



Cambiamenti climatici: i ghiacciai si ritraggono, l'acqua diminuisce, i raggi solari intrappolati aumentano l'effetto serra



COMPORTAMENTO DINAMICO DEL CASSONE ISOLATO NEI CAMION FRIGORIFERI

P. ARTUSO
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Analisi sperimentale del comportamento dinamico del cassone isolato nei camion frigoriferi

AUTORI:

Paolo Artuso^{(1)*}, Antonio Rossetti⁽²⁾, Silvia Minetto⁽²⁾, Sergio Marinetti⁽²⁾, Davide Del Col⁽¹⁾

⁽¹⁾ Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, via Venezia 1, 35131 Padova

⁽²⁾ Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per le Tecnologie della Costruzione, Corso Stati Uniti 4, 35127 Padova

* autore corrispondente: paolo.artuso.1@phd.unipd.it

ABSTRACT:

I camion frigoriferi sono un anello essenziale nella catena del freddo in quanto garantiscono la consegna al mercato di merci deperibili in condizioni di sicurezza e di elevata qualità. Per un camion refrigerato, il fabbisogno medio frigorifero dipende dalle condizioni esterne e dal tipo di missione a cui deve far fronte: temperatura dell'ambiente circostante, velocità dell'aria e velocità del veicolo. Al fine di stimare il carico termico a cui viene sottoposto il sistema in condizioni dinamiche ed essere dunque in grado di prevedere il picco della richiesta frigorifera è necessaria la conoscenza della risposta dinamica del cassone isolato.

Questo articolo presenta uno studio sperimentale che ha come fine la determinazione della costante di tempo dei cassoni isolati dei camion frigoriferi, ottenuta analizzando la risposta a gradino dei cassoni stessi. Infine è stata illustrata la sensibilità dei principali parametri del cassone isolato e del camion.

I dati sperimentali sono stati acquisiti nella stazione test ATP presente ad ITC-CNR, Padova.

1. INTRODUZIONE

I sistemi impiegati nel trasporto refrigerato vengono utilizzati al fine di distribuire prodotti refrigerati e surgelati in tutto il mondo; Sempre più attenzione viene riversata nel trasporto refrigerato nell'ambito della catena alimentare a causa delle crescenti preoccupazioni riguardanti la sicurezza alimentare e la qualità dei prodotti. Rispetto ai sistemi stazionari, i sistemi di trasporto refrigerato sono tenuti a funzionare in maniera affidabile ed efficiente su una elevata varietà di condizioni operative, senza mai compromettere la regolazione della temperatura del prodotto [1].

Questo articolo analizza la risposta dinamica che il cassone isolato di un camion frigorifero fornisce ad un improvviso cambiamento delle condizioni operative al suo interno. Essere in grado di prevedere la risposta del cassone ad un input termico gioca un ruolo fondamentale nella corretta progettazione e dimensionamento dell'unità frigorifera di un veicolo adibito al trasporto refrigerato, con l'obiettivo di mantenere un'efficiente regolazione di temperatura mantenendo minima la dispersione di energia al variare del carico esterno.

2. RACCOLTA DEI DATI SPERIMENTALI

I dati sperimentali sono stati acquisiti nella stazione test ATP presente ad ITC-CNR, Padova, le cui dimensioni principali sono riportate in Figura1.

La stazione test è composta da due locali accoppiati: il locale machine dove si trovano rispettivamente gruppo frigorifero e gruppo ventilante ed il tunnel, posizionato sotto il locale macchine, dove i camion sono riposti nell'intera durata della prova. I test sono effettuati con il metodo del riscaldamento interno, seguendo le direttive ATP [2]: questo metodo stabilisce l'imposizione di una precisa differenza di temperatura tra l'aria all'interno del cassone e l'aria all'interno della camera isolata dove vengono posizionati i camion durante la prova. Il cassone viene sottoposto ad un carico termico noto e tramite questa prova ne viene determinato il coefficiente di scambio termico globale.

