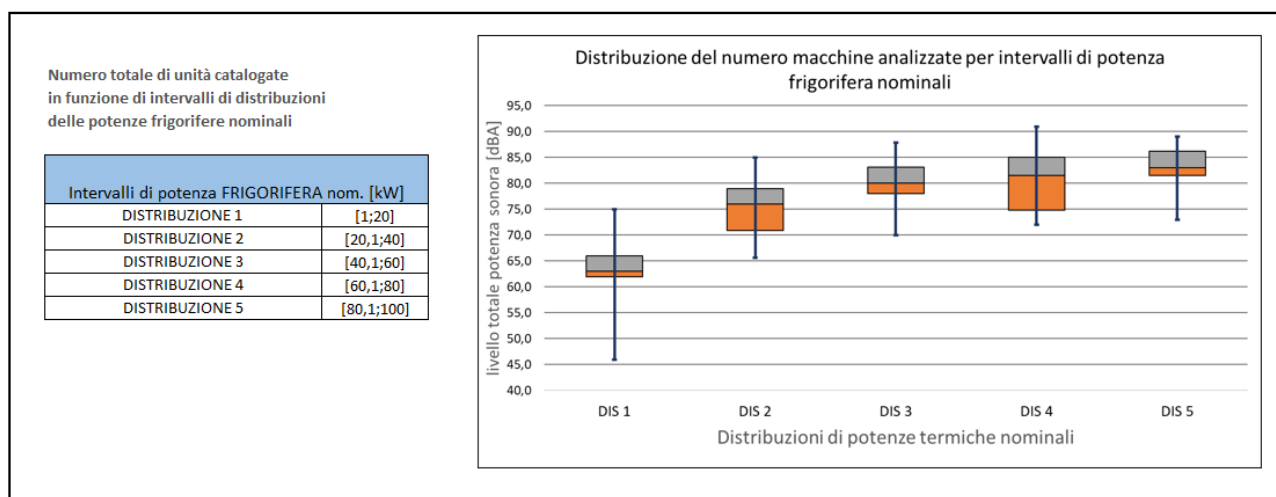


Figura 10 – Distribuzione delle unità esterne di pompe di calore censite, per intervalli di potenza frigorifera nominale (è stata scelta la potenza frigorifera nominale, perché generalmente più bassa della potenza termica nominale a parità di macchina, condizioni nominali: in accordo a standard EN 14511).

7.1.4 Commenti

I dati, raccolti e resi disponibili nel database, possono essere di grande utilità come elementi di input in processi di valutazione (sia numerici che analitici) degli impatti acustici generati dall'installazione di unità esterne di pompe di calore sul paesaggio sonoro urbano. Tali dati possono essere utilizzati sia alla scala dell'edificio, per la scelta dei posizionamenti delle macchine tali da ridurre gli impatti sonori, sia alla scala del distretto urbano, per la scelta di soluzioni mitigative della rumorosità indotta presso ricettori sensibili. Nelle figure da 11 a 14 sono mostrati gli andamenti dei livelli di potenza sonora delle macchine censite in funzione della potenza frigorifera nominale, raggruppati per tipologia di pompa di calore e per tipo di fluido refrigerante utilizzato. Con le regressioni ricavate è possibile ipotizzare il livello di rumorosità di una pompa di calore, non noto, conoscendo la sua potenza frigorifera nominale.

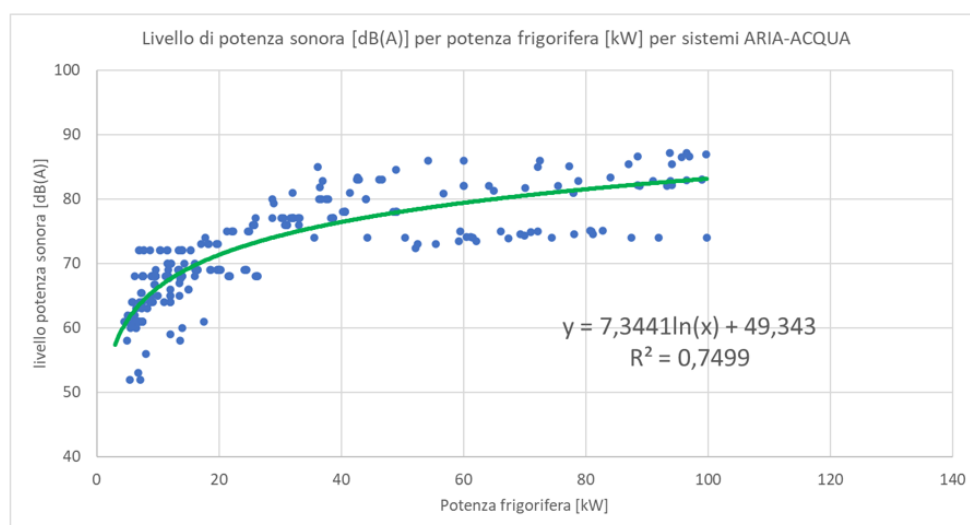


Figura 11 – Andamento del livello di potenza sonora in funzione della potenza frigorifera nominale, ottenuto per le unità esterne di pompe di calore censite del tipo Aria-Acqua.

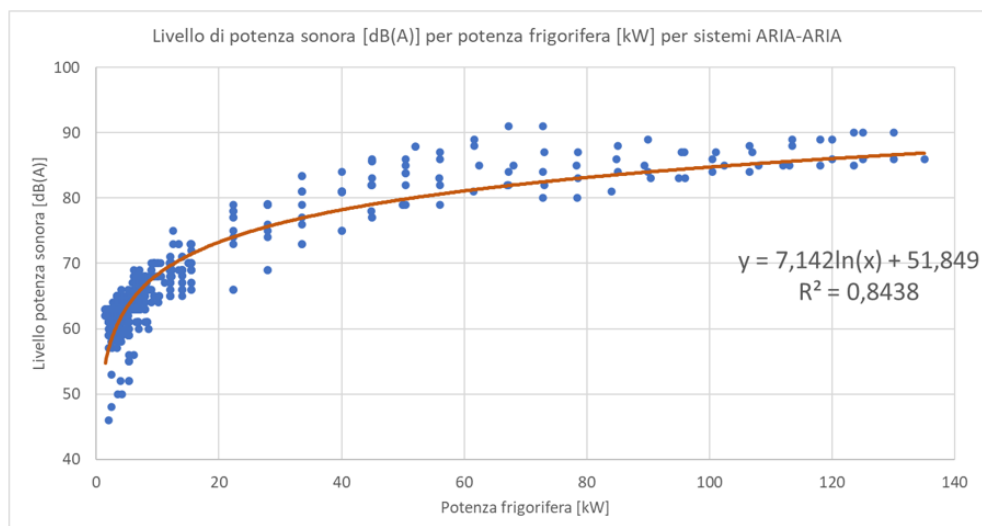


Figura 12 – Andamento del livello di potenza sonora in funzione della potenza frigorifera nominale, ottenuto per le unità esterne di pompe di calore censite del tipo Aria-Aria.

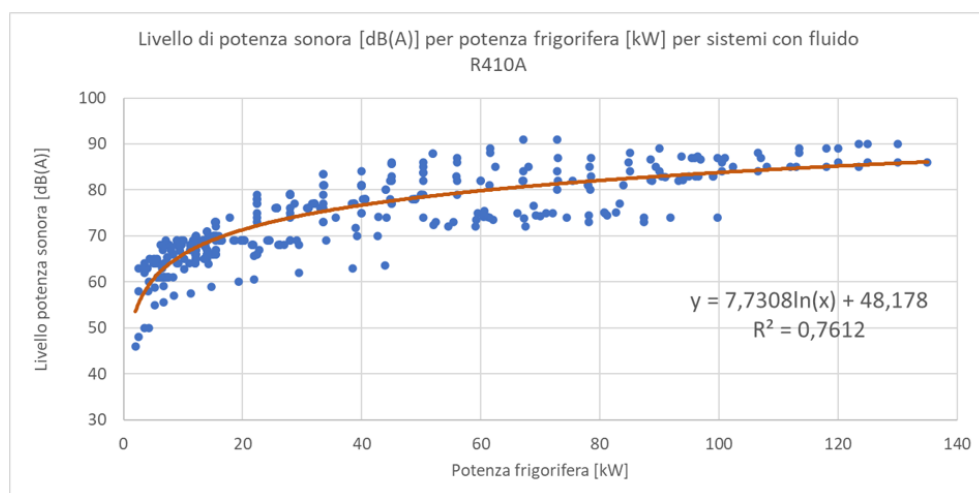


Figura 13 – Andamento del livello di potenza sonora in funzione della potenza frigorifera nominale, ottenuto per le unità esterne di pompe di calore censite che operano con fluido R410A.

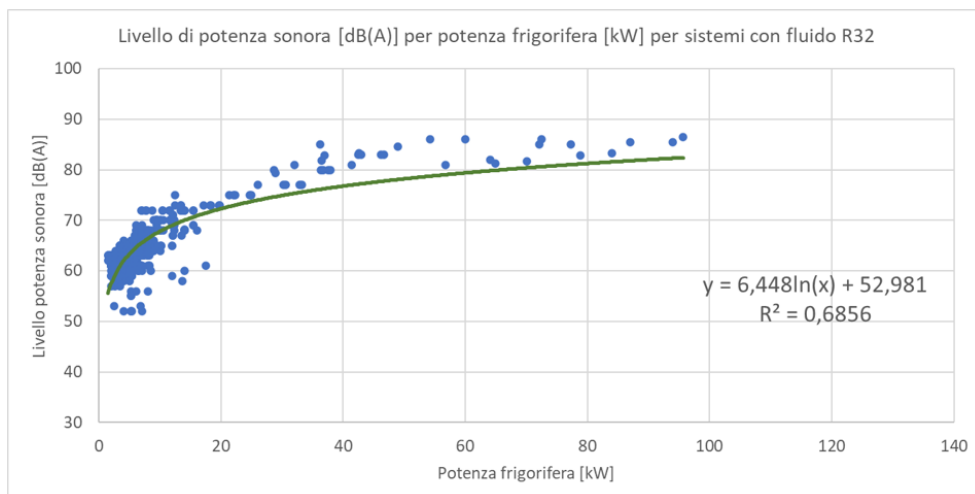


Figura 14 – Andamento del livello di potenza sonora in funzione della potenza frigorifera nominale, ottenuto per le unità esterne di pompe di calore censite che operano con fluido R32.

7.2 Sub-attività 2: analisi numerica dell'impatto di un uso estensivo delle pompe di calore sul paesaggio sonoro urbano

7.2.1 Finalità

La presente sub-attività è stata sviluppata con la finalità di quantificare l'impatto di un uso estensivo delle pompe di calore sul paesaggio sonoro urbano. Per questo motivo è stata condotta una campagna di simulazioni acustiche (analisi numerica), considerando differenti reticoli urbani e differenti configurazioni di installazione delle unità esterne delle pompe di calore. Grazie ai risultati dell'analisi numerica è stato possibile quantificare l'impatto acustico ed evidenziare combinazioni di reticoli urbani e configurazioni di installazione che generano impatti critici sul paesaggio sonoro.

7.2.2 Metodologia operativa

L'analisi numerica è stata condotta utilizzando un opportuno software di simulazione avanzata della propagazione del rumore in ambiente esterno (Wölfel IMMI v. 2023). Per condurre l'analisi sono stati realizzati 4 modelli di reticoli urbani rappresentativi di ricorrenti situazioni di centri cittadini italiani. In questi modelli sono state posizionate le unità esterne di pompe di calore, sorgenti rumorose con i dati relativi alle emissioni sonore ottenuti nella precedente sub-attività. È stata, dunque, simulata la distribuzione spaziale dell'impatto acustico (in termini di livello di pressione sonora) prodotto sul reticolo urbano.

