



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**METODI PREVISIONALI DELLA RUMOROSITÀ DI MACCHINE A POMPA
DI CALORE**

PREDICTIVE METHODS OF NOISE FROM HEAT PUMP MACHINES

Relatore:

Ing. Fabio Serpilli

Correlatore:

Ing. Valter Lori

Tesi di laurea di:

Alessandro Vitali

A.A. 2019/2020

INDICE

INTRODUZIONE	2
CAPITOLO 1 – PROBLEMATICHE DI EMISSIONE ACUSTICA DI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE	3
1.1 <i>GRANDEZZE ACUSTICHE FONDAMENTALI</i>	3
1.1.1 <i>Pressione sonora</i>	3
1.1.2 <i>Potenza sonora</i>	3
1.1.3 <i>Intensità sonora</i>	4
1.2 <i>FATTORI DI INFLUENZA DELLA RUMOROSITA’</i>	5
1.3 <i>DESCRIZIONE E METODO DI MISURA DELLA PRESSIONE E POTENZA SONORA</i>	6
1.4 <i>QUADRO NORMATIVO</i>	7
1.4.1 <i>Eurovent certita certification</i>	7
1.4.2 <i>Requisiti relativi al livello di potenza sonora</i>	9
CAPITOLO 2 - INDAGINE DI MERCATO SULLA RUMOROSITA’ DI MACCHINE A POMPA DI CALORE	12
2.1 <i>DATI RACCOLTI</i>	12
2.2 <i>ANALISI DATI RANGE DI POTENZA PER SINGOLO MARCHIO</i>	16
CAPITOLO 3 – ANALISI CRITICA DEI DATI RACCOLTI	19
3.1 <i>ANALISI DI REGRESSIONE</i>	19
3.1.1 <i>Analisi dati esclusione LG</i>	22
3.2 <i>ANALISI DATI IN FREQUENZA</i>	25
CONCLUSIONI	34
GLOSSARIO	35
BIBLIOGRAFIA	36
RINGRAZIAMENTI	37

INTRODUZIONE

Le problematiche di tipo acustico, legate all'utilizzo di impianti per la climatizzazione degli edifici sono sempre più di maggiore importanza, sia per la crescente diffusione di questi macchinari, che per la progressiva presa d'atto dell'esistenza di ben specifiche disposizioni di legge in materia.

Lo scopo del lavoro è quello di archiviare e definire le relazioni tra diverse pompe di calore in funzione delle caratteristiche acustiche, svolgendo dapprima la raccolta di tutti i dati reperibili sul mercato dei prodotti certificati dal marchio Eurovent, il quale si impegna a garantire che un determinato prodotto soddisfi adeguati standard di qualità; successivamente sono state effettuate delle considerazioni di confronto a livello statistico.

CAPITOLO 1 – PROBLEMATICHE DI EMISSIONE ACUSTICA DI IMPIANTI DI CLIMATIZZAZIONE

1.1 GRANDEZZE ACUSTICHE FONDAMENTALI

La propagazione delle onde sonore comporta un trasferimento di energia meccanica da particella a particella, qualunque sia la sorgente che genera l'onda, la legge di conservazione dell'energia impone che in ogni istante tutta l'energia generata da quella sorgente possa essere ritrovata all'interno del sistema acustico considerato. In più si deve essere in grado di stabilire come e quanta energia fluisce nel tempo da una parte all'altra dello stesso sistema. Le grandezze fisiche [1] (oggettivamente misurabili) che forniscono questa descrizione sono:

- Intensità sonora
- Potenza sonora
- Livello di pressione sonora

1.1.1 Pressione sonora

La pressione sonora è l'ampiezza dell'onda di pressione, l'unità di misura è il Pascal, nonostante si ricorra spesso alla scala logaritmica (avente come unità di misura il dB) che esprime invece propriamente il livello di pressione sonora. Il livello di pressione sonora (SPL) o livello sonoro è una misura logaritmica della pressione sonora efficace di un'onda meccanica rispetto ad una sorgente sonora di riferimento.

$$L_p=20*\text{Log } P/P_0 \text{ [dB]}$$

Dove la pressione sonora di riferimento $P_0=1000\text{Hz}$.

1.1.2 Potenza sonora

Immaginando che tutta l'energia sonora che fluisce nel mezzo sia prodotta da una sola sorgente, l'energia irradiata nell'unità di tempo rappresenterà la sua potenza sonora, si misura in Watt. Analogamente a quanto si è fatto per l'intensità sonora, si può definire il livello di potenza sonora di una sorgente come:

$$L_w=10*\text{Log } W/W_0 \text{ [dB]}$$

dove la potenza sonora $W_0=10^{-12}$

1.1.3 Intensità sonora

L'intensità di un'onda è definita come la quantità di energia che fluisce, nell'unità di tempo, attraverso una superficie di area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. L'unità di misura è il Watt al metro quadro:

$$I=P/S \text{ [W/m}^2\text{]}$$

L'orecchio umano è in grado di percepire intensità acustiche che variano in un intervallo molto grande. Vista l'ampia escursione delle intensità acustiche dei suoni udibili, si utilizza convenzionalmente una scala logaritmica (che possiede come punto di riferimento il valore della soglia di udibilità) definita livello di intensità acustica (Intensity Level, IL), o livello sonoro, spesso misurata in decibel:

$$I=10*\text{Log } I/I_0 \text{ [dB]}$$

1.2 FATTORI DI INFLUENZA DELLA RUMOROSITA'

In seguito si prende in esame il comportamento sonoro di gruppi frigoriferi maggiormente diffusi sul mercato.

I gruppi refrigeratori sono prodotti in un campo di potenze molto ampio, utilizzando tipologie di compressori e ventilatori sensibilmente diverse tra loro.

Su alcuni modelli di piccola capacità sono anche utilizzati dei compressori di tipo rotativo, mentre su macchine di tipo industriale si possono trovare compressori alternativi e a vite di tipo aperto.

I gruppi refrigeratori differiscono tra loro, non solo dal tipo di refrigerante utilizzato che va dal R-32 al R-410A per le macchine più recenti equipaggiate con compressori scroll, ma anche per quanto riguarda i regimi di velocità, i quali possono variare ampiamente.

I ventilatori, a loro volta, nelle macchine condensate ad aria, sono realizzati in esecuzioni differenti, sebbene la maggior parte siano di tipo elicoidale.

Il comportamento sonoro dei gruppi frigoriferi varia, quindi, a seconda del tipo di tecnologia utilizzata, nonché dal principio di funzionamento, ovvero se la macchina lavora a riscaldamento o a raffreddamento.

Nell'analisi del comportamento sonoro di un qualsiasi gruppo frigorifero vi sono diversi aspetti da tenere in considerazione, a seconda della destinazione prevista dalla macchina e delle caratteristiche del sito di installazione:

- Il livello di potenza e di pressione sonora complessivo (nel secondo caso a una distanza di riferimento unificata), determinato secondo le prescrizioni della normativa vigente;
- Le caratteristiche dello spettro sonoro per bande d'ottava che, a parità di livello di pressione sonora può differire da una macchina all'altra;
- La direzione dell'emissione sonora della macchina.

Di particolare interesse è il "picco sonoro" che può svilupparsi nella fase di avviamento della macchina, equiparabile entro certi limiti ad un rumore impulsivo, e che può recare particolare fastidio, ad esempio, nelle ore notturne.

Un'altra sorgente di rumore è costituita dalla scocca in lamiera della struttura della

macchina che può essere posta in vibrazione ed emettere a sua volta ulteriore energia sonora.

1.3 DESCRIZIONE E METODO DI MISURA DELLA PRESSIONE E POTENZA SONORA

Una caratteristica di notevole importanza è il livello di potenza sonora che può essere rilevata dal costruttore attraverso particolari test sonori. Questo è un parametro fisso della macchina che dipende dal regime di funzionamento e non può essere modificato per cause esterne. La potenza sonora non può essere percepita direttamente, essa può essere ricavata attraverso una metodologia di misura del livello di pressione sonora con l'utilizzo del fonometro e corrisponde a quella quantità di energia che viene emessa da un climatizzatore durante il funzionamento. Viene misurata in decibel e non è soggetta ad alterazioni di nessun tipo, quindi il dato rilevato diventa un valore paragonabile tra i differenti climatizzatori, senza margini di errore, con il quale si può determinare qual è il più silenzioso.

Il livello di pressione sonora, invece, è utilizzato come descrittore dell'ambiente sonoro così come viene percepito dall'orecchio umano. A differenza del livello di potenza sonora, esso può essere influenzato da numerosi fattori esterni: la distanza tra la sorgente sonora e il ricevitore, eventuali superfici riflettenti, effetti dell'atmosfera, altezza del fonometro dal suolo.

La misura sonora può essere eseguita all'esterno, in condizioni di campo libero, o all'interno di una camera dalle seguenti caratteristiche: riverberante, anecoica o semi-anecoica, predisposta in modo tale che la macchina possa funzionare alle condizioni specificate.

Di solito le prove sono effettuate all'interno di una camera anecoica e i dati sonori sono espressi come i livelli di pressione o di potenza sonora in bande di ottava nel campo che va da 63Hz a 8000Hz.

Il livello sonoro, espresso in decibel ponderato in scala A (dBA), è un descrittore impiegato per la valutazione del rumore che ben si avvicina alla caratteristica di

sensibilità dell'orecchio umano, al punto che è largamente impiegato soprattutto per stabilire dei limiti di livello sonoro all'esterno, secondo le prescrizioni di legge e normative sul rumore.

1.4 QUADRO NORMATIVO

1.4.1 Eurovent certita certification

Eurovent certita certification (ECC), in qualità di organismo di certificazione, si impegna a redigere standard tecnici che garantiscono un adeguato livello di qualità dei prodotti.



Fig. 1.4.1 Logo Eurovent Certita Certification

Questo marchio fa riferimento alla direttiva generale europea 813/2013 [2] per quanto riguarda la certificazione della rumorosità delle pompe di calore aventi capacità termica nominale fino a 400kW, la quale definisce anche le norme di utilizzo dell'Energy Label.

L'entrata in vigore dell'Energy Label per l'etichettatura energetica dei climatizzatori, ha imposto il cambiamento di parecchi dei metodi precedentemente utilizzati, per valutarne i dati tecnici, ed anche l'obbligo di dichiarare altre specifiche precedentemente omesse.

Uno di questi obblighi è quello di indicare la potenza sonora sia nella parte esterna, che è quella presa in esame in questo lavoro, e di quella interna, split. Con la vecchia normativa il dato della rumorosità non veniva indicato sull'etichetta energetica, in quanto non obbligatorio, ma quasi sempre nei cataloghi, almeno

delle migliori marche, i dati venivano riportati molto chiaramente, ed anzi per alcune aziende rappresenta, tutt'ora, un punto cardine da mettere in evidenza per l'assoluta silenziosità.