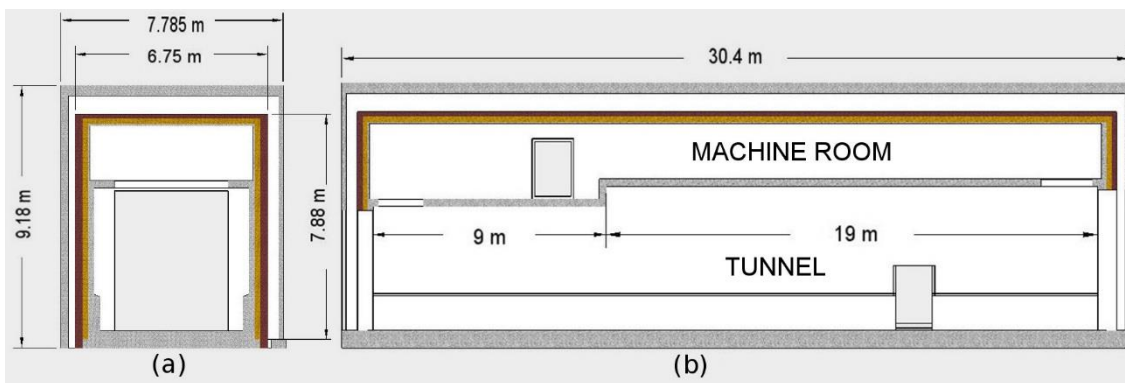


Figura 1: ATP test station (a) sezione trasversale (b) sezione longitudinale

Il metodo di test privilegiato prevede l'imposizione di un carico termico controllato all'interno del cassone tramite l'utilizzo di stufette in maniera tale da garantire un ricircolo di aria interna sufficiente a spostare dalle 40 alle 70 volte il volume d'aria interno ogni ora, così come stabilito dall' ATP. Per quanto riguarda le condizioni esterne, la velocità dell'aria misurata a 100 mm dalle pareti del cassone è mantenuta tra 1-2 m/s. I vincoli sulla temperatura sono definiti con il mantenimento della differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno del cassone a $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, mentre la temperatura media tra l'interno e l'esterno del cassone deve essere di $20\text{ °C} \pm 0.5\text{ °C}$, risultando praticamente in 7.5 °C all'esterno del cassone e 32.5 °C all'interno del cassone.

Con il fine di soddisfare queste richieste, la stazione test è stata equipaggiata con un gruppo frigorifero di capacità nominale 55.8 kW, valutata alla temperatura di evaporazione di -5 °C , temperatura di condensazione di $+35\text{ °C}$ ed un surriscaldamento di 20K.

Il gruppo ventilante è composto da 10 ventilatori assiali, ognuno dei quali assorbe una potenza nominale di 1.73 kW, che forniscono una portata di rinnovo dalla sala machine al tunnel nell'intera durata della prova. Le stufette che scaldano l'aria all'interno del cassone durante il test sono controllate in tensione da un sistema PID in maniera tale che, in condizioni standard di un test, venga raggiunta una temperatura stabile di 32.5 °C .

Con l'obiettivo di valutare la risposta del sistema ad un incremento improvviso della potenza scaldante, dopo 3 ore dal raggiungimento del regime permanente l'aria interna si trova alla temperatura di set point di 32.5 °C è applicato un gradino alla tensione di alimentazione delle stufe e dunque alla potenza scaldante che sono in grado di fornire, essendo essa direttamente proporzionale alla tensione di alimentazione stessa. La potenza scaldante emessa dalle stufe viene presa come riferimento ed il valore della potenza scaldante viene incrementato del 20%.

3. ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI

A questo punto è possibile calcolare il valore della temperatura interna nelle nuove condizioni di regime permanente T''_i , dopo il gradino, dato che tutti i parametri presenti nell'equazione 1 sono ora noti:

$$T''_i = T_e + \frac{\dot{Q}''}{KS_m} \quad (1)$$

Dove K è il coefficiente globale di scambio termico del cassone isolato misurato durante il precedente stato di regime permanente, S_m è la superficie media di scambio calcolata come la media geometrica tra la superficie interna e quella esterna e \dot{Q}'' è la potenza scaldante delle stufe dopo il gradino.