Per la ricostruzione dei reticoli urbani modellati, si è fatto uso degli strumenti: webgis Geoportale GEOscopio e Google Earth, con cui è stato possibile ricavare il numero delle unità immobiliari urbane dei fabbricati da modellare e le loro geometrie. Considerando come parametri di interesse il numero di unità abitative per unità di superficie e la disposizione delle stesse nel reticolo urbano, sono stati individuati 4 reticoli urbani utilizzati come casi di studio e modellati, poiché caratterizzati da geometrie sufficientemente regolari e parametri sufficientemente differenti tra loro, in modo da essere rappresentativi di un numero maggiore possibile di tipici reticoli urbani. Per ciascun caso di studio è stata modellata un'area di 75000 m² (area rettangolare di 250 x 300 m), ritenuta adeguata per gli scopi. Nella tabella 1 si riportano le caratteristiche essenziali, mentre nelle figure da 15 a 18 alcune immagini dei casi di studio modellati.

Per ciascun edificio presente nei reticoli urbani analizzati, sono stati ricavati i seguenti dati: altezza, impronta in pianta e volume dell'edificio, numero di unità abitative (u.a.) presenti, area lorda in pianta e volume della singola u.a. (considerando uguali tutte le u.a. presenti). A ciascuna u.a. è stata associata una potenza termica necessaria alla climatizzazione pari al prodotto tra un coefficiente K (pari a 30 W/m³) ed il volume lordo della u.a. Di seguito si riporta l'elenco delle ulteriori assunzioni utili per lo sviluppo dell'analisi numerica. I livelli sonori sono valutati a 1.5 m dal piano di campagna (ritenuta significativa per la valutazione dell'impatto sulla percezione umana); la pavimentazione del contesto urbano è in asfalto; le pareti esterne degli edifici sono considerate lisce; le pompe di calore sono considerate come sorgenti sonore puntiformi omnidirezionali; è prevista l'installazione delle unità esterne in corrispondenza della mezzera di ciascun piano degli edifici, ad esclusione del piano terra, dove l'installazione è prevista a 10 cm dal piano di campagna, e in copertura, dove l'installazione è stata prevista a 10 cm dalla superficie di copertura; le simulazioni sono effettuate con funzionamento delle pompe di calore continuo a pieno carico.

Le simulazioni sono state ripetute per un totale di 24 differenti scenari in modo da considerare: numero crescente di pompe di calore installate per unità di volume urbano, diverse geometrie di disposizione delle pompe di calore nel reticolo urbano e diverse categorie nelle quali sono

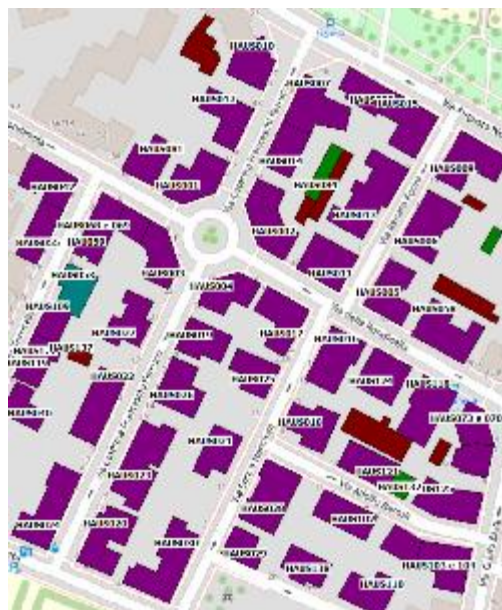
state raggruppate le pompe di calore in funzione della potenza frigorifera. In tabella 2 sono caratterizzate le 6 configurazioni utilizzate nelle simulazioni, che ripetute per i 4 casi di studio hanno originato i 24 scenari di analisi. In tabella 3 sono riportate le emissioni rumorose (ottenute dalla sub-attività 1) delle unità esterne delle PdC in funzione della potenza termica, utilizzate nelle simulazioni.

Tabella 1 – Identificazione e caratteristiche essenziali dei casi di studio modellati

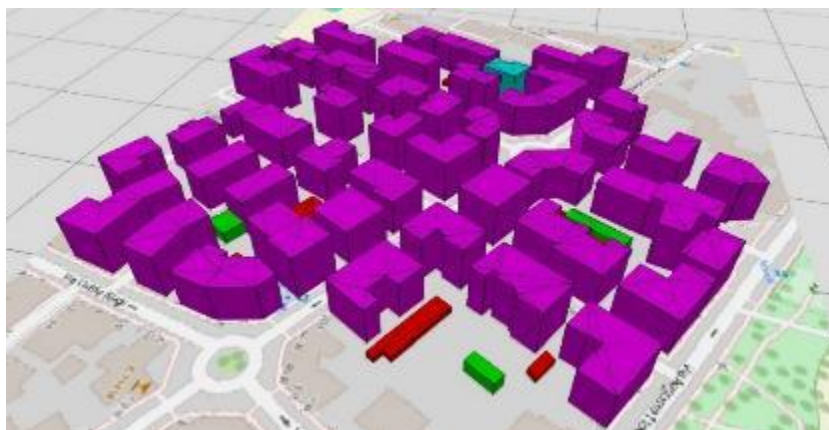
ID	Ubicazione e descrizione del caso di studio	Num. di edifici per fasce di altezza h (m)				Tot.
		$h \leq 3$	$3 < h \leq 6$	$9 \leq h \leq 15$	$15 < h \leq 25$	
1	Comune di Firenze (FI), quartiere Campo di Marte, contesto urbano con edifici ad altezza prevalente tra 15 e 25 m, densità di edifici medio-alta, strade interessate: Via della Rondinella, Via della Torricella, Via Caterina Franceschi Ferrucci, Via Enrico Nencioni, Via Renato Fucini, Via Adolfo Bartoli, Via del Mezzetta	9	3	1	52	65
2	Comune di Pisa (PI), quartiere di Porta a Lucca, contesto urbano con edifici ad altezza prevalente tra 9 e 15 m, densità di edifici bassa; strade interessate: Via Ugo Rindi, Piazzale Genova, Piazzale Venezia, Piazzale Amalfi, Piazzale Ravenna, Via Simone Martini	3	3	32	2	40
3	Comune di Pisa (PI), quartiere di Porta a Lucca, contesto urbano con edifici ad altezza prevalente tra 3 e 15 m, densità di edifici alta; strade interessate: Via Cagliari, Via Savona, Via Torino, Via Milano, Via Napoli, Via Palermo, Via Bologna	6	39	40	0	85
4	Comune di Pisa (PI), quartiere di Gagno, contesto urbano con edifici ad altezza prevalente fino a 3 m, densità di edifici medio-bassa; strade interessate: Via San Jacopo, Via Gino Lombardi, Via Guido Radi, Via Nevilio Casarosa, Via di Gagno, Via Paolo Barachini, Via Dante Grassini, Via Ferruccio Tempesti, Via Fosso della Bufalina	30	18	6	0	54



A (fonte: Google Maps)



B (fonte: IMMI)



C (fonte: IMMI)

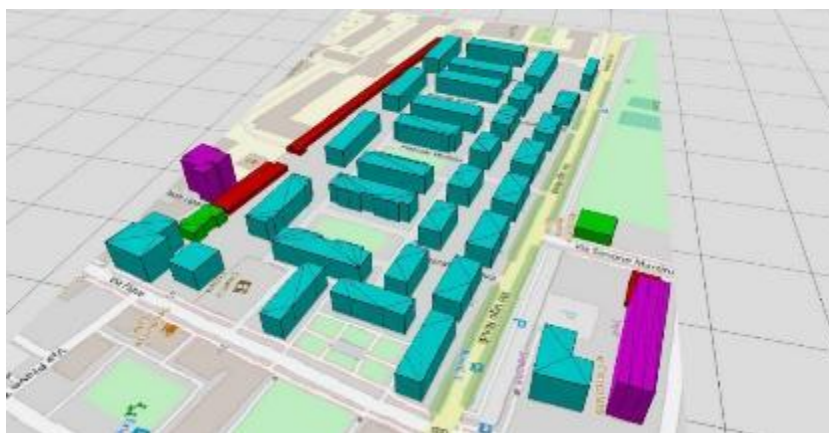
Figura 15 – Immagini del caso di studio ID 1: A) vista aerea, B) Rappresentazione 2D e C) rappresentazione 3D del modello.



A (fonte: Google Maps)



B (fonte: IMMI)



C (fonte: IMMI)

Figura 16 – Immagini del caso di studio ID 2: A) vista aerea, B) Rappresentazione 2D e C) rappresentazione 3D del modello.



A (fonte: Google Maps)



B (fonte: IMMI)



C (fonte: IMMI)

Figura 17 - Immagini del caso di studio ID 3: A) vista aerea, B) Rappresentazione 2D e C) rappresentazione 3D del modello.



A (fonte: Google Maps)



B (fonte: IMMI)



C (fonte: IMMI)

Figura 18 – Immagini del caso di studio ID 4: A) vista aerea, B) Rappresentazione 2D e C) rappresentazione 3D del modello.

Tabella 2 – Definizione delle caratteristiche delle 6 configurazioni (da A.I a B.II) utilizzate per le simulazioni nei 4 casi di studio.

IMPIANTI AUTONOMI				
Configurazione	A.I	A.II	A.III	A.IV
Numero PdC presenti	Una per ogni unità abitativa (u.a.)	(a) n. 1 PdC per tutte le u.a. con superficie minore o uguale a 100 m ² , (b) n. 2 PdC per tutte le u.a. con superficie maggiore di 100 m ²		
Taglia PdC	Potenza termica pari a quella necessaria alla climatizz. della u.a.	(a) potenza termica pari a quella necessaria alla climatizzazione della u.a., (b) potenza termica pari a metà di quella necessaria alla climatizz. della u.a.		
Posizionamento PdC	Prospetto posteriore	(a) prospetto posteriore, (b) n. 1 PdC sul prospetto posteriore + n.1 PdC sul prospetto laterale (ove possibile o in alternativa prospetto anteriore)		
PdC considerate in funzione	Tutte	Tutte	(a) tutte (b) solo prospetto posteriore	(a) tutte (b) solo prospetto anteriore

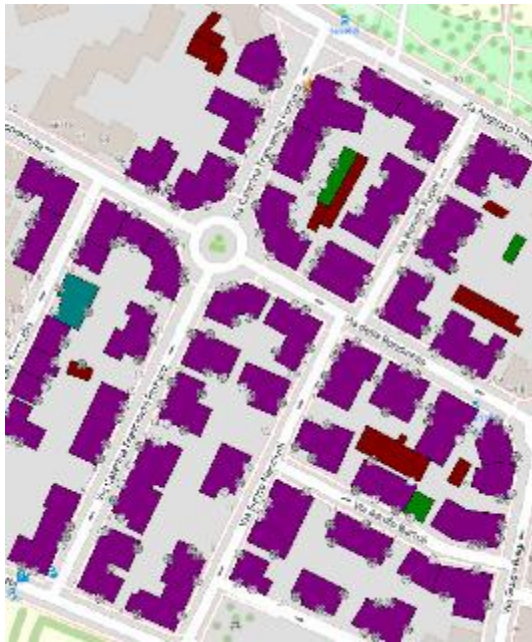
IMPIANTI CENTRALIZZATI		
Configurazione	B.I	B.II
Numero PdC presenti	Una per ogni 100 kW di potenza termica nominale richiesta per la climatizzazione dell'edificio	
Taglia PdC	Potenza termica pari alla somma di quelle necessarie alla climatizzazione di tutte le u.a. dell'edificio	
Posizionamento PdC	A terra zona prospetto posteriore (ove possibile o in alternativa prospetto laterale)	In copertura zona prospetto posteriore (ove possibile o in alternativa prospetto laterale)
PdC considerate in funzione	Tutte	Tutte

Tabella 3 – Caratteristiche dell'emissione sonora delle PdC in funzione della taglia (potenza termica nominale) ottenute dalla sub-attività 1 ed utilizzate nelle simulazioni (L_w= livello di potenza sonora).