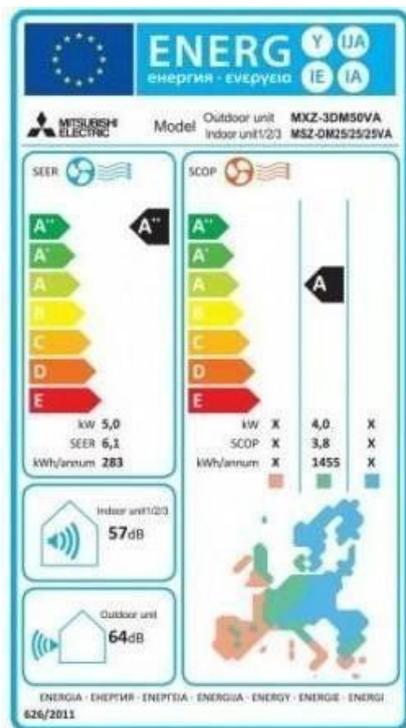


Fig. 1.4.2 Energy Label -MITSUBISHI ELECTRIC-

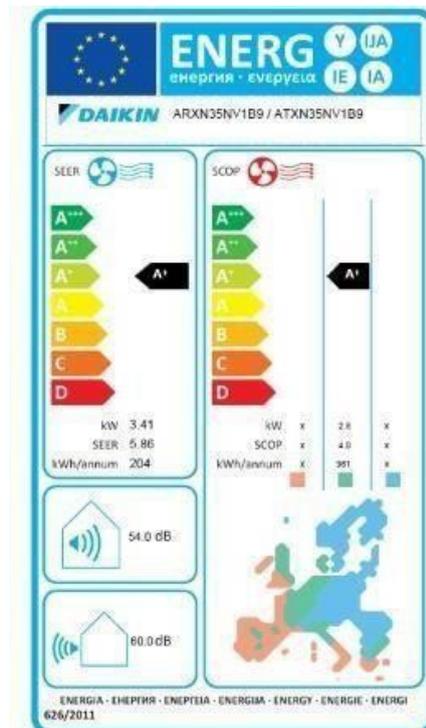


Fig. 1.4.3 Energy Label -DAIKIN-

Quello che cambia in questo momento non è però soltanto la dichiarazione obbligatoria, ma anche l'unità di misura imposta. Comunemente veniva dichiarata soltanto la pressione sonora, mentre la nuova regolamentazione ha imposto l'utilizzo della potenza sonora, in quanto con la pressione sonora accade che il rilevamento del rumore, condizionato da diversi elementi, può restituire dei risultati differenti da quanto dichiarato.

1.4.2 Requisiti relativi al livello di potenza sonora

Il regolamento N. 813/2013 della commissione europea, riguardante norme per la progettazione ecocompatibile degli apparecchi per il riscaldamento d'ambiente e degli apparecchi di riscaldamento misti, stabilisce i valori limite di livello di potenza sonora che un macchinario deve avere. Il regolamento n. 813/2013 individua quattro fasce di potenza termica nominale a quali corrispondono i seguenti livelli di potenza sonora, all'interno e all'esterno, riportati in tabella:

Potenza termica nominale $\leq 6\text{kW}$		Potenza termica nominale $> 6\text{kW}$ e $\leq 12\text{kW}$		Potenza termica nominale $> 12\text{kW}$ e $\leq 30\text{kW}$		Potenza termica nominale $> 30\text{kW}$ e $\leq 70\text{kW}$	
Livello di potenza sonora (L_{wA}) all'interno	Livello di potenza sonora (L_{wA}) all'esterno	Livello di potenza sonora (L_{wA}) all'interno	Livello di potenza sonora (L_{wA}) all'esterno	Livello di potenza sonora (L_{wA}) all'interno	Livello di potenza sonora (L_{wA}) all'esterno	Livello di potenza sonora (L_{wA}) all'interno	Livello di potenza sonora (L_{wA}) all'esterno
60 dB	65 dB	65 dB	70 dB	70 dB	78 dB	80 dB	88 dB

Tab 1.4.1 – Valori limite di livello di potenza sonora del range di potenza termica nominale

Per macchinari di potenza superiore a 70 kW non è definita nessuna soglia del livello di potenza sonora.

Questa direttiva europea fa riferimento al programma di certificazione AFNOR NF414 [3], dove sono indicate le normative di riferimento per la procedura di misura:

- **EN ISO 12102-1:2017**[4], “*Air conditioners, liquid chilling packages, heat pumps, process chillers and dehumidifiers with electrically driven compressors*
 - *Determination of the sound power level - Part 1: Air conditioners, liquid chilling packages, heat pumps for space heating and cooling, dehumidifiers and process chillers*”.

La presente norma europea stabilisce i requisiti per la determinazione,

secondo una procedura standardizzata, del livello di potenza sonora emesso dai condizionatori d'aria, dalle pompe di calore, dai pacchetti di refrigerazione per liquidi con compressori azionati elettricamente, dai deumidificatori, dai condizionatori d'aria a condensazione raffreddati per evaporazione, come descritto nella serie EN 14511 e EN 810.

Si sottolinea che questa norma di misurazione si riferisce solo al rumore aereo.

- **UNI EN ISO 3741:2010[5]**, *“Acustica - Determinazione dei livelli di potenza sonora e dei livelli di energia sonora delle sorgenti di rumore mediante misurazione della pressione sonora - Metodi di laboratorio in camere riverberanti”*.

La norma specifica i metodi, quello diretto e per confronto, per la determinazione del livello di potenza sonora o del livello di energia sonora di una sorgente di rumore mediante misurazione della pressione sonora in camera riverberante. Il livello di potenza sonora (o, nel caso di emissione di un rumore impulsivo o transitorio, il livello di energia sonora), prodotta da una sorgente sonora in bande di terzo di ottava, è calcolato utilizzando quelle misurazioni comprendenti correzioni che tengano conto di ogni differenza tra le condizioni meteorologiche al momento e nel luogo di prova e quelle corrispondenti a un'impedenza caratteristica di riferimento. In genere l'intervallo di frequenza comprende bande di terzo di ottava con le frequenze nella banda centrale da 100 Hz a 10 000 Hz. I metodi specificati nella norma sono applicabili a qualsiasi tipo di rumore (continuo, discontinuo, fluttuante, e impulsivo (o impulsi isolati di energia sonora, ecc.), così come definito nella UNI EN ISO ISO 12001. La sorgente sonora in esame può essere un dispositivo, una macchina, un componente o un elemento da assemblare. La norma si applica a sorgenti di rumore il cui volume non sia maggiore del 2% di quello della camera riverberante.

- **UNI EN ISO 9614-1:2009[6]**, *“Acustica - Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante il metodo intensimetrico - Parte 1: Misurazione per punti discreti”*.

La norma prescrive un metodo per la misurazione della componente dell'intensità sonora normale a una superficie di misurazione scelta in modo da racchiudere la sorgente di rumore di cui si deve determinare il livello di potenza sonora per poter calcolare il livello di potenza sonora per banda di ottava, di terzo di ottava o il valore ponderato su un numero limitato di bande.

Gli standard internazionali riguardo ai metodi per la determinazione dei livelli di potenza sonora per i macchinari sono i seguenti:

- La misurazione viene effettuata all'aperto o in grandi stanze su piani riflettenti.
- La distanza di misurazione deve essere inferiore ai 15 metri (solitamente si utilizzano distanze standardizzate di 1, 1,5 o 10 metri).
- Livello di potenza sonora ponderato A e bande d'ottava (in casi particolari si possono usare anche bande di un terzo d'ottava).
- Altre informazioni facoltative possono essere i dati sulla direttività e livelli di pressione sonora in funzione del tempo.

Affinché la misura possa ritenersi valida, ci sono delle condizioni di misurazione prestabilite, in modo da poter rendere confrontabili i valori ottenuti.

Durante le misurazioni l'apparecchiatura deve funzionare a regime alla potenza di progetto.

Nel periodo di misurazione deve essere eliminato il rumore non direttamente derivante dalle apparecchiature sottoposte alla prova, oppure deve essere considerato separatamente come rumore di sottofondo.

Quando si effettuano le misurazioni in campo libero si deve tenere conto della velocità del vento, la si deve annotare nel verbale di prova e non deve essere superiore a 5 m/s. La superficie deve essere sistemata in modo che tutte le posizioni di misurazione abbiano approssimativamente lo stesso livello di pressione sonora (differenza inferiore a 5 dBA).

CAPITOLO 2 - INDAGINE DI MERCATO SULLA RUMOROSITA' DI MACCHINE A POMPA DI CALORE

2.1 DATI RACCOLTI

I dati sonori, raccolti su un campione di circa 850 modelli di diverse macchine ai quali si fa riferimento, sono stati ottenuti da costruttori tra i più qualificati sul mercato:

- AERMEC
- CARRIER
- CLIVET
- DAIKIN
- HITACHI
- LG
- MITSUBISHI
- ELECTRIC
- MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES
- OLIMPIA SPLENDID
- TOSHIBA

Per effettuare delle analisi comparative tra i modelli, sono state raggruppati i prodotti in quattro gruppi a diversi range di potenza, in funzione della capacità nominale in riscaldamento:

- Range: 1.5 - 10 kW
- Range: 10.1 - 25 kW
- Range: 25,1 - 200 kW
- Range: 200+ kW

Nella tabella seguente è definito, per dato range di potenza, il numero di macchinari che è stato analizzato per ogni marca:

MARCA	RANGE	RANGE	RANGE	RANGE
	1,5-10 kW	10,1-25 kW	25,1-200 kW	200+ kW
AERMEC	55	39	60	48
CARRIER	6	8	55	14
CLIVET	19	14	46	0
DAIKIN	33	2	25	0
HITACHI	28	10	28	0
LG	28	14	36	13
MITSUBISHI E.	44	11	23	0
MITSUBISHI H.I.	21	0	27	0
OLIMPIA SPLENDID	9	5	0	0
TOSHIBA	68	7	27	0
TOTALE	311	110	327	75

Tab. 2.1.1 - Campionatura dei modelli sotto esame

Per avere un riscontro visivo immediato, si può osservare il grafico qua sotto:

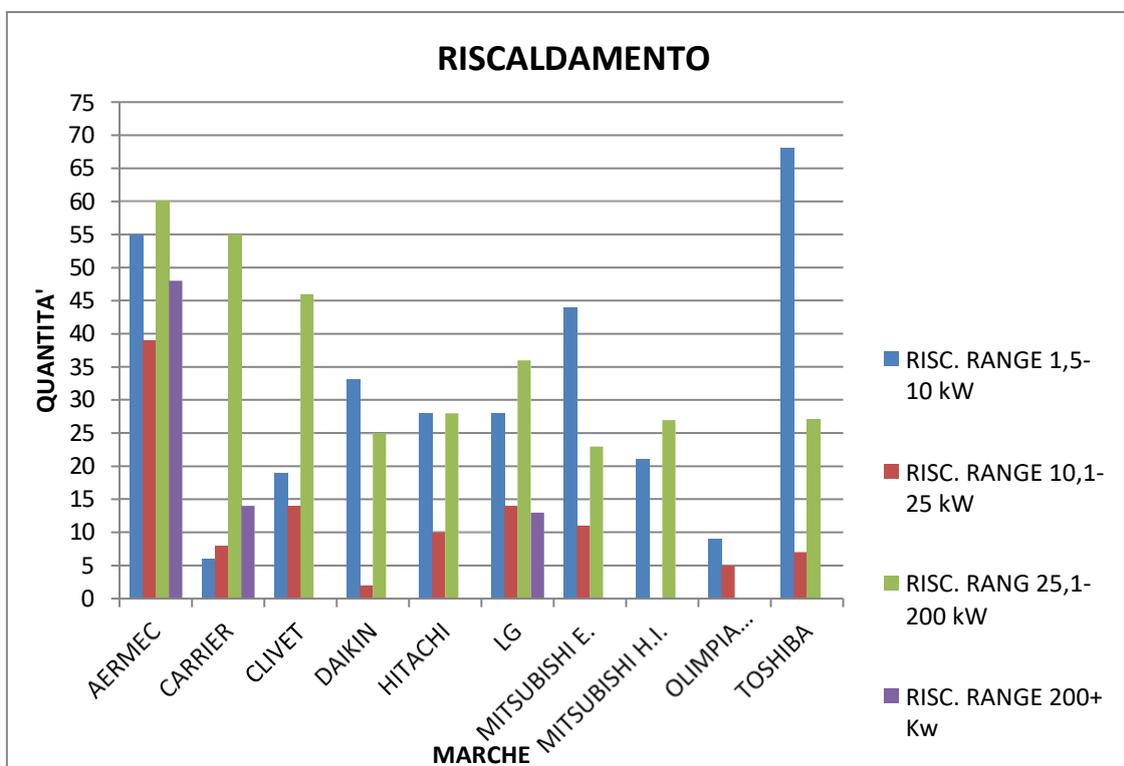


Fig. 2.1.1 – Riferimento a Tab. 2.1.1

È bene anzitutto fare un'osservazione riguardo alla qualità dei dati di emissione acustica forniti dai vari costruttori.