Durante il test è stato osservato che, per il cassone isolato di un camion, la risposta dinamica può essere a sua volta suddivisa in 2 zone: una prima zona dove il sistema risponde rapidamente all'incremento di potenza ed un'altra invece in cui il sistema risponde lentamente (che è anche quella dominante in termini di tempo). Queste due zone sono collegate l'un l'altra da un andamento continuo. Dato che la risposta lenta è dominante in termini di tempo, è stata scelta come quella rappresentativa del test e dunque ad ogni camion testato è stato associato il volume del cassone isolato ed il tempo caratteristico della risposta a lungo termine. Quando viene considerata la risposta a lungo termine, è stato osservato che il suo andamento può essere approssimato all'andamento della risposta di un sistema lineare di primo ordine:

$$T_i(t) = T'_i + (T''_i - T'_i)(1 - e^{-\frac{t-\tau_D}{\tau}}) \quad (2)$$

Dove τ è il tempo caratteristico della risposta, τ_D è il tempo di ritardo e T'_i è la temperatura interna nelle condizioni di regime permanente prima del test a gradino.

Per interpolare i dati sperimentali è stata costruita una curva di best-fit esponenziale facendo uso dell'equazione (2). La determinazione della curva di best-fit consiste nella ricerca dei valori di τ e di τ_D che minimizzano l'errore tra la funzione del modello scelto ed i dati sperimentali.

$$\min \left\{ \frac{\sum_{j=1}^{N_{data}} |T_{i,j} - T_{i,model,j}|}{N_{data}} \right\} \quad (3)$$

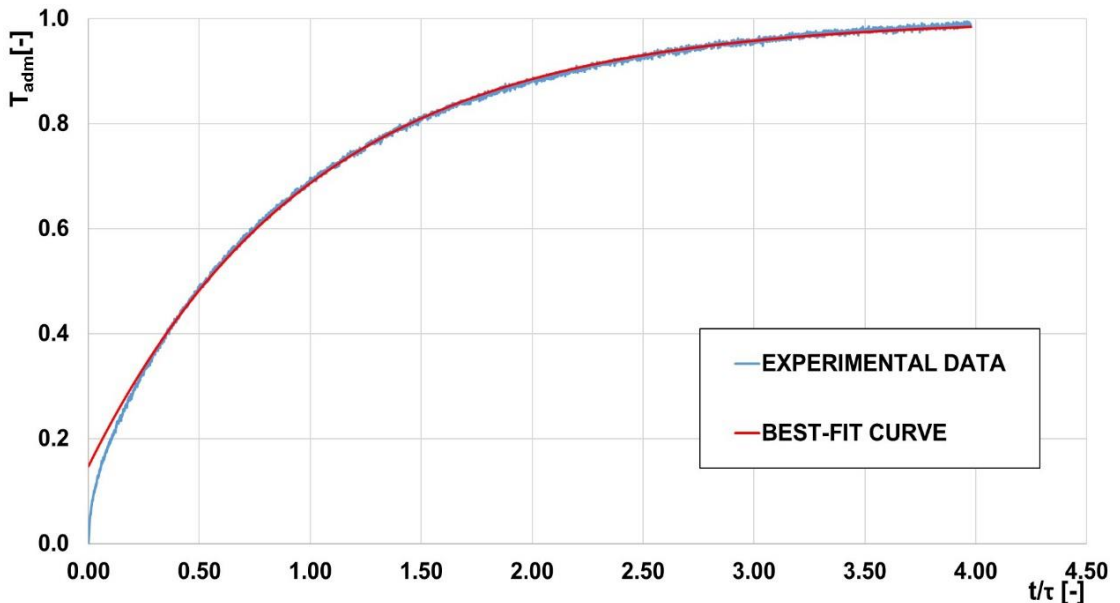


Figura 2: Andamento della risposta a gradino e della curva di best-fit in termini adimensionali.

In Figura 2 l'andamento della temperature viene espresso in termini adimensionali e dove T_{adm} è definita come:

$$T_{adm}(t) = \frac{T_{i,best-fit}(t) - T'_i}{T''_i - T'_i} \quad (4)$$

4. RISULTATI

Sono state effettuate un totale di 38 prove sperimentali: la Figura 3 fornisce una rappresentazione dei tempi caratteristici raccolti in questi test, rappresentati in funzione del volume del cassone isolato. La figura fornisce inoltre la rappresentazione della distribuzione di frequenze che mette in evidenza il fatto che il valore più frequente del tempo caratteristico si trova tra 7-9h.