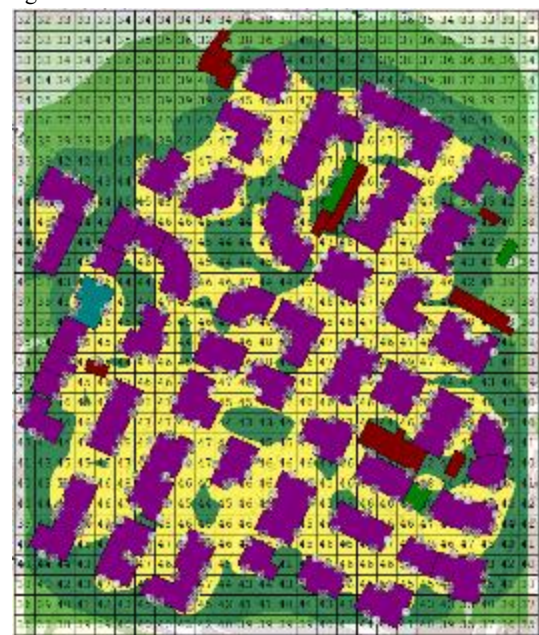
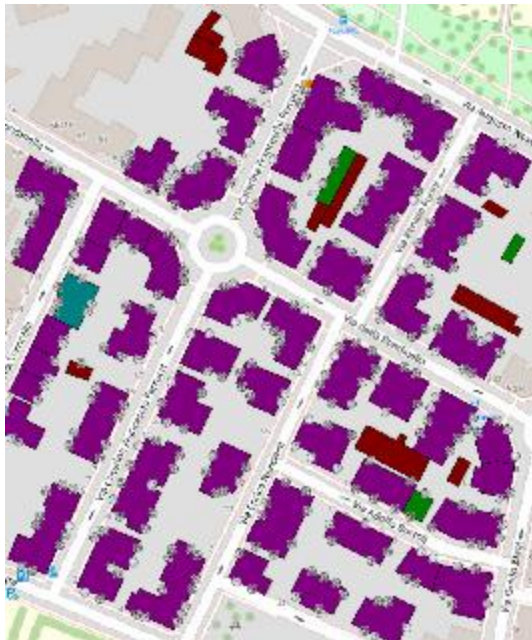
Taglia (kW)	L _w (dB)						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1K Hz	2K Hz	4K Hz	8K Hz
0-10	57.4	60.5	55.8	54.2	51.9	46.7	34.4
10-15	60.4	60.6	61.6	64.6	60.1	60.1	60.1
15-25	57.7	60.8	62.6	64.1	60.7	60.7	60.7
25-30	61.2	66.0	71.4	72.0	60.7	60.7	60.7
30-35	63.6	68.4	73.4	73.5	60.7	60.7	60.7
35-40	73.2	75.4	75.4	77.8	74.7	70.3	58.2
40-60	63.6	68.4	73.4	73.5	70.5	70.5	70.5
60-80	64.4	62.3	70.4	71.2	63.3	54.8	44.2
80-100	76.4	77.7	80.3	82.6	77.7	70.4	59.8

7.2.3 Risultati

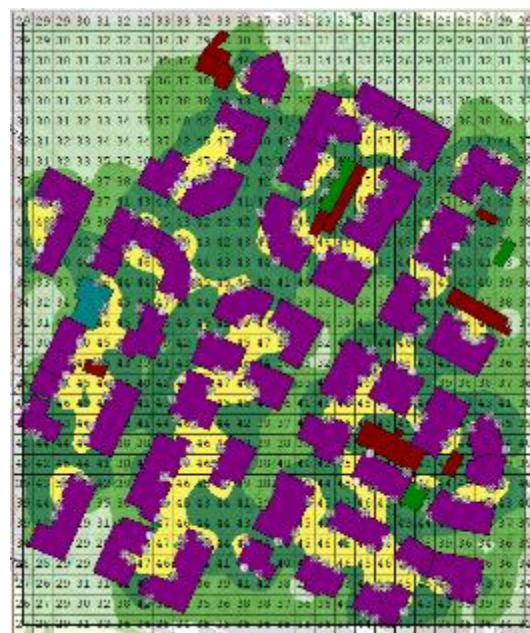
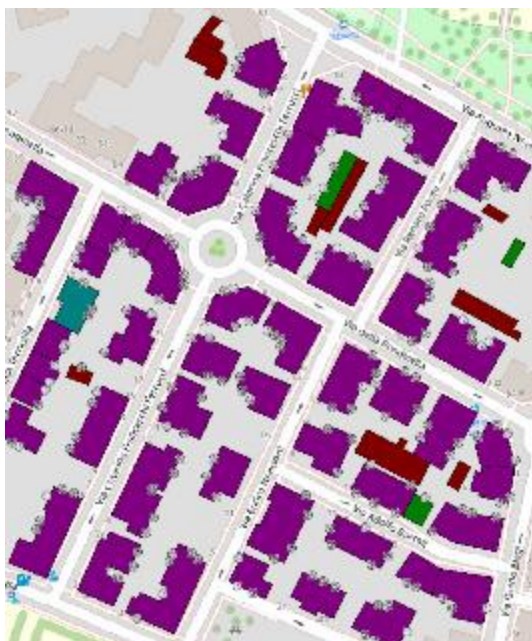
Il risultato essenziale della sub-attività è rappresentato dagli output delle simulazioni. In dettaglio, nelle figure da 19 a 22 si mostrano, in forma grafica, i principali output delle simulazioni per i 24 scenari considerati (raggruppati per caso di studio). Si ricorda che gli scenari differiscono per numero di pompe di calore installate per unità di volume urbano, disposizione nel reticolo urbano delle sorgenti rumorose (unità esterne di PdC) e differenti taglie delle pompe di calore. Questi ultimi aspetti sono bene evidenziati nella tabella 4 e nella figura 23.



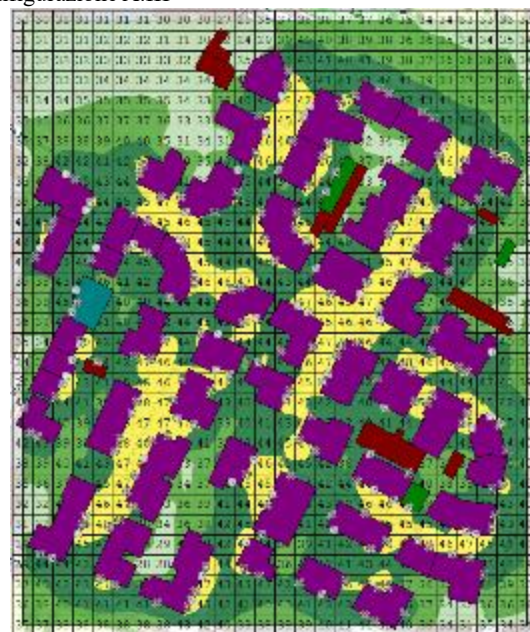
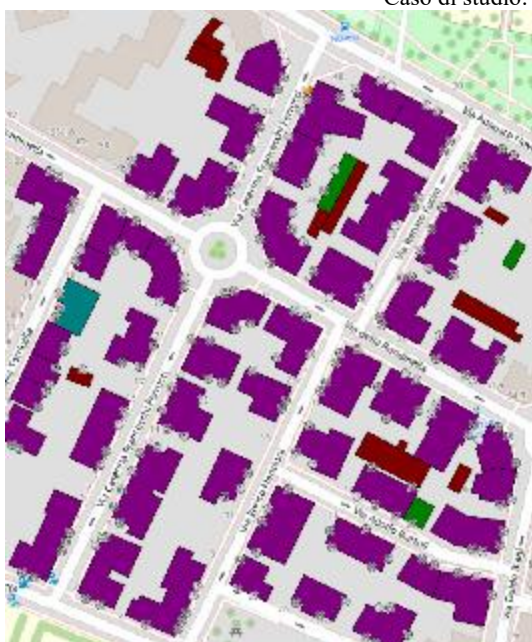
Caso di studio: ID 1 -- Configurazione A.I



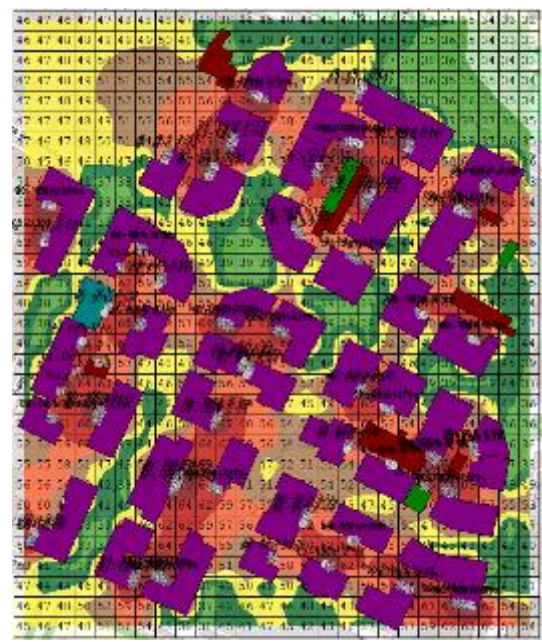
Caso di studio: ID 1 -- Configurazione A.II



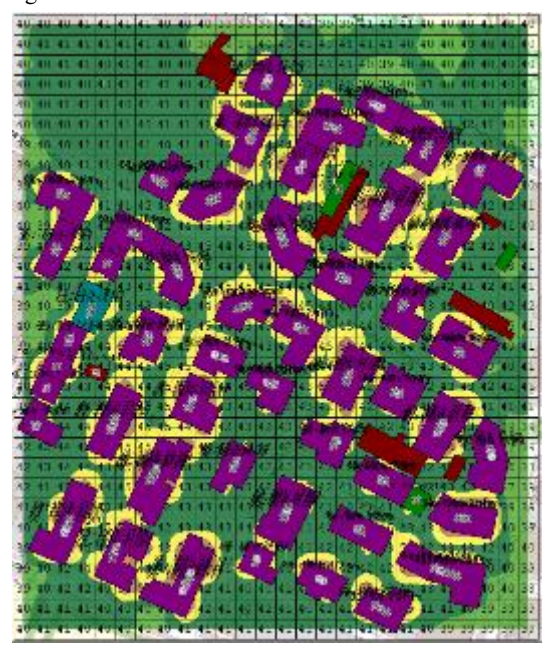
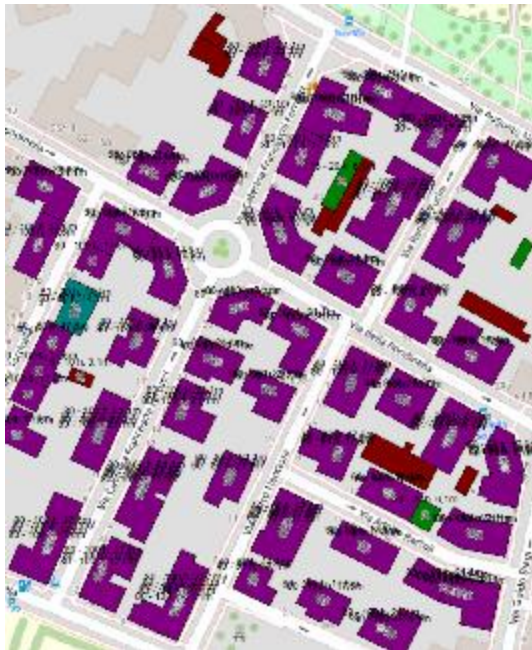
Caso di studio: ID 1 -- Configurazione A.III



Caso di studio: ID 1 -- Configurazione A.IV



Caso di studio: ID 1 -- Configurazione B.I



Caso di studio: ID 1 -- Configurazione B.II

- Legenda simboli**
- Edificato 15 - 24 (HAUS)
 - Edificato fino a 3 (HAUS)
 - Edificato 3 - 6 (HAUS)
 - Edificato 9 - 15 (HAUS)
 - ⊙ Sorgente (EZQI)