I cataloghi analizzati risultano spesso molto dettagliati riguardo alle prestazioni, alle caratteristiche elettriche e idrauliche, alle dimensioni e ai pesi, alle caratteristiche estetiche del prodotto, mentre nel 25–30% dei casi non vengono forniti, nella documentazione tecnica corrente, i dati di emissione acustica, nonostante siano anche stati richiesti tramite contatto con le aziende. In molti casi, viene fornito solamente il livello di pressione sonora, ponderato A, misurato ad una certa distanza dalla macchina.

Questo parametro, da solo, è insufficiente ai fini di una corretta previsione di impatto acustico: esso permette solamente un confronto tra due macchine diverse, posto che, per entrambe, questa grandezza sia riferita alla medesima distanza (e metodologia) di misura. Oltre all'insufficienza di questo parametro ci si è trovati inoltre di fronte a scelte arbitrarie da parte dei costruttori: le distanze di misura osservate risultano pari a 1 m, 1,5 m, 2m, 4 m, 5m oppure 10 m.

Una scelta inadeguata della distanza di misura del livello di pressione sonora può rendere inapplicabile il calcolo del livello di potenza sonora prodotto dalla macchina stessa effettuato secondo la legge dell'attenuazione per divergenza.

È noto infatti che tale procedura è applicabile solo nel caso che la sorgente sonora possa essere considerata "puntiforme" rispetto al punto di misura del livello di pressione sonora, ovvero per una distanza dalla sorgente convenientemente multipla (almeno tre o quattro volte) della dimensione caratteristica (o della massima dimensione) della macchina stessa.

Lo spettro in banda di ottava del livello di potenza sonora viene fornito solamente nella misura del 40% dell'indagine, come descritto nel seguente grafico a torta:

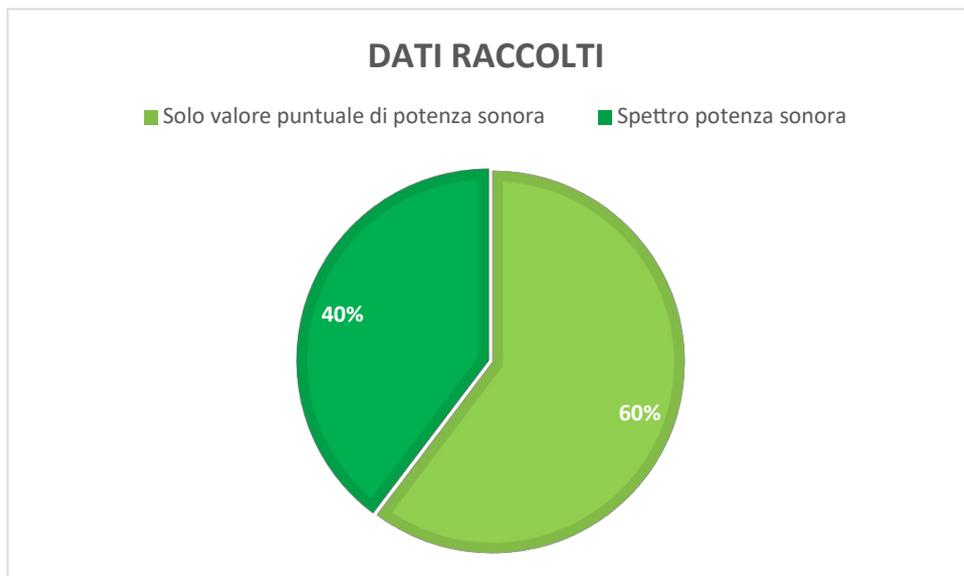


Fig. 2.1.2 Grafico a torta – Dati raccolti

Quindi si porrà l'attenzione su quel 40% di macchinari per fare l'analisi in frequenza. Successivamente si è suddiviso questo 40% di macchinari a seconda se lo spettro di banda di ottava del livello di potenza sonora, che viene fornito dai manuali tecnici, è solo riferito al funzionamento in raffreddamento, in riscaldamento o in entrambi i casi:

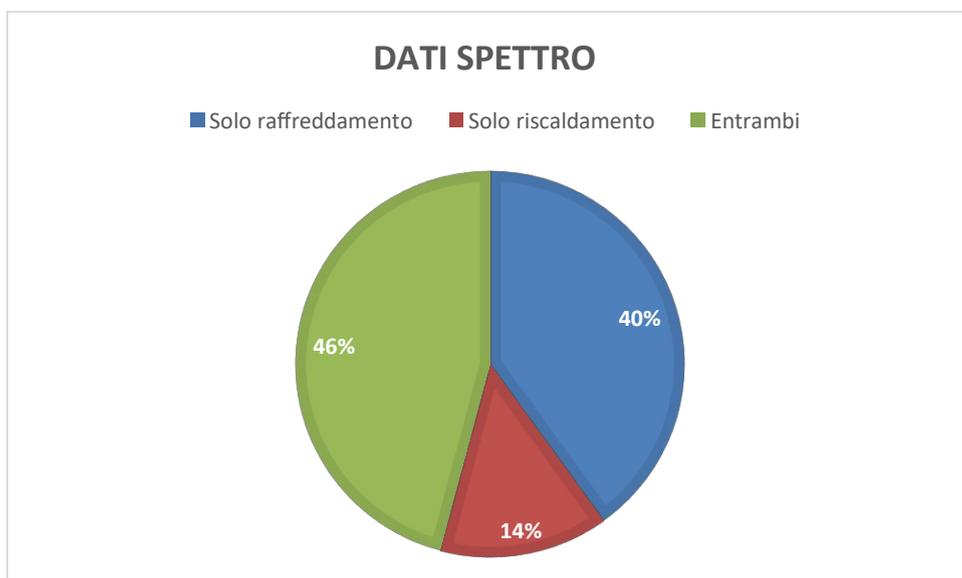


Fig. 2.1.3 Grafico a torta – Dati spettro Potenza Sonora

2.2 ANALISI DATI RANGE DI POTENZA PER SINGOLO MARCHIO

Alla luce delle considerazioni emerse in 2.1, si è proceduto all'ulteriore suddivisione considerando nel dettaglio la potenza nominale associate al macchinario. In altre parole si fornisce il dato percentuale tale per cui il modello di generatore avrà determinate caratteristiche meccaniche ed energetiche.

Di seguito l'analisi basata ancora una volta sul range di potenza e la modalità di funzionamento, in questo caso però suddivisa per singolo marchio, in modo da avere le percentuali di ogni marca:

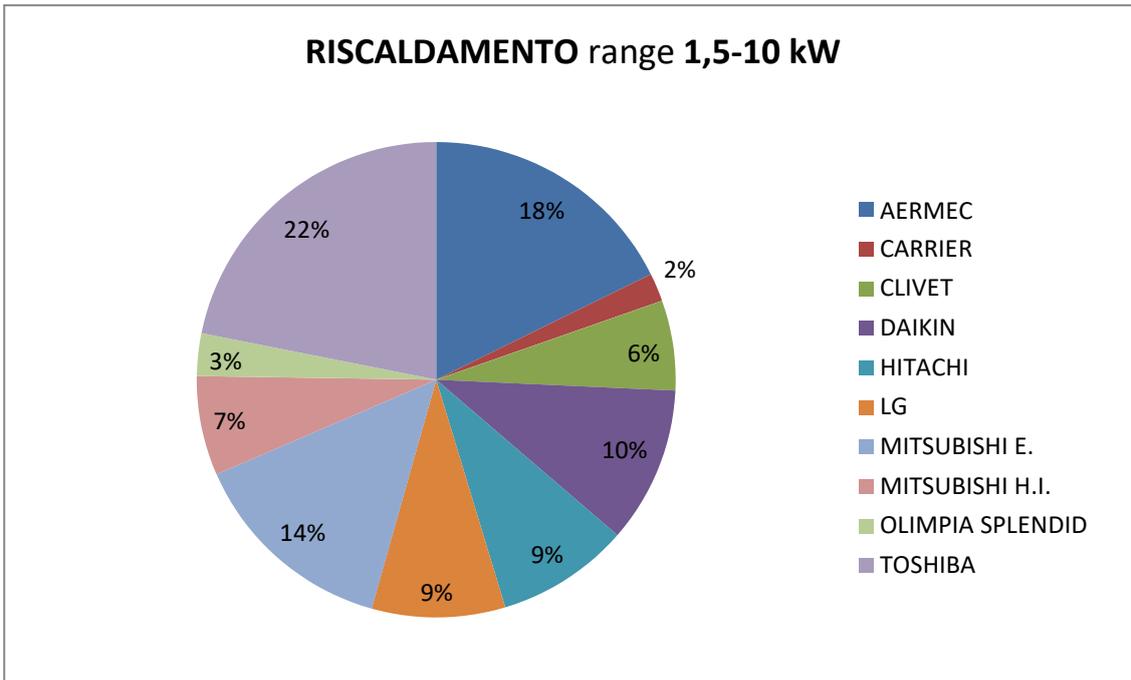


Fig. 2.2.1 Grafico a torta – Riscaldamento range 1,5-10 kW

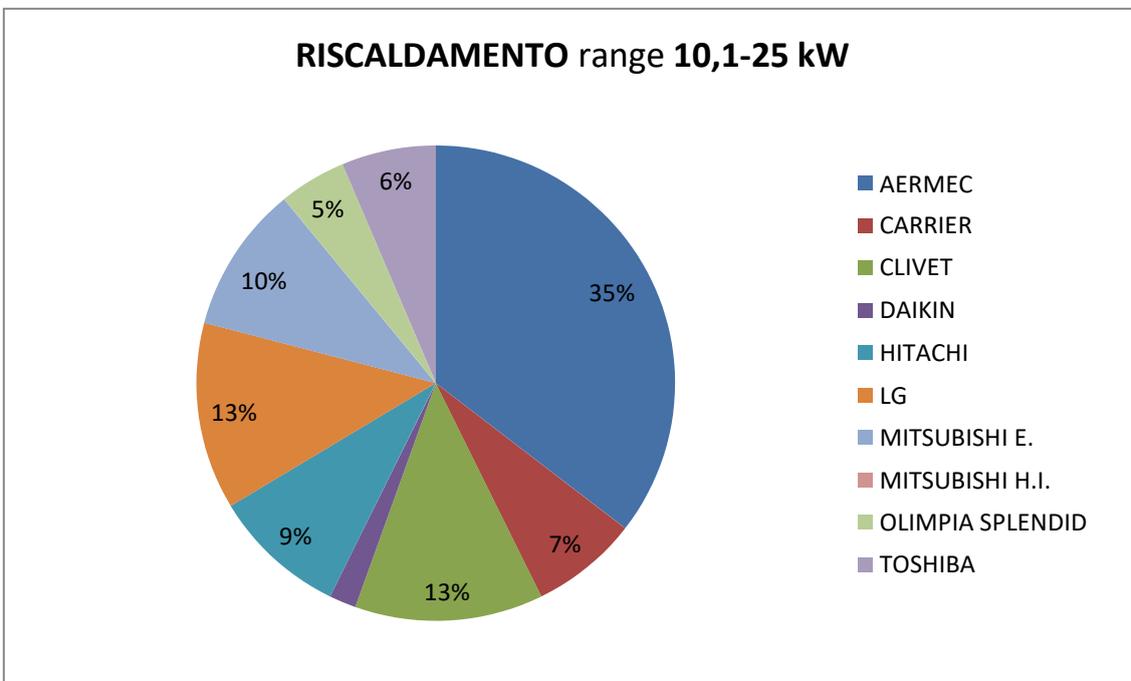


Fig. 2.2.2 Grafico a torta – Riscaldamento range 10,1-25 kW

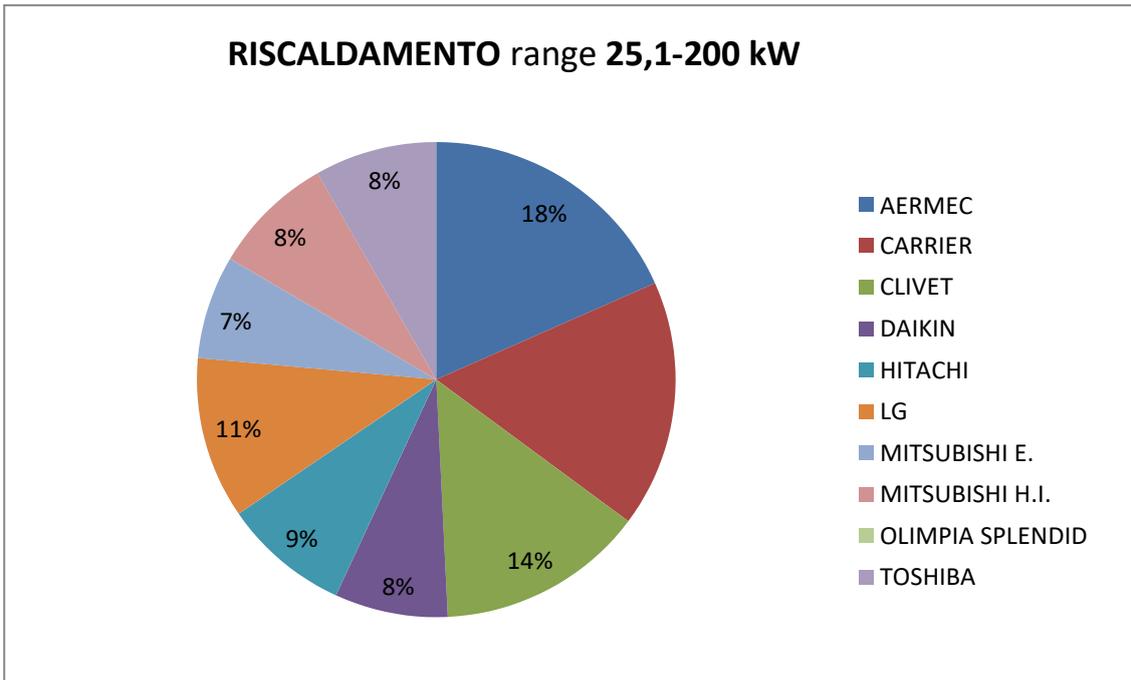


Fig. 2.2.3 Grafico a torta – Riscaldamento range 25,1-200 kW

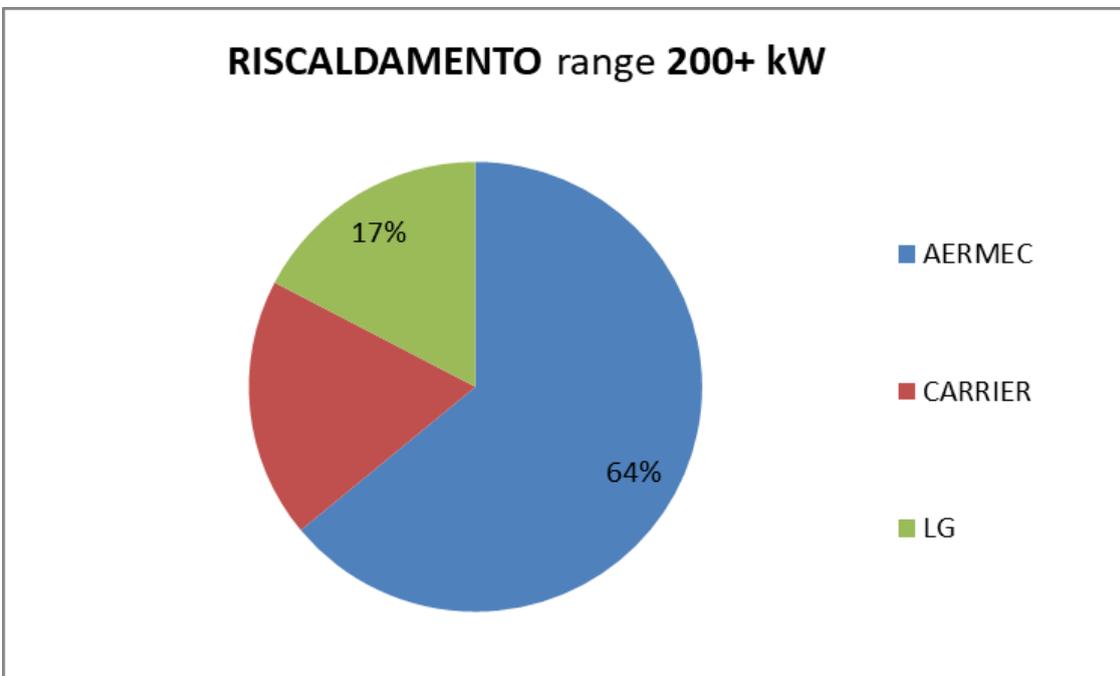


Fig. 2.2.4 Grafico a torta – Riscaldamento range 200+ kW

CAPITOLO 3 – ANALISI CRITICA DEI DATI RACCOLTI

3.1 ANALISI DI REGRESSIONE

Alla luce dei dati raccolti, si è proceduto con l'effettuare una prima analisi del dataset. Ciò ha portato all'identificazione di parametri utili alla nostra ricerca, quali: Potenza Sonora [dBA], Pressione Sonora [dBA], Potenza Nominale di emissione [kW] ed infine Capacità Nominale di raffreddamento e riscaldamento.

Per effettuare l'analisi di regressione sono stati messi a confronto tutti i modelli precedentemente descritti e soprattutto selezionati per marca e prestazioni meccaniche.

In ogni caso le modalità di raffreddamento e di riscaldamento per quanto riguarda l'emissione sono state considerate con maggiore attenzione.

Nei grafici a seguire si definiscono le correlazioni basate sull'analisi di regressione, la quale sfrutta una curva logaritmica di grado uno e di gradi di libertà due.

Il modello matematico sfrutta l'equazione:

$$Y=A*\ln(X)+B$$

Dove A e B sono i coefficienti di regressione.

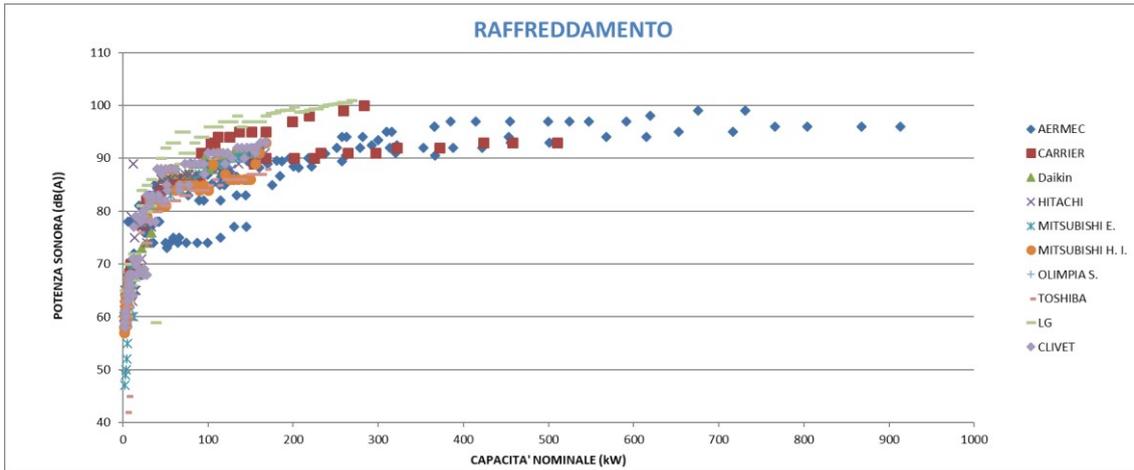


Fig. 3.1.1 Grafico a dispersione – Raffreddamento: Capacità Nominale/Potenza Sonora

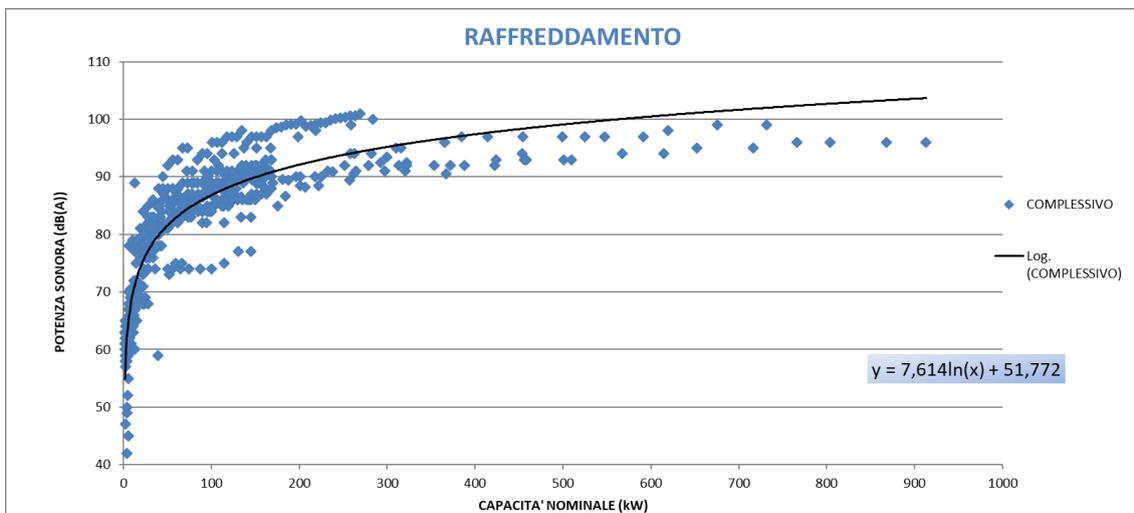


Fig. 3.1.2 Grafico a dispersione – Raffreddamento Linea di Tendenza e Formula Applicativa:
Capacità Nominale/Potenza Sonora

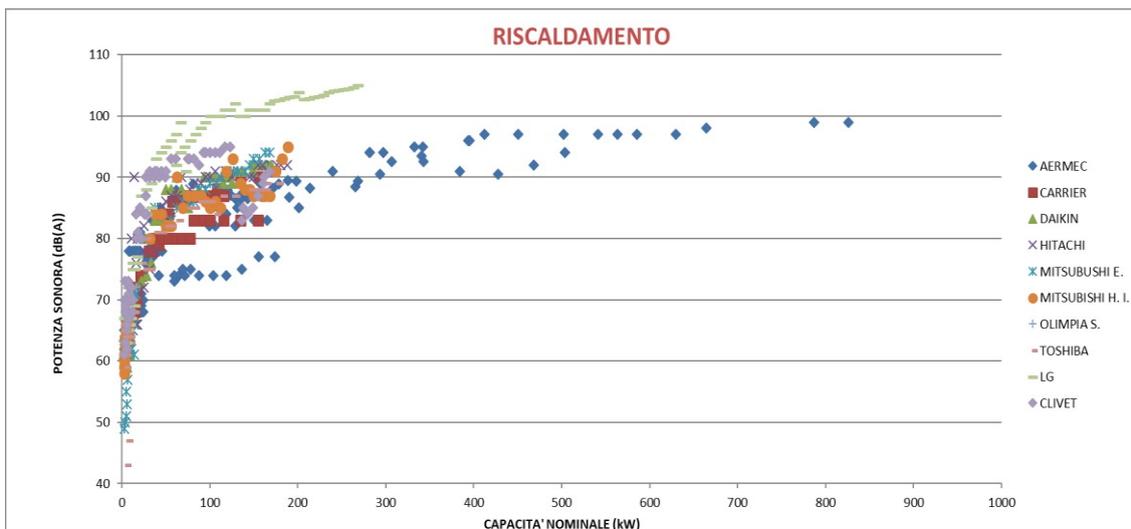


Fig. 3.1.3 Grafico a dispersione – Riscaldamento: Capacità Nominale/Potenza Sonora