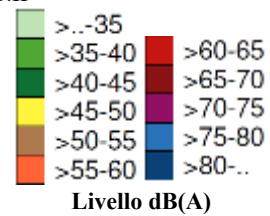
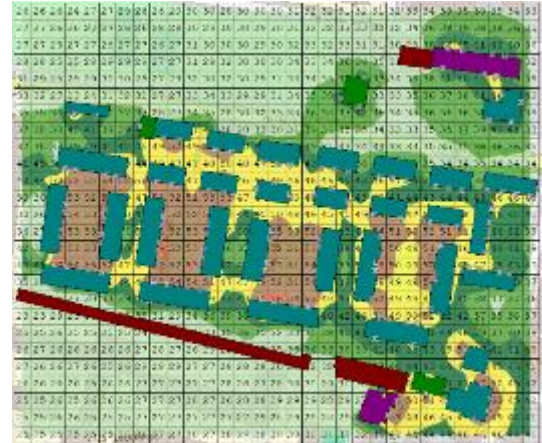
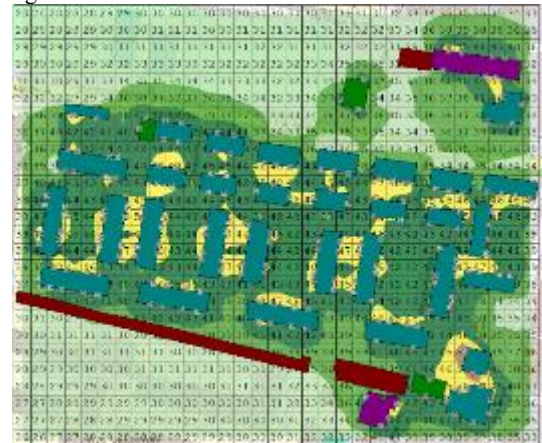


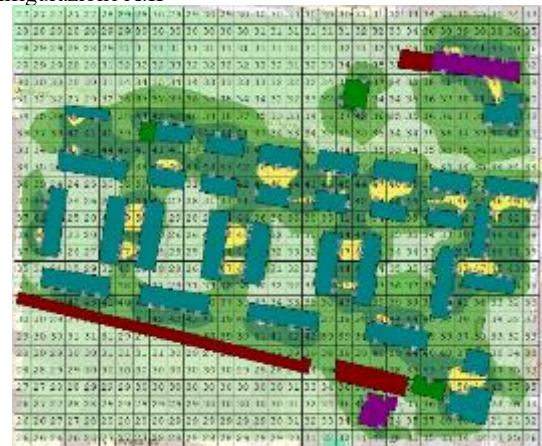
Figura 19 – Output delle simulazioni per i 6 scenari del caso di studio ID 1: planimetrie con indicazioni delle sorgenti sonore (sinistra), mappe in falsi colori dei livelli di rumorosità nel reticolo urbano (destra).



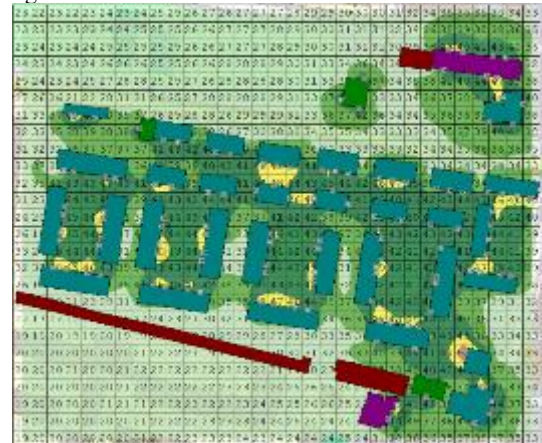
Caso di studio: ID 2 -- Configurazione A.I



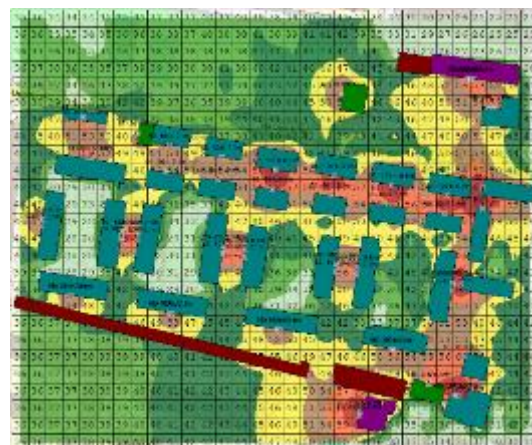
Caso di studio: ID 2 -- Configurazione A.II



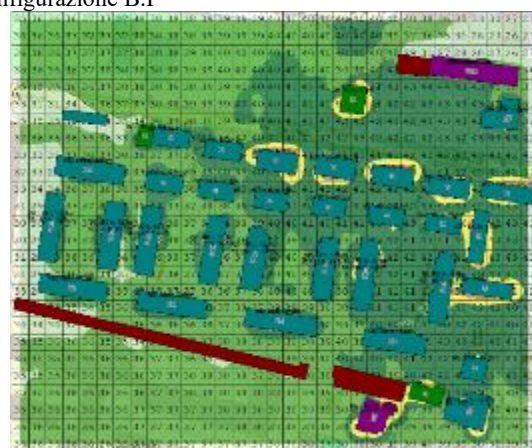
Caso di studio: ID 2 -- Configurazione A.III



Caso di studio: ID 2 -- Configurazione A.IV



Caso di studio: ID 2 -- Configurazione B.I



Caso di studio: ID 2 -- Configurazione B.II

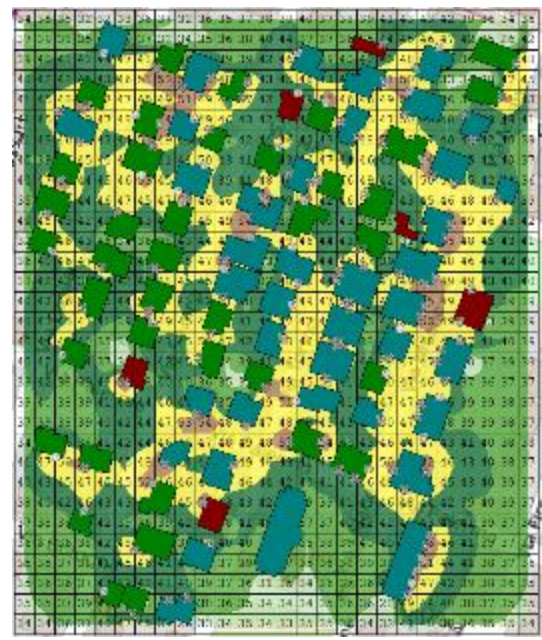
- Edificio 15 - 24 (HAUS)
- Edificio fino a 3 (HAUS)
- Edificio 3 - 6 (HAUS)
- Edificio 9 - 15 (HAUS)
- Sorgente (EZQI)

Legenda simboli

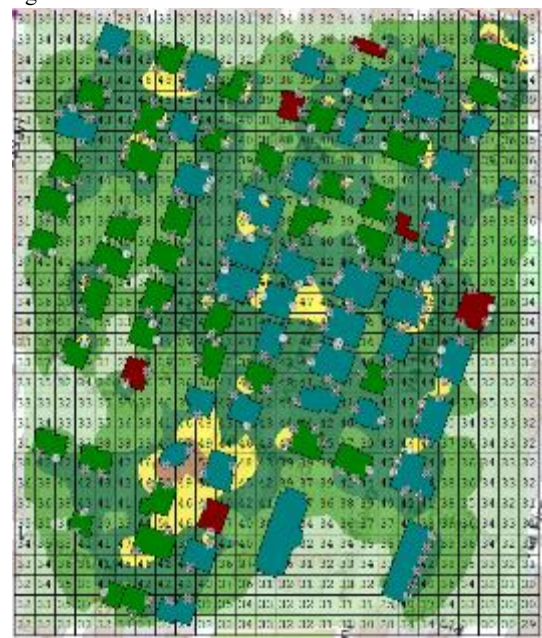
- >.-35
- >35-40
- >40-45
- >45-50
- >50-55
- >55-60
- >60-65
- >65-70
- >70-75
- >75-80
- >80-..

Livello dB(A)

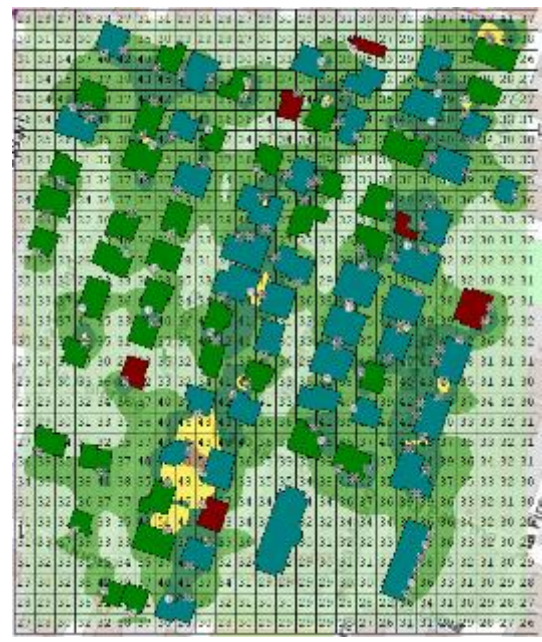
Figura 20 – Output delle simulazioni per i 6 scenari del caso di studio ID 2: planimetrie con indicazioni delle sorgenti sonore (sinistra), mappe in falsi colori dei livelli di rumorosità nel reticolo urbano (destra).



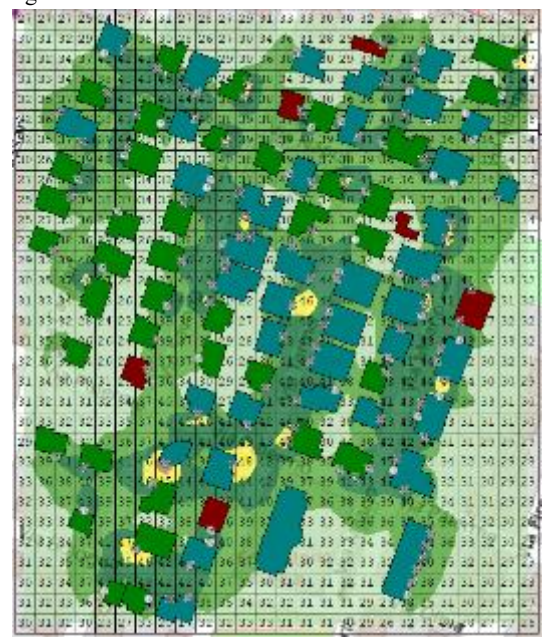
Caso di studio: ID 3 -- Configurazione A.I



Caso di studio: ID 3 -- Configurazione A.II



Caso di studio: ID 3 -- Configurazione A.III



Caso di studio: ID 3 -- Configurazione A.IV



Caso di studio: ID 3 -- Configurazione B.I



Caso di studio: ID 3 -- Configurazione B.II



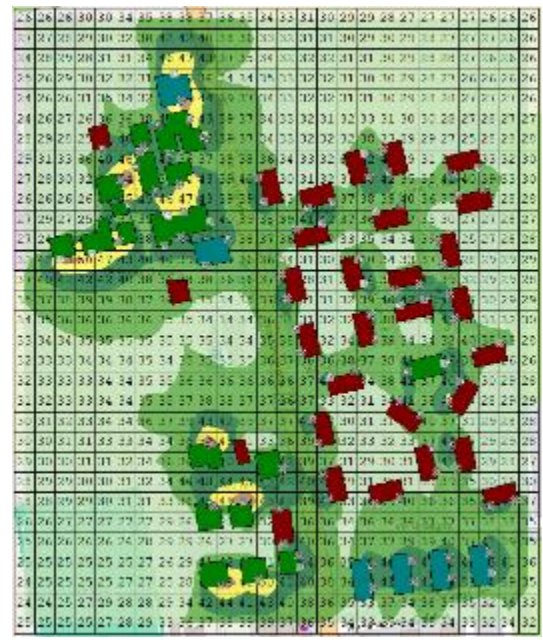
- Edificato 15 - 24 (HAUS)
- Edificato fino a 3 (HAUS)
- Edificato 3 - 6 (HAUS)
- Edificato 9 - 15 (HAUS)
- ⊗ Sorgente (EZQI)

Legenda simboli

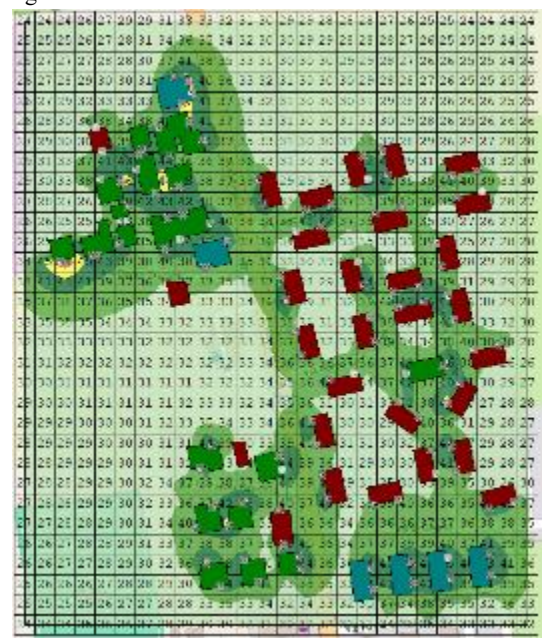
- >.-35
- >35-40
- >40-45
- >45-50
- >50-55
- >55-60
- >60-65
- >65-70
- >70-75
- >75-80
- >80-..

Livello dB(A)

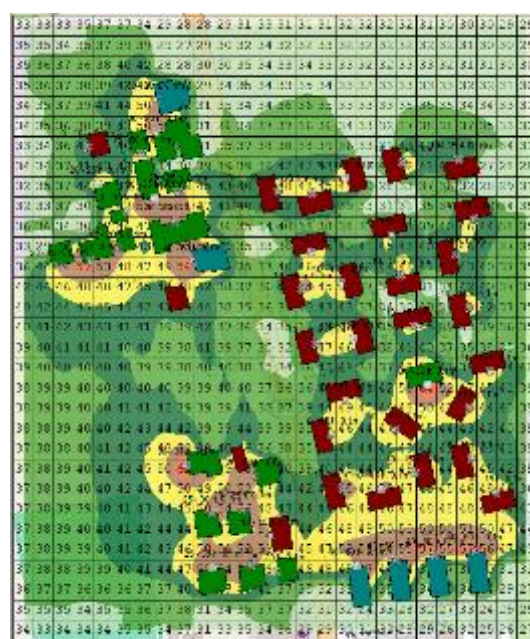
Figura 21 – Output delle simulazioni per i 6 scenari del caso di studio ID 3: planimetrie con indicazioni delle sorgenti sonore (sinistra), mappe in falsi colori dei livelli di rumorosità nel reticolo urbano (destra).



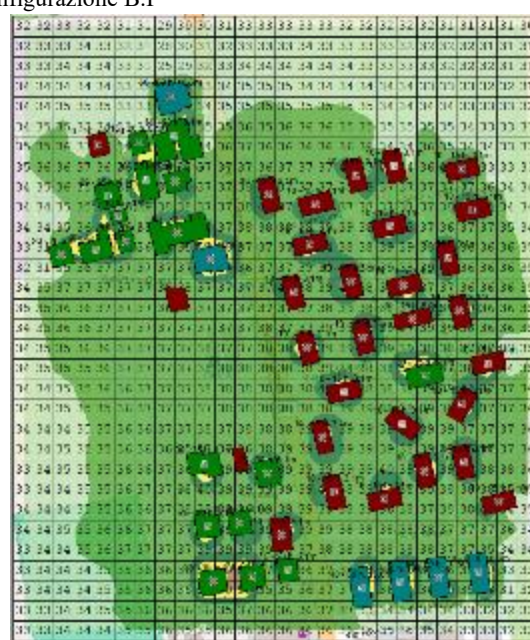
Caso di studio: ID 4 -- Configurazione A.I



Caso di studio: ID 4 -- Configurazione A.II



Caso di studio: ID 4 -- Configurazione B.I



Caso di studio: ID 4 -- Configurazione B.II

- Edificato 15 - 24 (HAUS)
- Edificato fino a 3 (HAUS)
- Edificato 3 - 6 (HAUS)
- Edificato 9 - 15 (HAUS)
- Sorgente (EZQI)

Legenda simboli

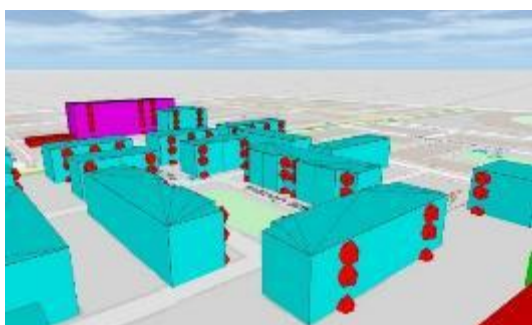
- >.-35
- >35-40
- >40-45
- >45-50
- >50-55
- >55-60
- >60-65
- >65-70
- >70-75
- >75-80
- >80-..

Livello dB(A)

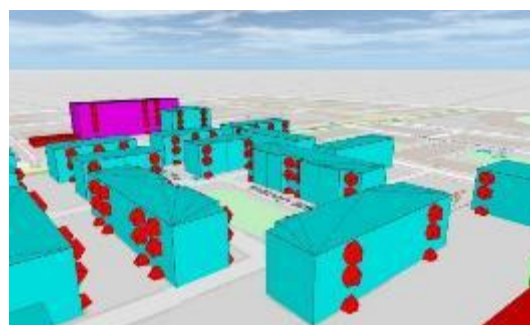
Figura 22 – Output delle simulazioni per i 6 scenari del caso di studio ID 4: planimetrie con indicazioni delle sorgenti sonore (sinistra), mappe in falsi colori dei livelli di rumorosità nel reticolo urbano (destra).

Tabella 4 – Numero di unità abitative e numero di pompe di calore attive (di differenti taglie) considerate nei vari scenari analizzati.

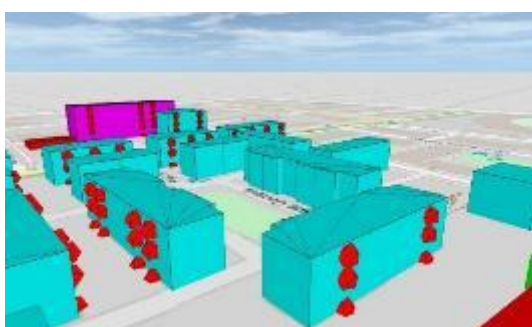
n° u.a.	n° pompe di calore per configurazione					
	A.I	A.II	A.III	A.IV	B.I	B.II
1119	1119	1763	1119	1119	156	156
384	384	597	384	384	56	56
273	272	466	272	272	87	87
144	146	176	146	146	52	52



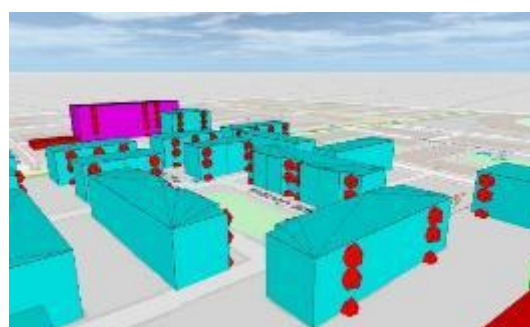
Caso di studio ID 2 – Configurazione A.I



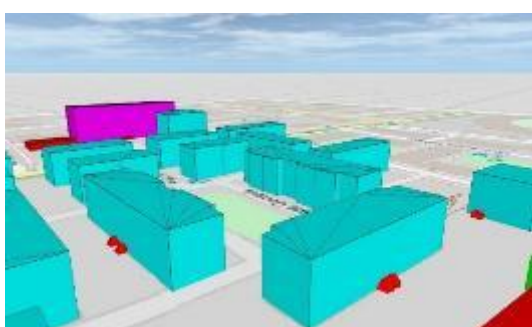
Caso di studio ID 2 – Configurazione A.II



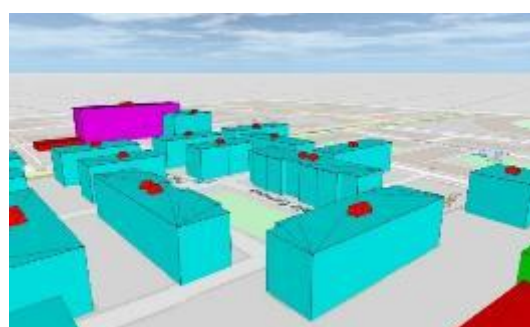
Caso di studio ID 2 – Configurazione A.III



Caso di studio ID 2 – Configurazione A.IV



Caso di studio ID 2 – Configurazione B.I



Caso di studio ID 2 – Configurazione B.II

Figura 23 – Posizionamento delle PdC, considerate funzionanti, nel reticolo urbano: esempio del caso di studio ID 2.

7.2.4 Commenti

I risultati ottenuti dall'analisi numerica condotta possono essere di grande utilità per l'identificazione di configurazioni di installazione delle pompe di calore più critiche dal punto di vista dell'impatto sul paesaggio sonoro. Numerose considerazioni progettuali (sia legate alle tipologie impiantistiche, sia legate al posizionamento delle unità esterne, sia legate alla pianificazione urbanistica) possono essere effettuate a partire dai risultati ottenuti. A titolo di esempio, nelle tabelle da 5 a 8 si riportano le percentuali di area del reticolo urbano i cui livelli sonori (per effetto dell'emissione rumorosa delle PdC) raggiungono determinati valori.

Tabella 5 – Percentuale dell'area totale del reticolo urbano, per la quale si rileva un determinato livello di rumorosità (valutato con il livello di pressione sonora L_p in dB), complessivamente generato dalle unità esterne delle pompe di calore: caso di studio ID 1.

Configurazione		A.I	A.II	A.III	A.IV	B.I	B.II
Area Tot	(m ²)	75000					
Percentuale dell'area totale del reticolo urbano caratterizzata da un determinato livello sonoro L_p (dB)	$L_p < 35$	1.7	6.3	22.1	14.1	2.4	0.0
	$35 \leq L_p < 40$	8.8	16.4	18.1	20.8	12.0	12.8
	$40 \leq L_p < 45$	19.9	28.4	37.0	42.8	12.0	58.2
	$45 \leq L_p < 50$	33.1	46.9	21.5	21.8	14.4	10.4
	$50 \leq L_p < 55$	30.9	2.0	1.3	0.5	12.9	3.2
	$55 \leq L_p < 60$	5.5	0.0	0.0	0.0	21.0	15.4
	$60 \leq L_p < 65$	0.1	0.0	0.0	0.0	17.5	0.0
	$65 \leq L_p < 70$	0.0	0.0	0.0	0.0	5.6	0.0
	$70 \leq L_p < 75$	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0
	$75 \leq L_p < 80$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0
Percentuale Tot		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabella 6 – Percentuale dell'area totale del reticolo urbano, per la quale si rileva un determinato livello di rumorosità (valutato con il livello di pressione sonora L_p in dB), complessivamente generato dalle unità esterne delle pompe di calore: caso di studio ID 2.

Configurazione		A.I	A.II	A.III	A.IV	B.I	B.II
Area Tot	(m ²)	75000					
Percentuale dell'area totale del reticolo urbano caratterizzata da un determinato livello sonoro L_p (dB)	$L_p < 35$	41.9	36.2	49.1	51.4	13.0	9.7
	$35 \leq L_p < 40$	14.1	19.5	21.5	14.5	21.7	49.0
	$40 \leq L_p < 45$	13.6	28.3	22.5	26.9	23.2	28.4
	$45 \leq L_p < 50$	15.4	15.8	6.8	7.1	19.0	8.8
	$50 \leq L_p < 55$	13.2	0.1	0.1	0.0	12.4	1.7
	$55 \leq L_p < 60$	1.8	0.1	0.0	0.1	7.3	2.4
	$60 \leq L_p < 65$	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0
	$65 \leq L_p < 70$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0
	$70 \leq L_p < 75$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
	$75 \leq L_p < 80$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Percentuale Tot		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabella 7 – Percentuale dell'area totale del reticolo urbano, per la quale si rileva un determinato livello di rumorosità (valutato con il livello di pressione sonora L_p in dB), complessivamente generato delle unità esterne delle pompe di calore: caso di studio ID 3.