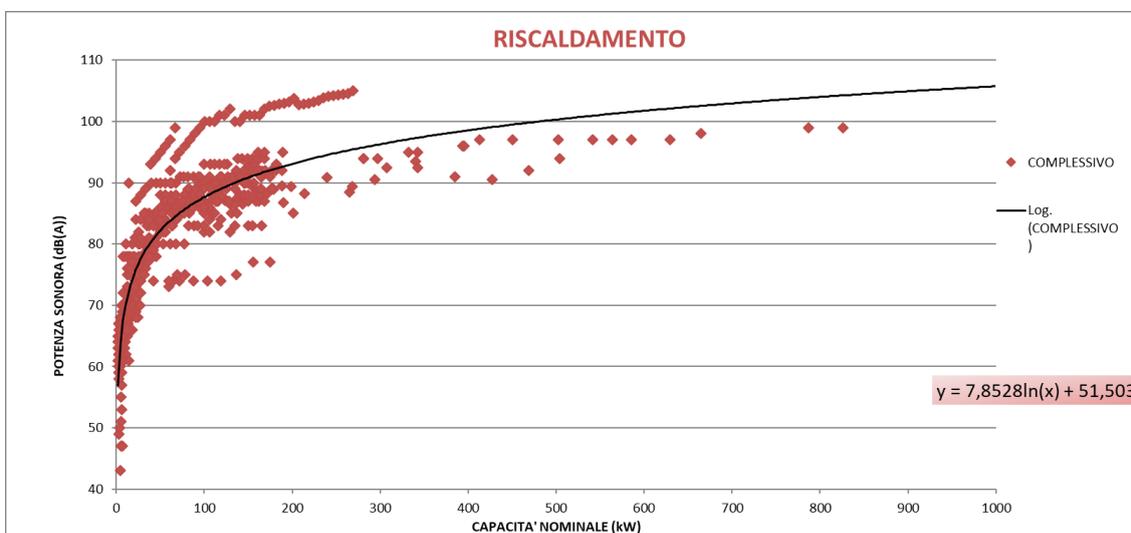


Fig. 3.1.4 Grafico a dispersione – Riscaldamento Linea di Tendenza e Formula Applicativa: Capacità Nominale/Potenza Sonora

Dai grafici ottenuti si riscontra un andamento più o meno simile per tutte le marche ad eccezione della LG che si discosta dalle altre. È stata posta in evidenza la linea di tendenza applicata con opzione logaritmica del primo ordine. Le formule ricavate sono del tipo:

$$Lw = A * \ln (Pw) + B$$

Dove:

- Per il raffreddamento A= 7,61 e B=51,77
- Per il riscaldamento A=7,85 e B=51,50

3.1.1 Analisi dati esclusione LG

Come descritto in precedenza, il marchio LG si discosta dagli altri, perciò si è deciso di proporre nuovi grafici con le stesse caratteristiche dei precedenti, ma escludendo quest'ultimo marchio:

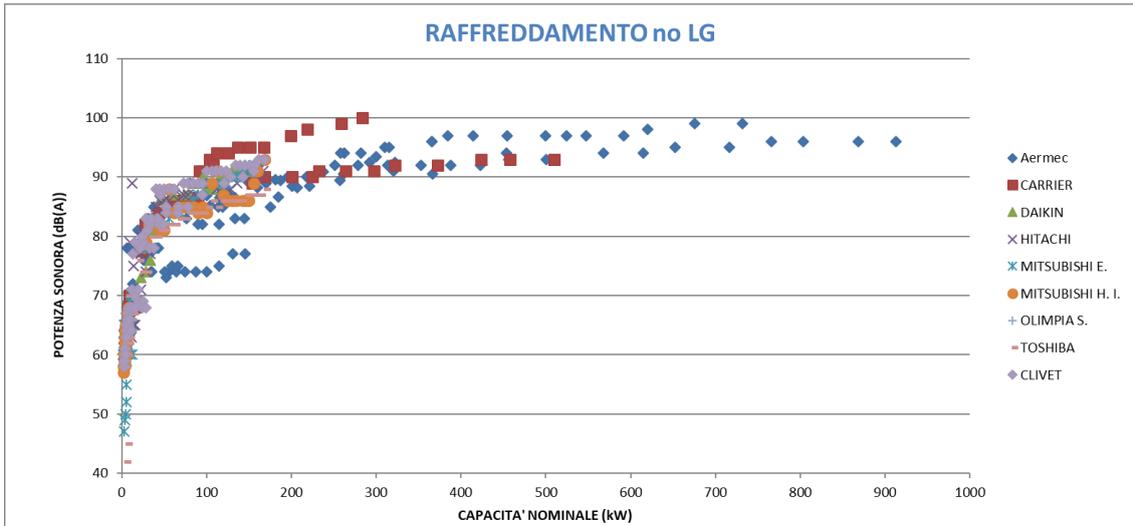


Fig. 3.1.5 Grafico a dispersione – Raffreddamento Esclusione LG: Capacità Nominale/Potenza Sonora

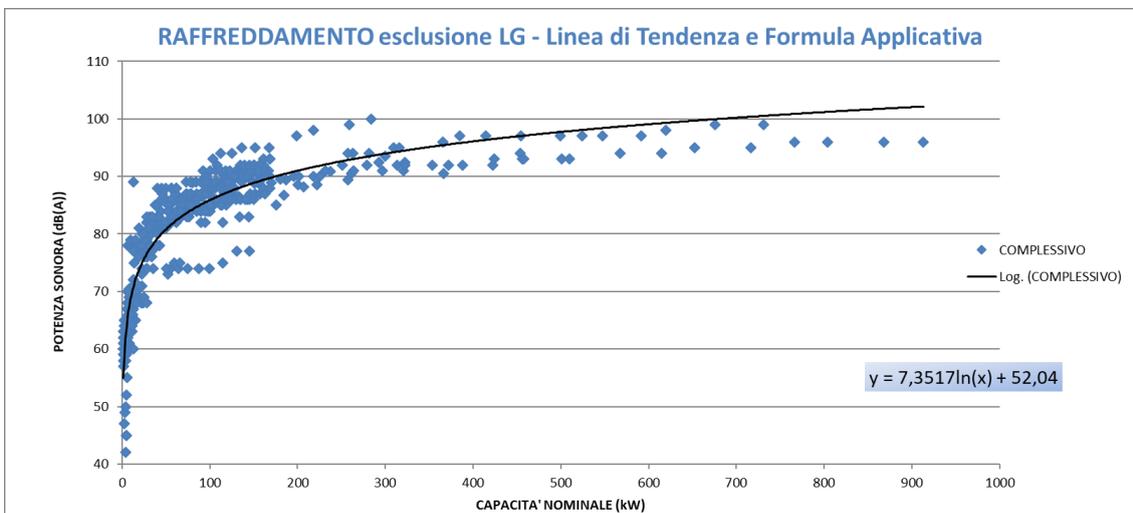


Fig. 3.1.6 Grafico a dispersione – Raffreddamento Esclusione LG Linea di Tendenza e Formula Applicativa: Capacità Nominale/Potenza Sonora

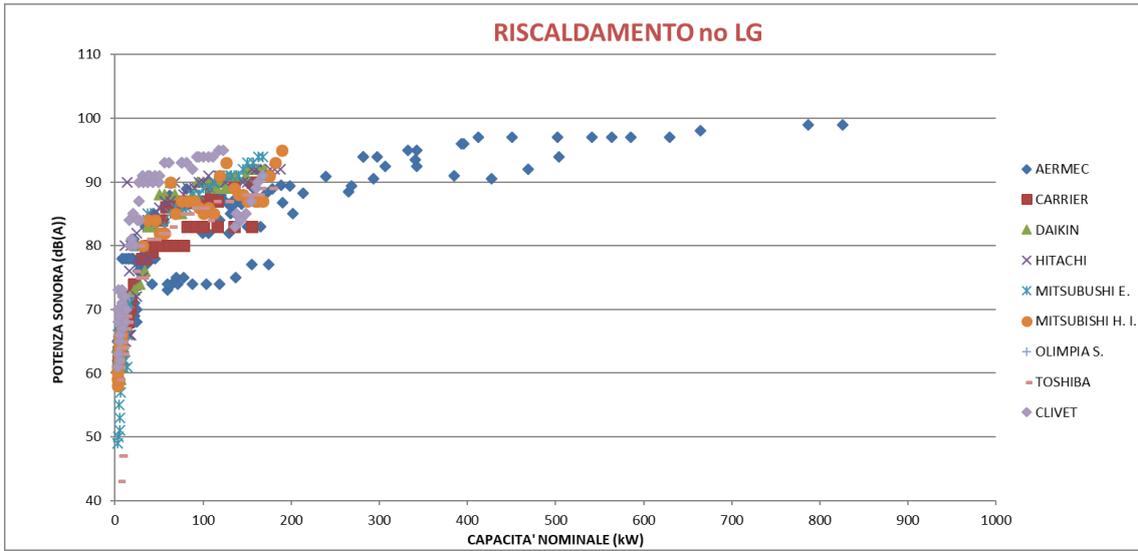


Fig. 3.1.7 Grafico a dispersione – Riscaldamento Esclusione LG: Capacità Nominale/Potenza Sonora

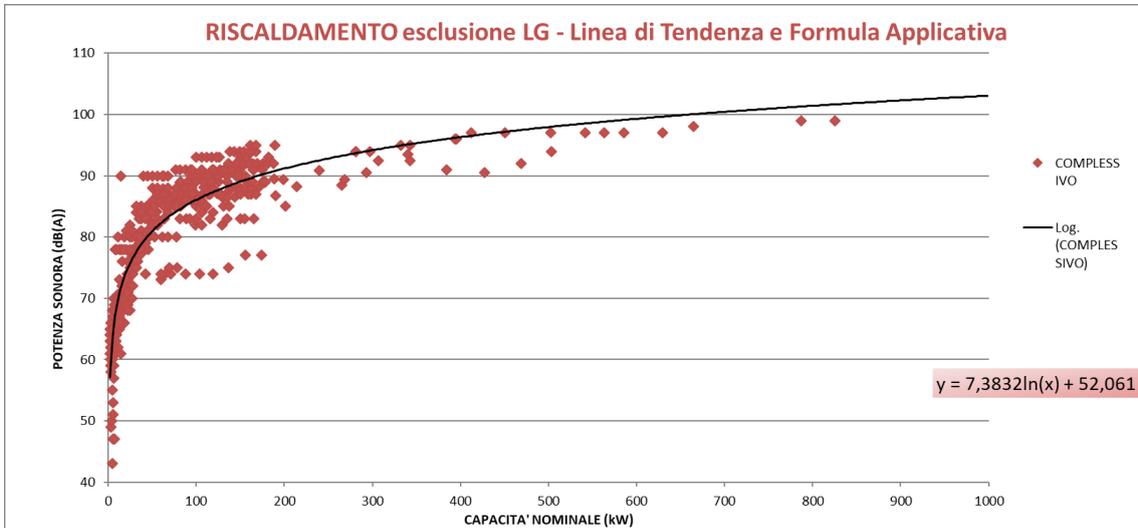


Fig. 3.1.8 Grafico a dispersione – Riscaldamento Esclusione LG Linea di Tendenza e Formula Applicativa: Capacità Nominale/Potenza Sonora

Ovviamente i risultati forniscono una nuova linea di tendenza, così come una nuova formula applicativa.

$$Lw = A * \ln (Pw) + B$$

Dove i coefficienti di regressione valgono:

- Per il raffreddamento $A=7,35$ e $B=52,04$
- Per il riscaldamento $A=7,38$ e $B=52,06$

3.2 ANALISI DATI IN FREQUENZA

Come riportato nel capitolo 1, solamente nel 40% dei modelli esaminati vengono proposti i grafici della potenza sonora espressa in frequenza su bande di ottava, nel campo da 63 a 8000Hz dove l'orecchio umano risulta avere maggiore sensibilizzazione al rumore.