Configurazione		A.I	A.II	A.III	A.IV	B.I	B.II
Area Tot	(m ²)	75000					
Percentuale dell'area totale del reticolo urbano caratterizzata da un determinato livello sonoro L_p (dB)	$L_p < 35$	7.1	23.7	46.3	42.6	6.0	3.5
	$35 \leq L_p < 40$	26.1	28.9	31.5	31.4	11.9	38.5
	$40 \leq L_p < 45$	28.8	36.6	17.2	21.6	25.6	39.2
	$45 \leq L_p < 50$	29.5	9.8	4.3	4.2	25.8	9.2
	$50 \leq L_p < 55$	7.5	0.8	0.6	0.1	17.4	6.8
	$55 \leq L_p < 60$	1.0	0.2	0.1	0.1	9.4	2.7
	$60 \leq L_p < 65$	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.1
	$65 \leq L_p < 70$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
	$70 \leq L_p < 75$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
	$75 \leq L_p < 80$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Percentuale Tot		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabella 8 – Percentuale dell'area totale del reticolo urbano, per la quale si rileva un determinato livello di rumorosità (valutato con il livello di pressione sonora L_p in dB), complessivamente generato delle unità esterne delle pompe di calore: caso di studio ID 4.

Configurazione		A.I	A.II	A.III	A.IV	B.I	B.II
Area Tot	(m ²)	75000					
Percentuale dell'area totale del reticolo urbano caratterizzata da un determinato livello sonoro L_p (dB)	$L_p < 35$	53.3	61.9	65.3	66.0	26.6	33.0
	$35 \leq L_p < 40$	27.7	23.9	23.1	22.7	27.4	56.1
	$40 \leq L_p < 45$	13.9	11.3	9.4	9.3	23.7	2.4
	$45 \leq L_p < 50$	3.8	2.7	2.2	1.9	14.1	5.7
	$50 \leq L_p < 55$	1.1	0.2	0.0	0.1	6.5	2.6
	$55 \leq L_p < 60$	0.2	0.0	0.0	0.0	1.5	0.2
	$60 \leq L_p < 65$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
	$65 \leq L_p < 70$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	$70 \leq L_p < 75$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	$75 \leq L_p < 80$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Percentuale Tot		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Esaminando le tabelle sopra riportare e le figure riportate nel paragrafo precedente (risultati dell'analisi numerica) è possibile effettuare alcune osservazioni di carattere quantitativo con validità che può essere estesa oltre agli specifici casi di studio analizzati. In particolare:

- considerando un singolo caso di studio, e confrontando i risultati dell'analisi numerica per le differenti configurazioni, è possibile valutare quantitativamente l'impatto del numero crescente di pompe di calore installate, l'impatto del loro posizionamento e l'impatto di una eventuale centralizzazione degli impianti serviti dalle PdC, sul paesaggio sonoro urbano;
- considerando una singola configurazione, e confrontando i risultati dell'analisi numerica per i differenti casi di studio, è possibile valutare quantitativamente l'impatto della densità abitativa e della distribuzione spaziale degli edifici dotati di pompe di calore, sul paesaggio sonoro urbano.

7.3 Sub-attività 3: sviluppo e validazione di un modello analitico semplificato per la previsione dei livelli di rumore prodotti da molteplici unità esterne di pompe di calore nei reticoli urbani

7.3.1 Finalità

La presente sub-attività è stata condotta con la finalità di sviluppare, validare e rendere disponibile un modello semplificato per la stima analitica dell'impatto acustico derivante dall'uso estensivo di pompe di calore in ambito urbano. L'obiettivo di questo strumento è supportare le fasi di progettazione preliminare di interventi su larga scala, fornendo indicazioni utili per l'identificazione delle configurazioni più critiche per l'impatto acustico sul paesaggio sonoro urbano. L'approccio semplificato consentirà, in fase progettuale, di ripetere sistematicamente una serie di valutazioni, variando i parametri geometrici del reticolo urbano e considerando diverse configurazioni delle pompe di calore installate, in termini di numero per unità di volume urbano, modalità di disposizione all'interno del reticolo e categoria delle PdC stesse.

7.3.2 Metodologia operativa

Il modello di calcolo è stato sviluppato utilizzando semplici relazioni analitiche, in grado di stimare il livello di pressione sonora presente nell'ambiente urbano, utilizzando la teoria della propagazione del suono in esterno. Il modello consente di stimare l'impatto acustico per una specifica configurazione urbana, rappresentata da una sezione ideale di un complesso edifici-strada, noto come *canyon urbano*. Il modello urbano è dunque bidimensionale, con il ricettore posizionato al centro della carreggiata, ad un'altezza di 1.5 metri dal piano stradale. Di seguito l'equazione [1] usata per stimare il livello di pressione sonora prodotto sul ricettore, da una singola unità esterna di PdC.

$$[1] \quad L_p = L_w - 20 \log(r) - 10 \log(400 / (\rho \cdot c)) - 11 - A + D \quad (\text{dB})$$

dove:

L_w : livello di potenza sonora della sorgente per frequenza centrale di banda di ottava (dB);

r : distanza tra sorgente e ricettore (m);

ρ : densità dell'aria (kg/m^3);

c : velocità di propagazione del suono nell'aria (m/s);

A : assorbimento acustico dell'aria (dB) $\rightarrow A = 7.4 \cdot (f^2 \cdot r) / (\phi) \cdot 10^{-8}$

f frequenza (Hz)

ϕ umidità dell'aria (%)

D = indice di direttività acustica, posto pari a 3 per tutti i casi analizzati.

Il livello complessivo $L_{p,tot}$ sarà dato dal contributo (somma di livelli in dB, non algebrica) di tutte le PdC presenti nel canyon urbano modellato. Il valore di $L_{p,tot}$ ottenuto è stato corretto secondo l'equazione seguente

$$L_{p,tot*} = L_{p,tot} \cdot \xi$$

dove ξ è un fattore correttivo, utilizzato per tenere in considerazione gli effetti di riflessione delle superfici urbane e gli effetti di tridimensionalità presenti nella situazione reale e non considerati dal modello. Il valore di ξ è stato determinato sfruttando i risultati della sub-attività precedente e vale 1.08. Solo per le configurazioni con PdC a servizio di impianti centralizzati, con unità esterna posizionata in copertura, l'equazione [1] è stata modificata considerando opportunamente (con le relazioni analitiche presenti in letteratura) gli effetti diffrattivi esercitati allo spigolo tra copertura e parete verticale.

Il modello analitico è stato implementato in piattaforma Matlab e validato confrontando i risultati da esso ottenuti (in termini di $L_{p,tot*}$, ponderati con curva di ponderazione acustica "A") con quelli previsti a seguito dell'analisi numerica (sub-attività precedente).

7.3.3 Risultati

In figura 24 è riportato un esempio di schematizzazione del canyon urbano, sulla quale il modello semplificato è basato, e la sua rappresentazione in ambiente Matlab. Nelle figure 25 e 26 sono identificate le 10 combinazioni "canyon urbani-configurazioni posizionamento PdC", prese in due casi di studio tra quelli considerati nella precedente sub-attività, sulle quali è stata condotta la validazione. Nella tabella 9 sono riepilogati i risultati della validazione, che testimoniano l'adeguatezza del modello ad essere utilizzato nelle fasi progettuali preliminari come strumento previsionale dell'impatto di un uso estensivo di PdC sul paesaggio sonoro urbano.

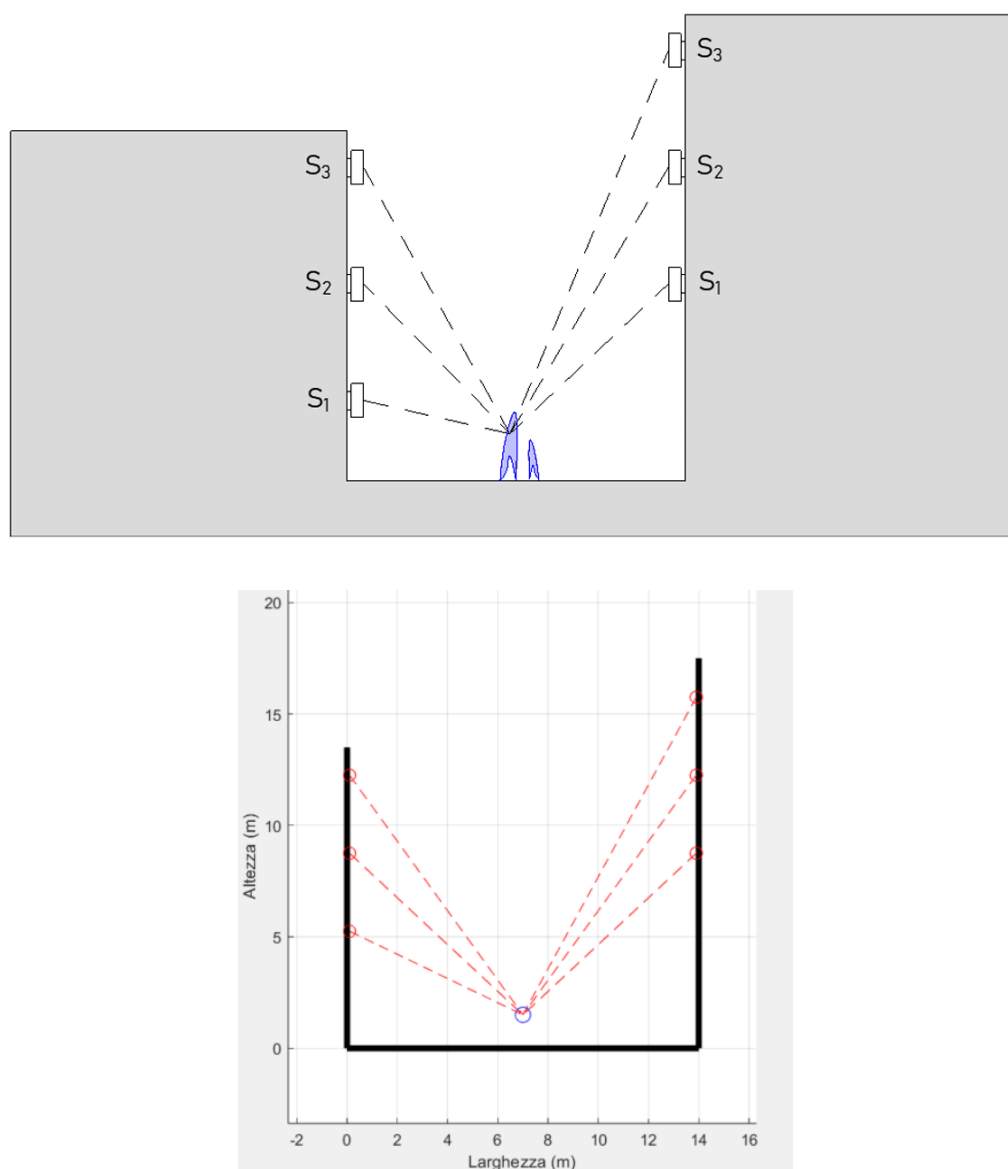
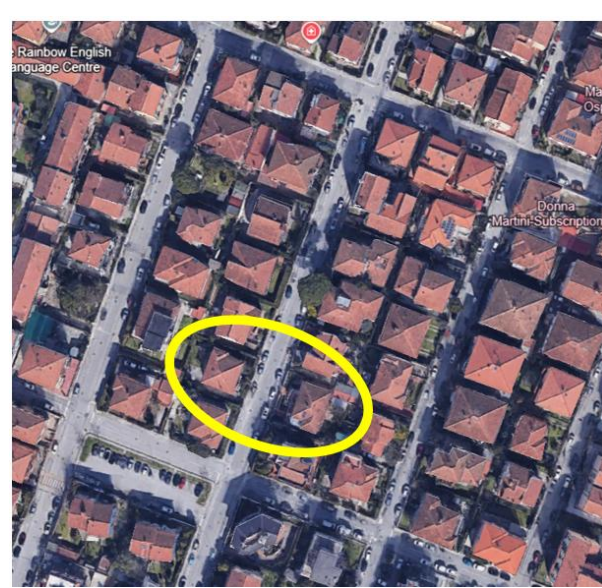
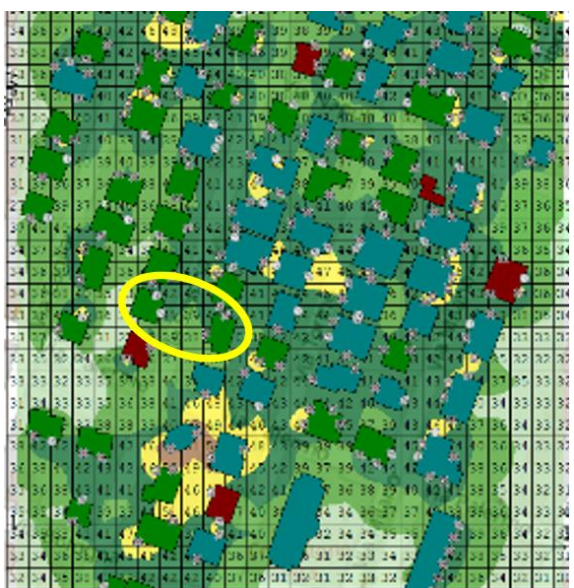


Figura 24 – Esempio di schematizzazione del canyon urbano e sua rappresentazione tramite modello implementato in Matlab (con S sono indicate le diverse sorgenti sonore, cioè le unità esterne di pompe di calore).