Si è deciso così di rappresentare, per questi modelli, i loro relativi parametri su grafici dove si prende in considerazione la capacità nominale e, appunto, la potenza sonora in raffreddamento e in riscaldamento.

Qua sotto vengono riportati i grafici Capacità Nominale/Potenza Sonora per ogni banda di ottava, con principio di funzionamento a raffreddamento:

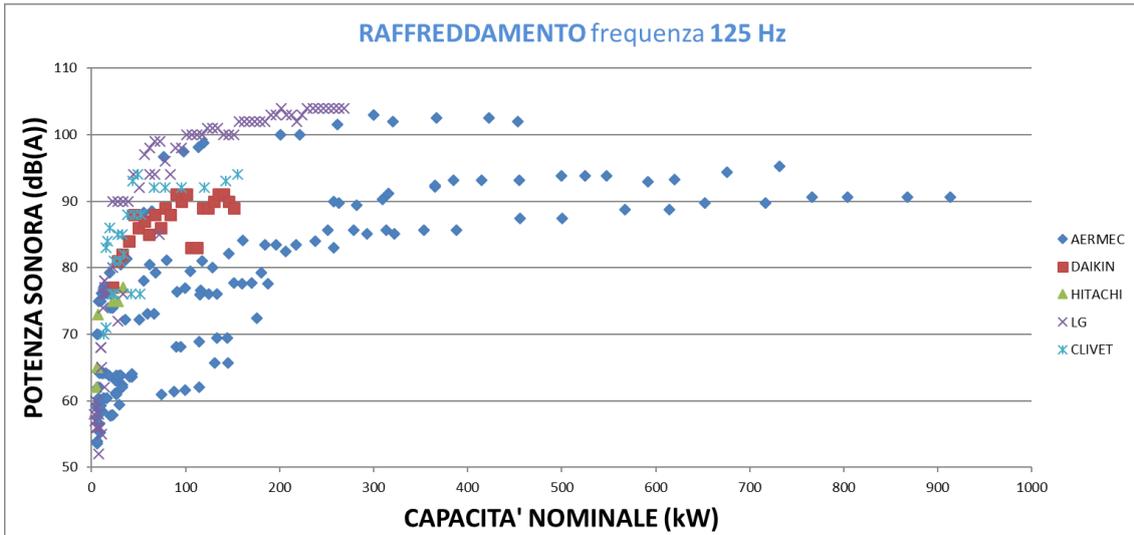


Fig. 3.2.1 Grafico a dispersione - Raffreddamento 125 Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

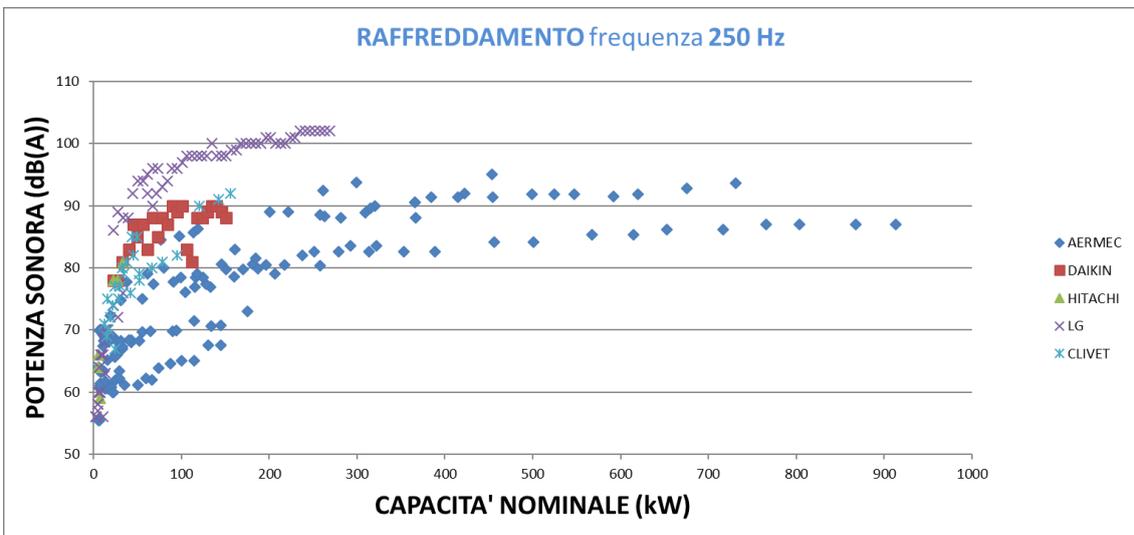


Fig. 3.2.2 Grafico a dispersione - Raffreddamento 250 Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

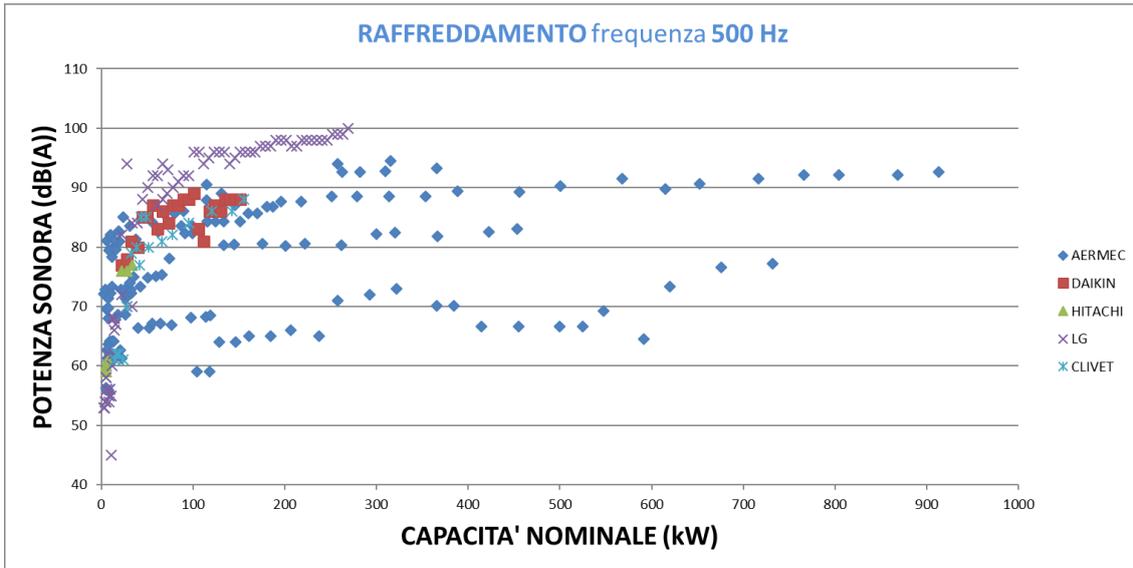


Fig. 3.2.3 Grafico a dispersione - Raffreddamento 500 Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

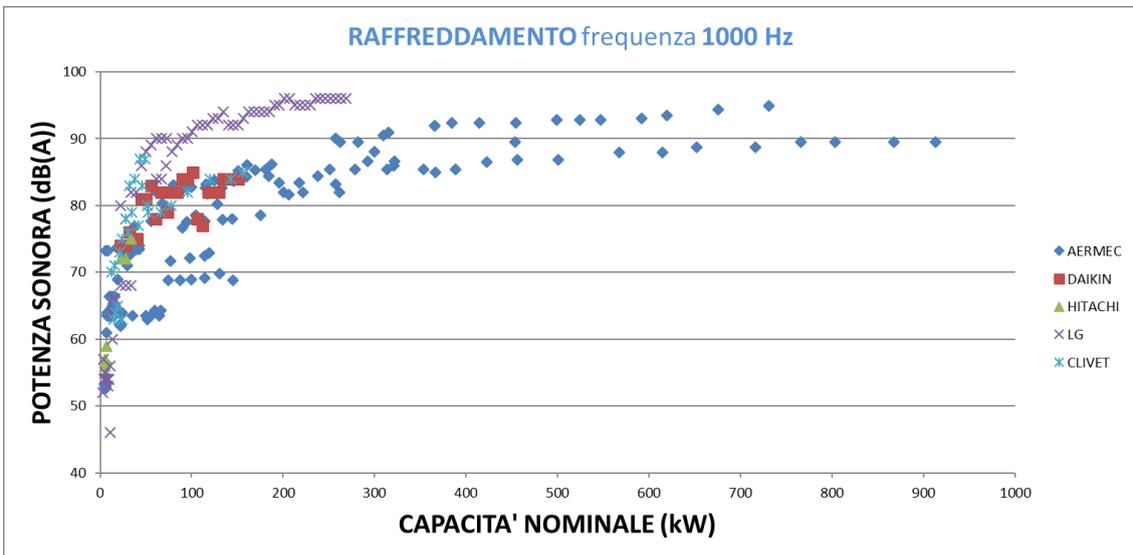


Fig. 3.2.4 Grafico a dispersione - Raffreddamento 1000 Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

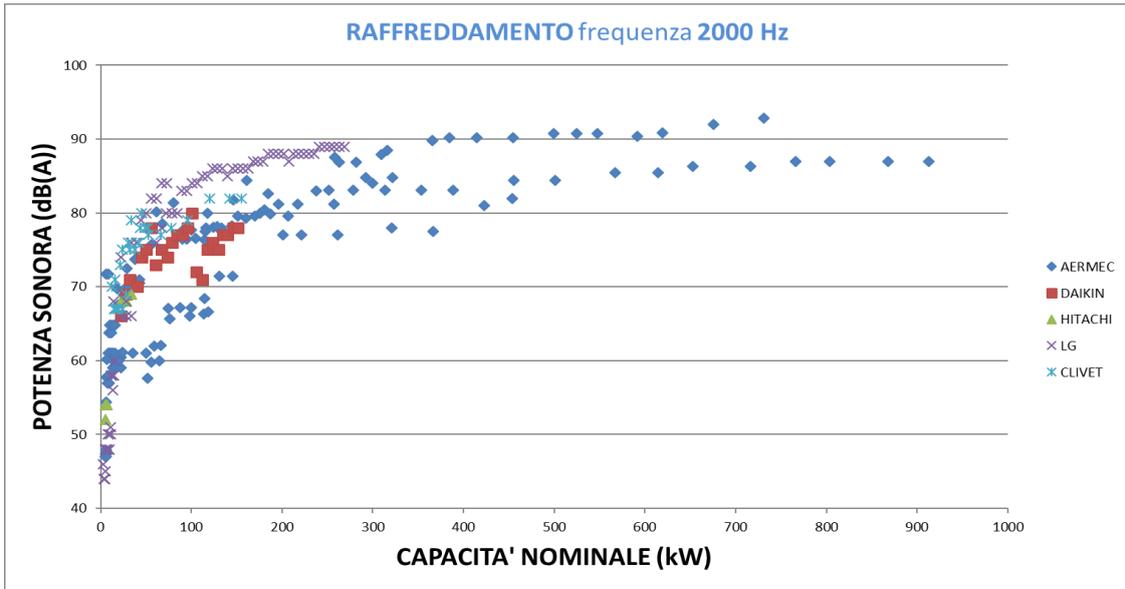


Fig. 3.2.5 Grafico a dispersione - Raffreddamento 2000 Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

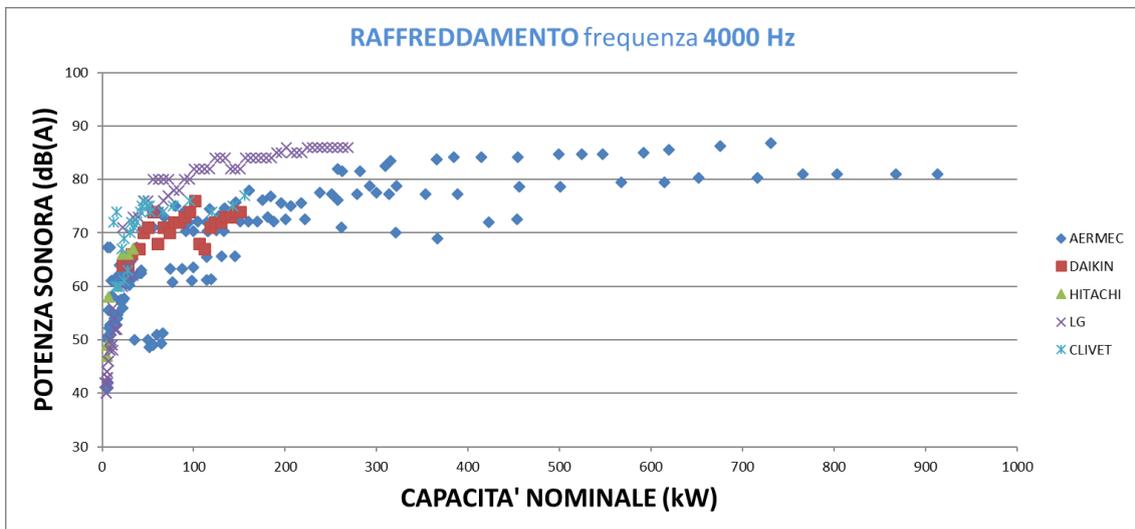


Fig. 3.2.6 Grafico a dispersione - Raffreddamento 4000 Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

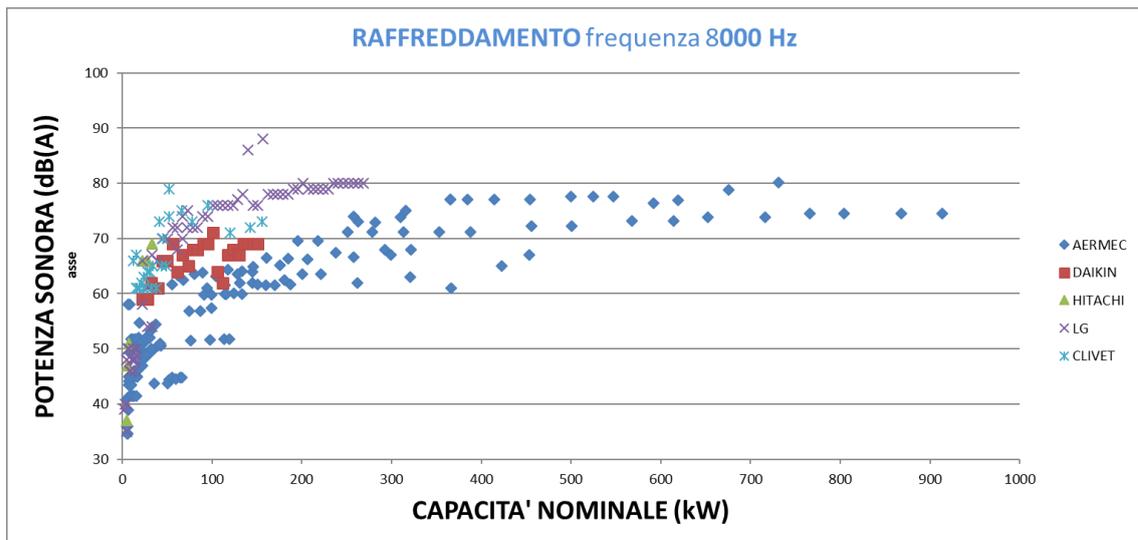


Fig. 3.2.7 Grafico a dispersione - Raffreddamento 8000 Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

A questo punto si valuta la stessa tipologia di grafico ma questa volta con principio di funzionamento a riscaldamento:

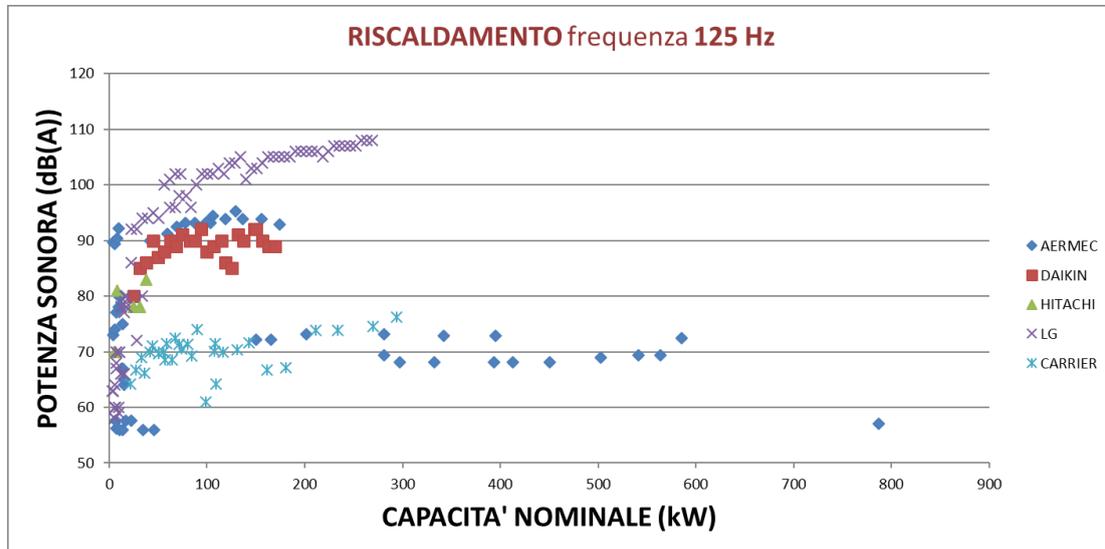


Fig. 3.2.8 Grafico a dispersione - Riscaldamento 125 Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

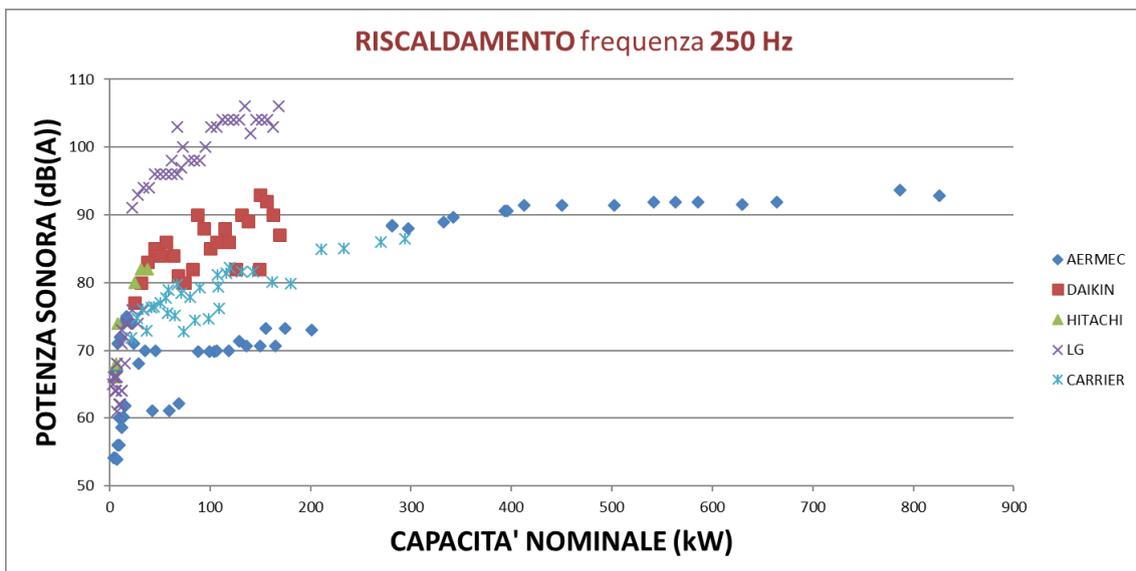


Fig. 3.2.9 Grafico a dispersione – Riscaldamento 250 Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

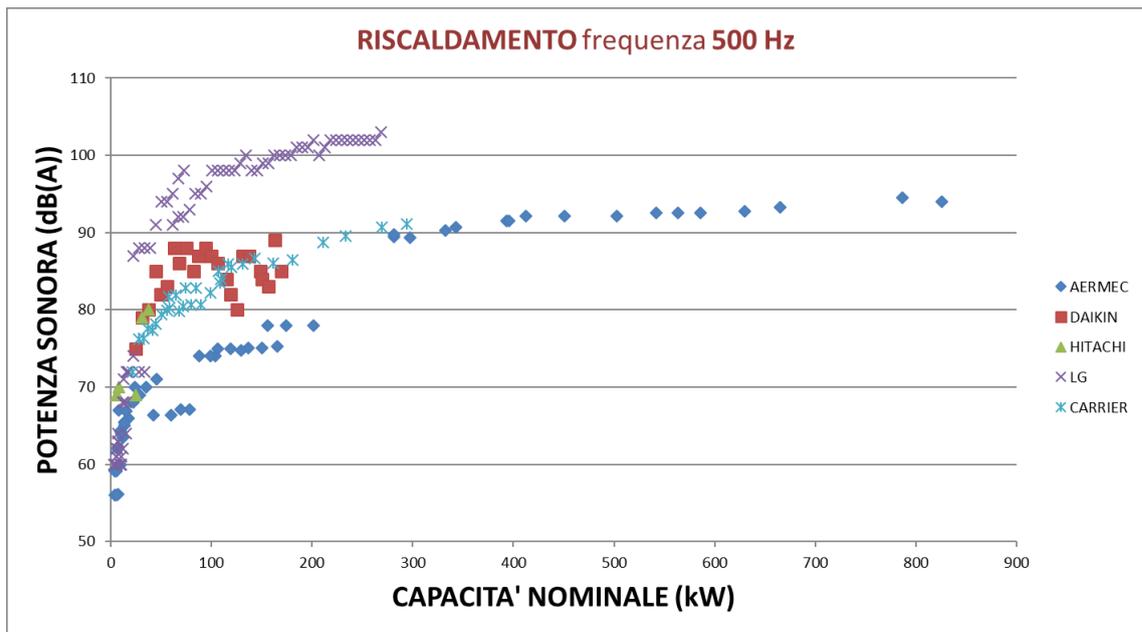


Fig. 3.2.10 Grafico a dispersione – Riscaldamento 500 Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

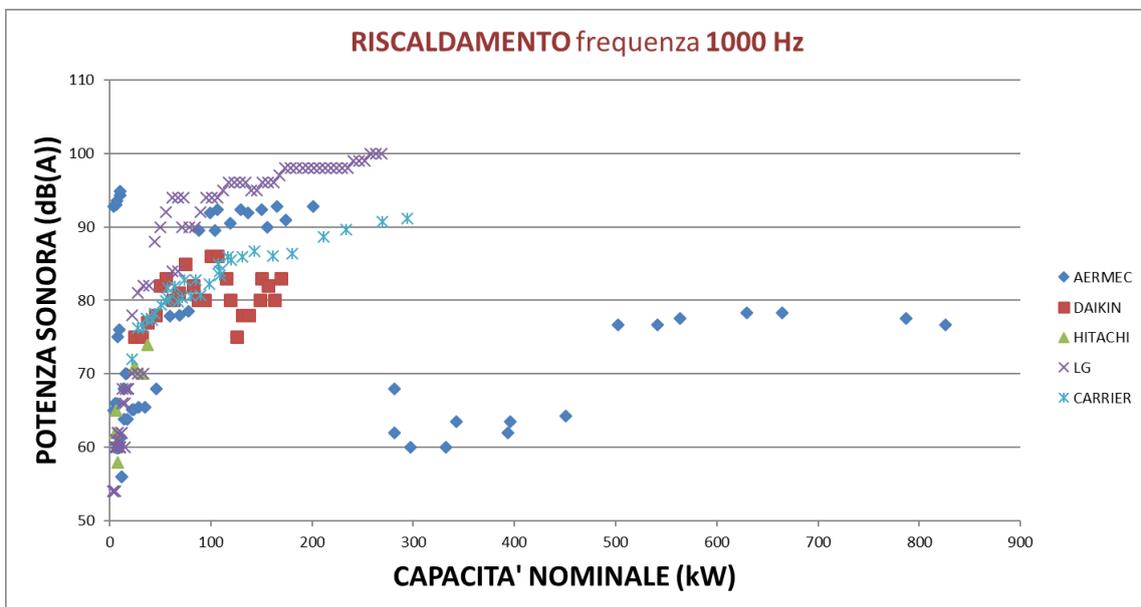


Fig. 3.2.11 Grafico a dispersione – Riscaldamento 1000Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