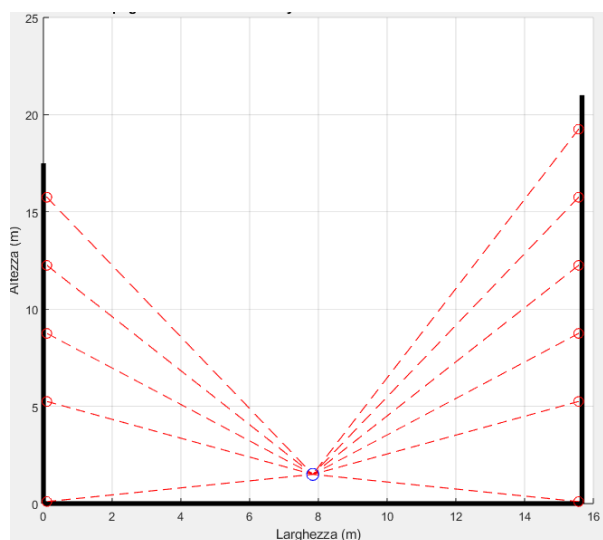


Caso di studio ID 1

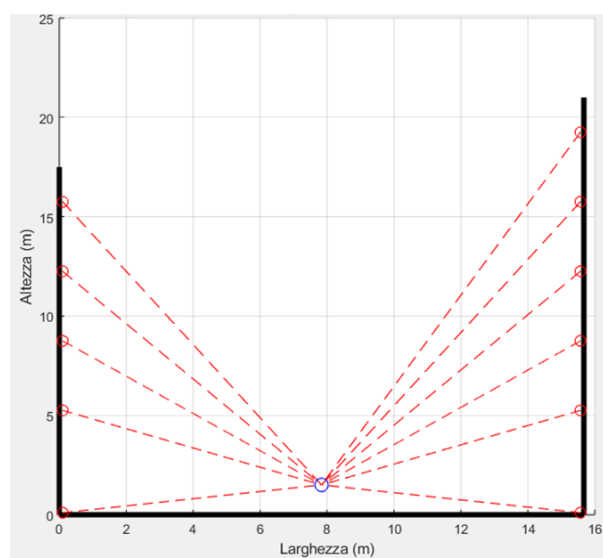


Caso di studio ID 2

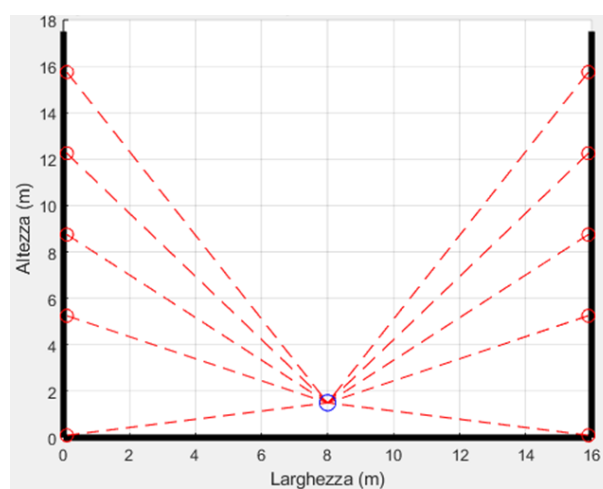
Figura 25 – Identificazione in pianta (output simulazioni numeriche a sinistra, immagine aerea a destra) dei canyon urbani utilizzati per la validazione del modello semplificato.



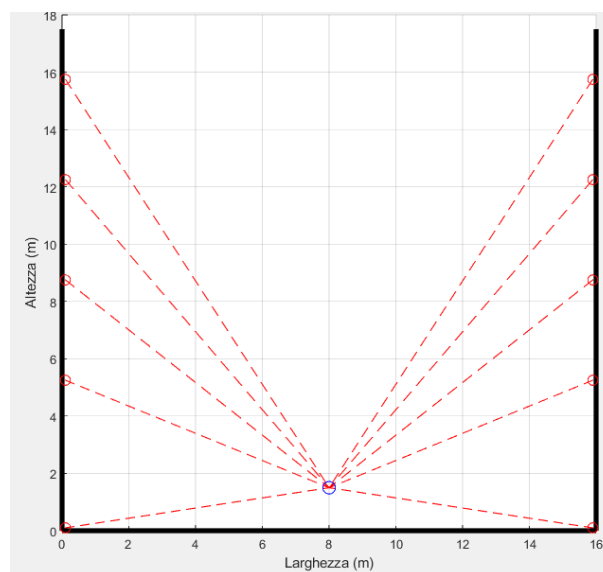
Caso di studio ID 1 – Canyon urbano cerchiato rosso in fig. 25 – Configurazione A.I



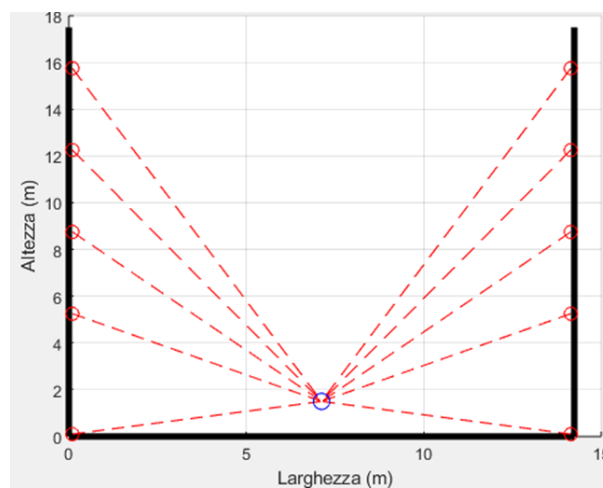
Caso di studio ID 1 – Canyon urbano cerchiato rosso in fig. 25 – Configurazione A.II



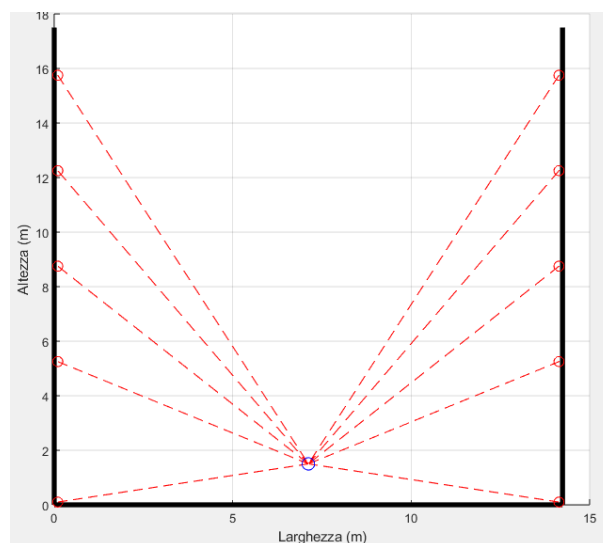
Caso di studio ID 1 – Canyon urbano cerchiato viola in fig. 25 – Configurazione A.I



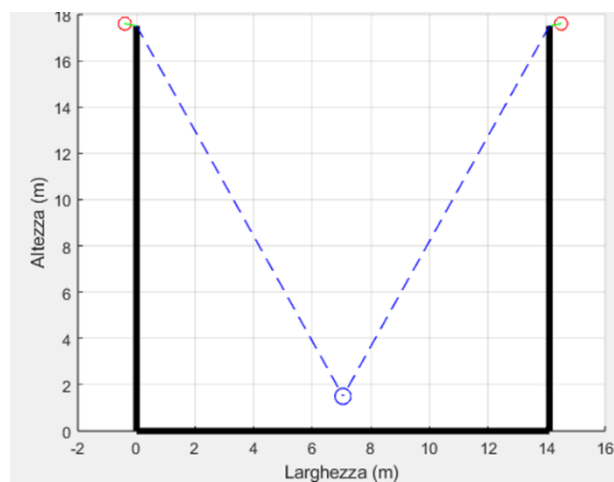
Caso di studio ID 1 – Canyon urbano cerchiato viola in fig. 25 – Configurazione A.II



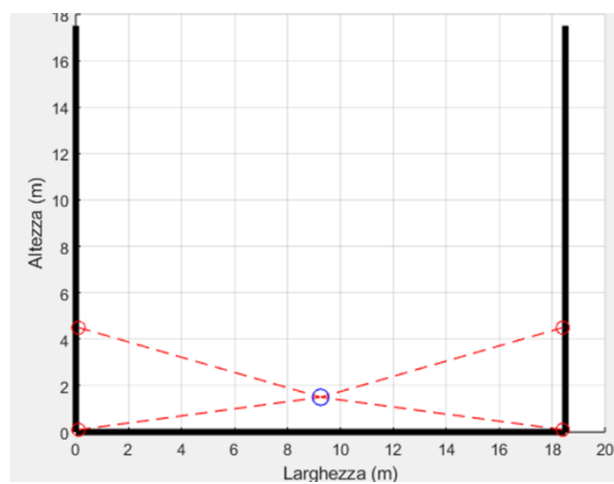
Caso di studio ID 1 – Canyon urbano cerchiato blu in fig. 25 – Configurazione A.I



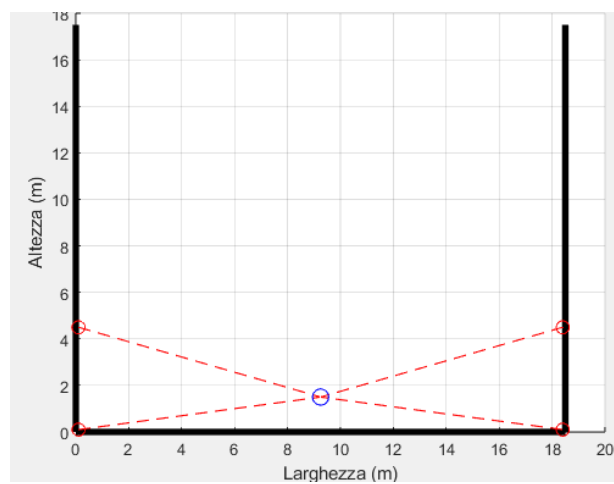
Caso di studio ID 1 – Canyon urbano cerchiato blu in fig. 25 – Configurazione A.II



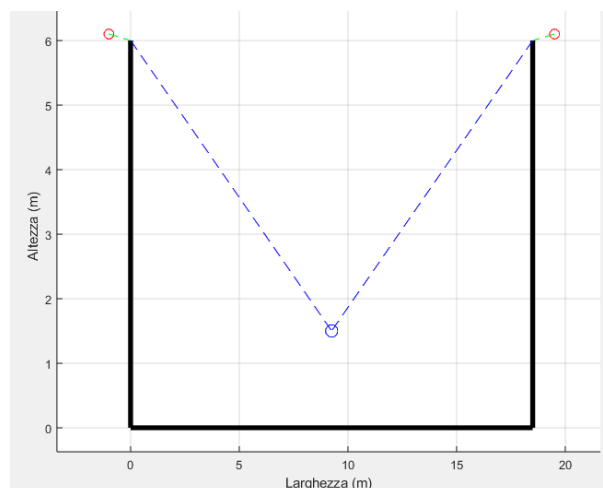
Caso di studio ID 1 – Canyon urbano cerchiato verde in fig. 25 – Configurazione B.II



Caso di studio ID 2 – Canyon urbano cerchiato giallo in fig. 25 – Configurazione A.I



Caso di studio ID 2 – Canyon urbano cerchiato giallo in fig. 25 – Configurazione A.II



Caso di studio ID 2 – Canyon urbano cerchiato giallo in fig. 25 – Configurazione B.II

Figura 26 – Vista prospettica (sinistra) e rappresentazione nel modello semplificato delle 10 combinazioni utilizzate per la validazione del modello semplificato.