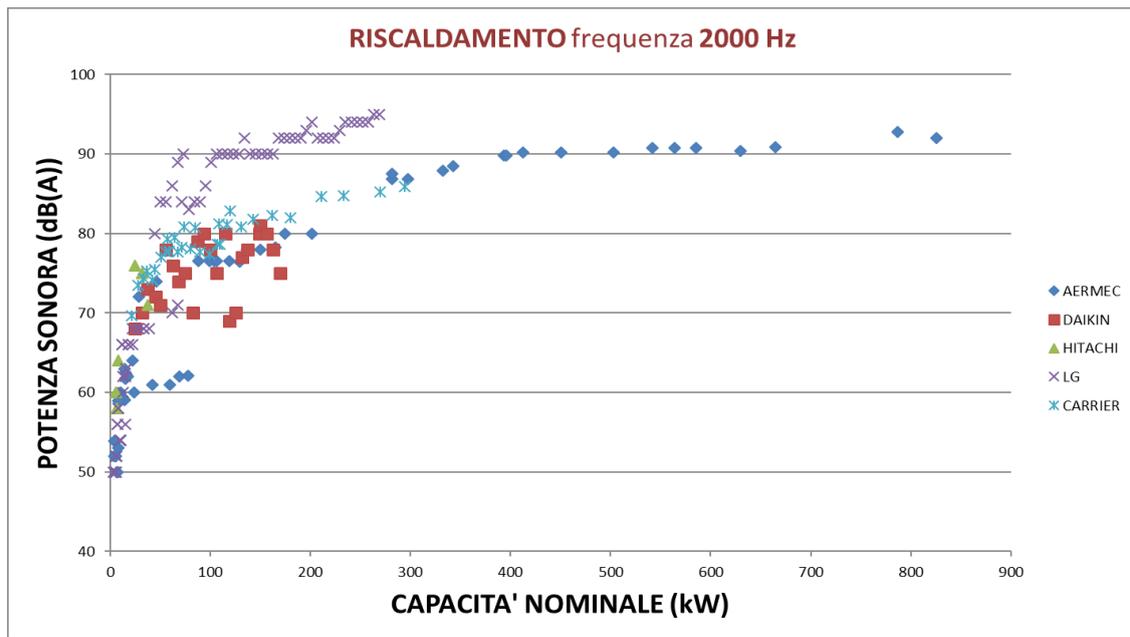


Fig. 3.2.12 Grafico a dispersione – Riscaldamento 2000Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

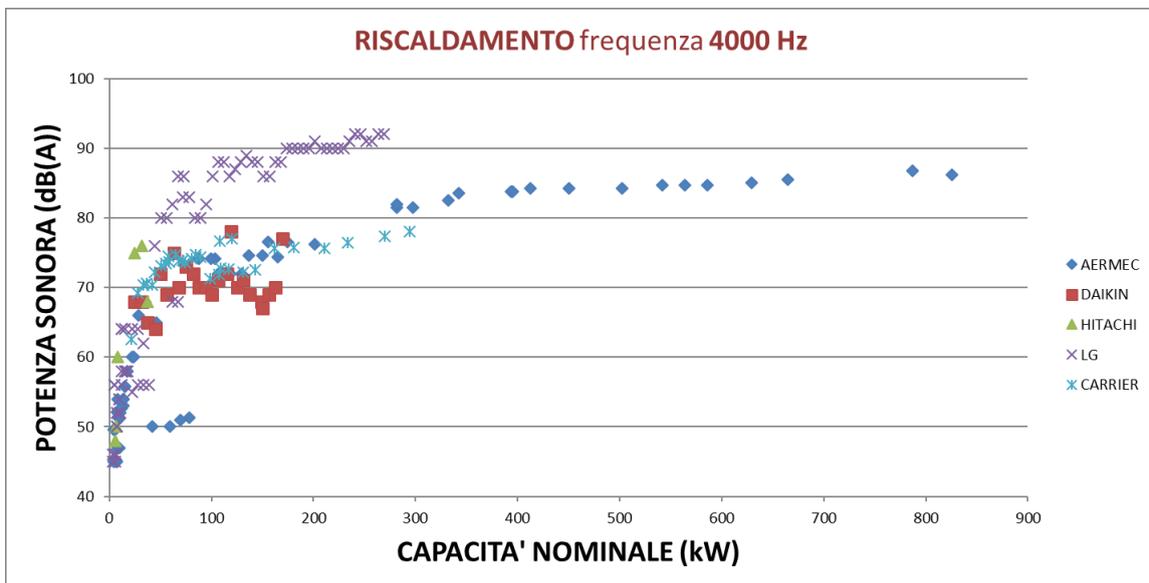


Fig. 3.2.13 Grafico a dispersione – Riscaldamento 4000Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

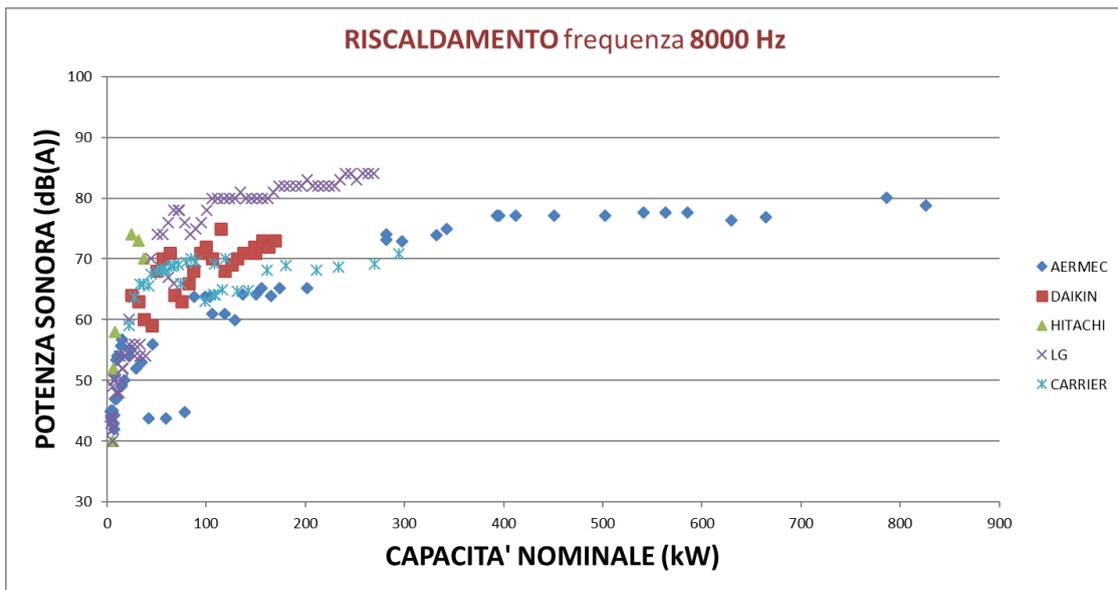


Fig. 3.2.14 Grafico a dispersione – Riscaldamento 8000Hz: Capacità Nominale/Potenza Sonora

CONCLUSIONI

Al termine del lavoro svolto si possono classificare i macchinari in base al proprio grado di rumorosità e si può quindi dichiarare quale modello sia più o meno rumoroso a seconda delle tecnologie e dal principio di funzionamento.

Questa prima analisi permette di trovare delle linee di tendenza utili per definire in prima approssimazione le caratteristiche di pressione sonora del macchinari a partire dalle caratteristiche di potenza, con un errore ± 3 dba.

Il risultato può essere ricavato sia in termini di pressione sonora che di potenza sonora, sia globali che in bande di ottava.

Lo sviluppo futuro di questo lavoro sarà quello di individuare modelli più dettagliati ed affinare le relazioni speditive di calcolo.

GLOSSARIO

- Frequenza [Hz]: 1 Hz è la frequenza di un fenomeno periodico il cui periodo sia 1 secondo;
- Pressione sonora (istantanea) [Pa]: è la differenza tra la pressione istantanea totale e la pressione statica;
- Potenza sonora [W]: energia sonora trasferita in un dato intervallo di tempo, divisa per la durata di tale intervallo;
- Livello di pressione sonora espresso in decibel [dB]: è il logaritmo decimale, moltiplicato per 20, del rapporto tra una data pressione sonora e una pressione sonora di riferimento p_0 , pari a $20 \mu\text{Pa}$;
- Livello di potenza sonora espresso in decibel [dB]: è il logaritmo decimale, moltiplicato per 10, del rapporto tra una data potenza sonora e una potenza sonora di riferimento W_0 , pari a 1 pW ;
- Per Decibel A o decibel pesato A (dBA) si intende la variazione di livello dell'intensità sonora che tiene conto della maggiore sensibilità dell'orecchio umano alle basse frequenze comportando delle modificazioni convenzionali (basate su considerazioni empiriche) dei valori della curva relativa al livello sonoro equivalente.

BIBLIOGRAFIA

-A. Di Bella, F. Fellin, M. Tergolina, R. Zecchin, *“Problematiche di rumore immesso in ambiente estero da impianti di climatizzazione centralizzati”* (2003)

-A. Briganti, *“Il controllo del rumore negli impianti di climatizzazione e negli edifici”* (2008)

[1] Spagnolo R., 2007, *Manuale di Acustica Applicata*, Città Studi Edizioni

[2] REGOLAMENTO (UE) N. 813/2013 DELLA COMMISSIONE del 2 agosto 2013 recante modalità di applicazione della direttiva 2009/125/CE del Parlamento europeo e del Consiglio in merito alle specifiche per la progettazione ecocompatibile degli apparecchi per il riscaldamento d’ambiente e degli apparecchi di riscaldamento misti

[3] Certification technical standard NF 414, *“Certification body mandated by AFNOR Certification”*

[4] EN ISO 12102-1:2017, *“Air conditioners, liquid chilling packages, heat pumps, process chillers and dehumidifiers with electrically driven compressors - Determination of the sound power level - Part 1: Air conditioners, liquid chilling packages, heat pumps for space heating and cooling, dehumidifiers and process chillers”*

[5] UNI EN ISO 3741:2010, *“Acustica - Determinazione dei livelli di potenza sonora e dei livelli di energia sonora delle sorgenti di rumore mediante misurazione della pressione sonora - Metodi di laboratorio in camere riverberanti”*

[6] UNI EN ISO 9614-1:2009, *“Acustica - Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante il metodo intensimetrico - Parte 1: Misurazione per punti discreti”*

RINGRAZIAMENTI

Le innumerevoli difficoltà riscontrate in questo triennio, grazie a forza di volontà ed impegno, si sono trasformate in vere e proprie soddisfazioni, le quali non ci sarebbero state senza l'aiuto e la motivazione di tutti coloro che mi hanno sostenuto in questi anni.

Mi sento in dovere di ringraziare in modo particolare il mio relatore Ing. Fabio Serpilli, il mio correlatore Ing. Valter Lori, per avermi dato la possibilità di svolgere un tirocinio nonostante la situazione di emergenza attuale e la dottoranda Samantha che mi ha seguito ed aiutato lungo il percorso fino alla stesura della tesi.

La mia riconoscenza va, ovviamente, anche alla mia famiglia che mi ha permesso di intraprendere questo percorso di studi e alla mia ragazza che ha sempre creduto nelle mie potenzialità, incoraggiandomi a dare il massimo anche nei momenti più ardui.

Un ultimo ringraziamento va ai miei compagni di corso con cui ho trascorso gran parte di questi anni, condividendo momenti che ricorderò per sempre, a partire dai viaggi in treno, dai pranzi in mensa, dalle giornate di studio in biblioteca, che rendevano il tutto meno impegnativo.