Tabella 9 – Risultati della validazione per i 10 test effettuati: confronto tra valori di pressione sonora al ricevitore previsti dall'analisi numerica e i valori ottenuti dal modello analitico semplificato.

Test	Caso di studio	Config.	Canyon urbano	Range atteso da simulaz. numeriche (dB)	Risultato modello semplificato (dB)
1	ID 1	A.I	Rosso	50-55	53.1
2			Viola	50-55	52.8
3			Blu	45-50	50.0
4		A.II	Rosso	40-45	44.6
5			Viola	40-45	44.2
6			Blu	45-50	45.0
7		B.II	Verde	35-40	36.1
8	ID 2	A.I	Giallo	45-50	49.4
9		A.II	Giallo	40-45	40.8
10		B.II	Giallo	40-45	45.0

7.3.4 Commenti

L'utilità del modello semplificato è quella di fornire uno strumento a supporto delle prime fasi progettuali per interventi di installazione PdC a scala distrettuale, nelle quali può essere utile evidenziare situazioni critiche di impatto acustico sul paesaggio sonoro. Il modello consente di effettuare una serie di valutazioni sistematiche, variando i parametri geometrici del reticolo urbano, le configurazioni di installazione e le taglie delle PdC. A titolo di esempio, per mostrare le potenzialità del modello, si riportano i risultati del calcolo analitico per un canyon urbano con 6 PdC installate sul confine destro e 6 PdC installate sul confine sinistro del canyon. In figura 27 è mostrato l'andamento del livello di pressione sonora ottenuto in funzione della larghezza del canyon (per tre taglie di PdC significative) e in figura 28 lo stesso andamento in funzione della taglia della PdC (per quattro larghezze di canyon significative).

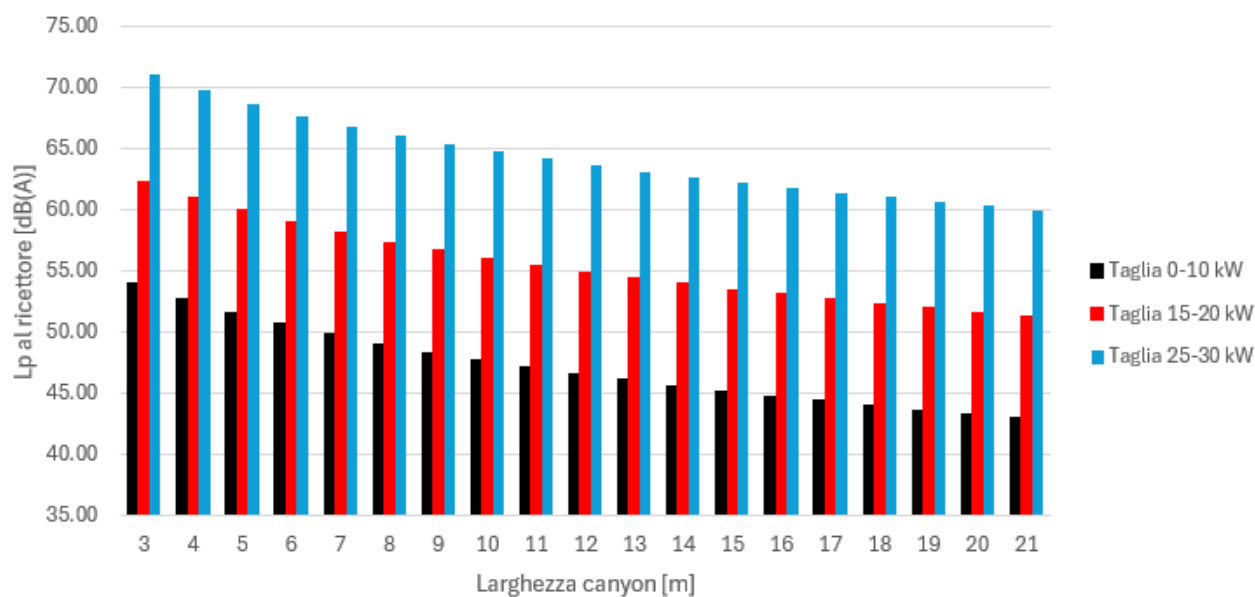


Figura 27 – Risultati del modello analitico: livello di pressione sonora in funzione della larghezza del canyon urbano per differenti taglie di PdC (le PdC presenti sono complessivamente 12, 6 sul confine destro e 6 sul confine sinistro, installate con passo in altezza di 3.5 m a partire da 0.1 m dalla superficie orizzontale inferiore del canyon).

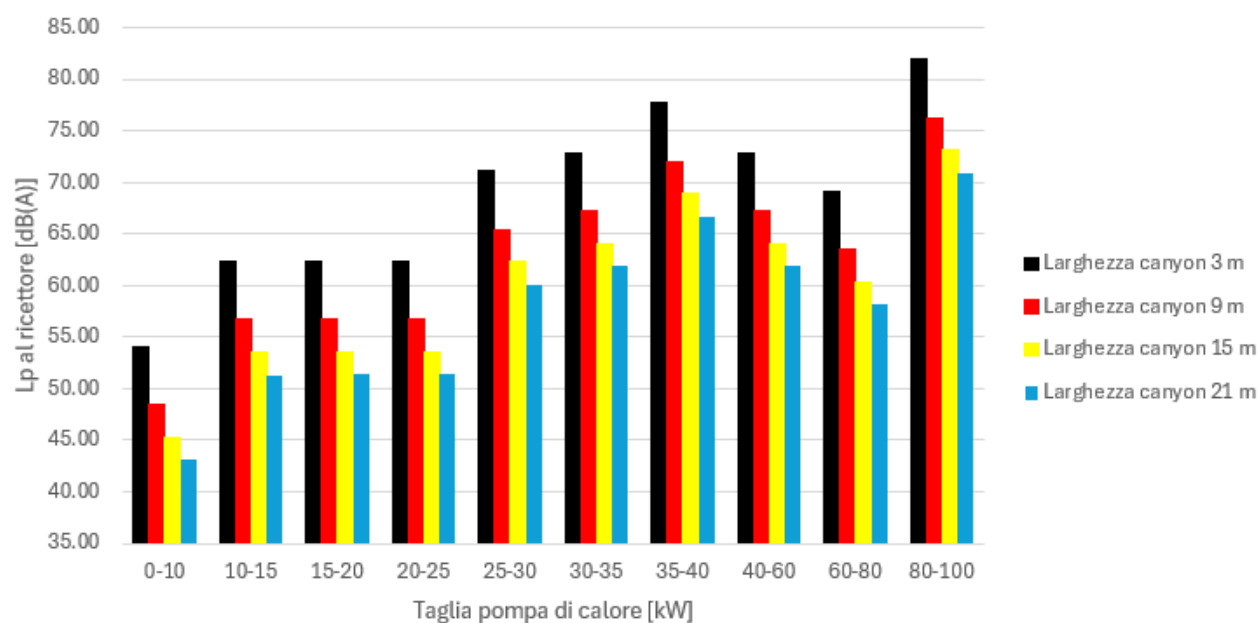


Figura 28 – Risultati del modello analitico: livello di pressione sonora in funzione della taglia delle PdC per differenti larghezze del canyon urbano (le PdC presenti sono complessivamente 12, 6 sul confine destro e 6 sul confine sinistro, installate con passo in altezza di 3.5 m a partire da 0.1 m dalla superficie orizzontale inferiore del canyon).

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

In conformità a quanto stabilito dall'accordo di collaborazione siglato tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (D.E.S.Te.C.) dell'Università di Pisa in data 12/01/2024, per la presente linea di attività (4.17), non erano previste consulenze per l'attività di ricerca condotta.

9 Pubblicazioni scientifiche

La disseminazione dei risultati ottenuti nella presente linea di attività è cominciata una volta conseguiti gli obiettivi fissati dall'accordo di collaborazione siglato tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (D.E.S.Te.C.) dell'Università di Pisa in data 12/01/2024.

In particolare, è stato preparato un articolo scientifico per la rivista *Data in Brief* (rivista open access E-ISSN:2352-3409, edita da Elsevier e indicizzata sulle principali banche dati di articoli scientifici), con titolo "Characterizing Noise Emissions from Heat Pumps in residential HVAC Systems: A Dataset for Urban Noise Propagation Modeling", autori: G. Salvadori, F. Leccese, L.A. Bisogno Bernardini, M. Pieve, R. Trinchieri (articolo in fase di sottomissione alla rivista).

Inoltre, è in via di completamento, la preparazione di un articolo scientifico per la Conferenza Internazionale "25th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering" (JULY 15 - 18 2025, Chania, Crete) dal titolo "Heat Pumps and Outdoor Environmental Quality: an assessment of the Impact of their extensive use on urban soundscape", G. Salvadori, F. Leccese, L.A. Bisogno Bernardini, M. Pieve, R. Trinchieri.

10 Eventi di disseminazione

In conformità a quanto stabilito dall'accordo di collaborazione siglato tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (D.E.S.Te.C.) dell'Università di Pisa in data 12/01/2024, per la presente linea di attività (4.17), non era prevista l'organizzazione diretta di eventi di disseminazione.

Tuttavia, presso l'Università di Pisa è stata organizzata una conferenza dal titolo *Frontiers of Energy Management and Technology Innovation 2023* (FEMTI 2023, <http://www.femti.ing.unipi.it>), tenutasi il giorno 31 marzo 2023. Nella manifestazione si è dato ampio risalto ai temi trattati dalla linea di attività, in particolare a quello di una transizione verso un uso estensivo delle pompe di calore in ambiente urbano, per la decarbonizzazione dell'edilizia. Tale aspetto si è concretizzato con due interventi ad invito

- Pompe di Calore per la transizione energetica: sfide e opportunità (Ing. M. Pieve, ENEA);
- Strumenti per la transizione energetica: pompe di calore e comunità energetiche (Prof. F. Fantozzi, Università di Pisa)

Inoltre, il personale dell'Università di Pisa coinvolto nelle attività di ricerca descritte nel presente report ha partecipato agli eventi di disseminazione (a carattere tecnico-scientifico) di seguito indicati. Gli eventi hanno interessato due temi oggetto delle attività di ricerca condotte, cioè la propagazione delle emissioni sonore, prodotte da sorgenti di carattere antropico, in ambiente urbano e la transizione verso un uso estensivo delle pompe di calore, per la decarbonizzazione dell'edilizia.

- Partecipazione alla conferenza internazionale *Forum Acusticum 2023 - 10th Convention of the European Acoustics Association, EAA 2023*, tenutasi a Torino dal 11 September 2023 al 15 September 2023.
- Partecipazione al convegno sulla EPBD IV dal titolo "Il ruolo della Ricerca e della Formazione nel percorso di decarbonizzazione nel settore degli edifici", tenutosi a Roma il 28 ottobre 2024, promosso dall'Associazione della Fisica Tecnica Italiana con il patrocinio di AiCARR.