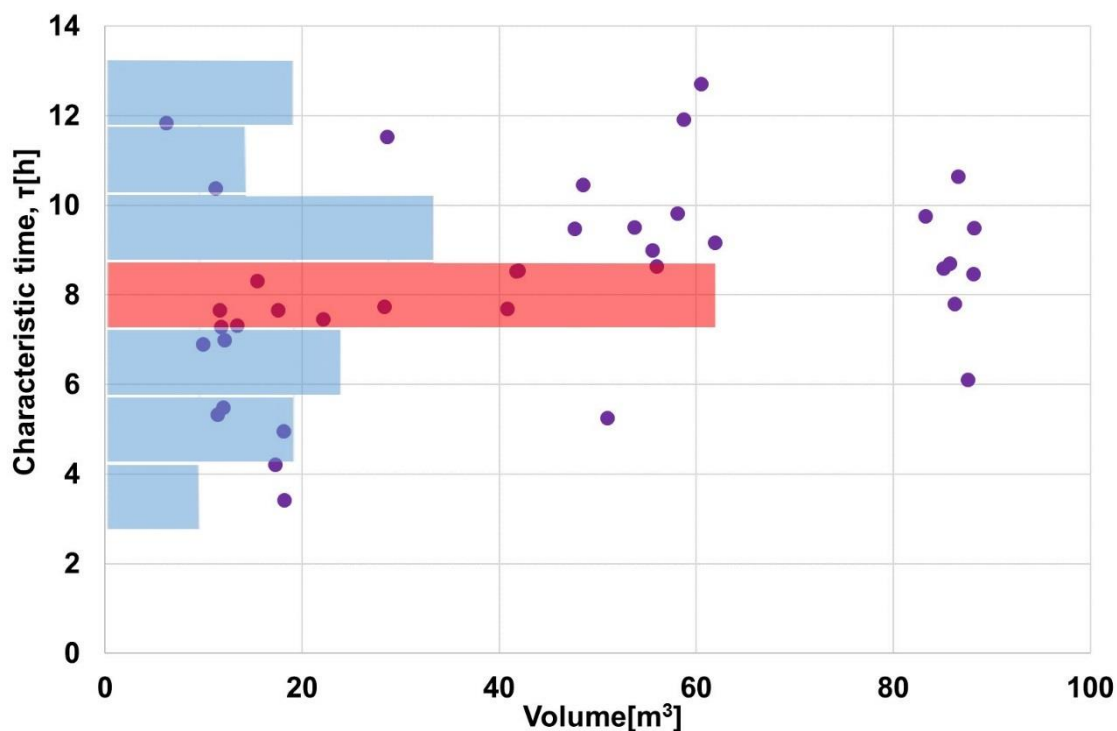


Figura 3: Rappresentazione del tempo caratteristico in funzione del volume del cassone isolato e della distribuzione di frequenze.

E' possibile classificare le tipologie di camion analizzati in tre gruppi distinti a seconda della dimensione del cassone isolato: veicoli piccoli per volumi compresi tra 5-30 m³, veicoli medi per volumi compresi tra 40-65 m³ e veicoli grandi per volumi compresi tra 80-90 m³. Prendendo in considerazione questi tre gruppi, può essere stimato un valore medio pesato sul volume del tempo caratteristico:

$\bar{\tau}_{small-vehicle} [h]$	7.32
$\bar{\tau}_{medium-vehicle} [h]$	9.40
$\bar{\tau}_{large-vehicle} [h]$	8.68

L'elevata dispersione dei dati attorno al valor medio può essere imputato a ragioni di natura differente: sono stati testate differenti tipologie di camion, appartenenti a differenti costruttori e conseguentemente assemblati con logica diversa. Non solo gli strati che compongono il cassone possono essere diversi ma anche l'unità frigorifera con cui sono stati equipaggiati e la destinazione del loro utilizzo durante la loro vita, portando così ad una differente usura del cassone isolato. Considerando poi che l'usura può giocare un ruolo importante, essa stessa può venir accelerata dagli eventuali danneggiamenti meccanici a cui i camion frigoriferi sono continuamente esposti essendo un veicolo in movimento. Per procedere propriamente con una adeguata investigazione un maggior numero di dati sperimentali è fondamentale.

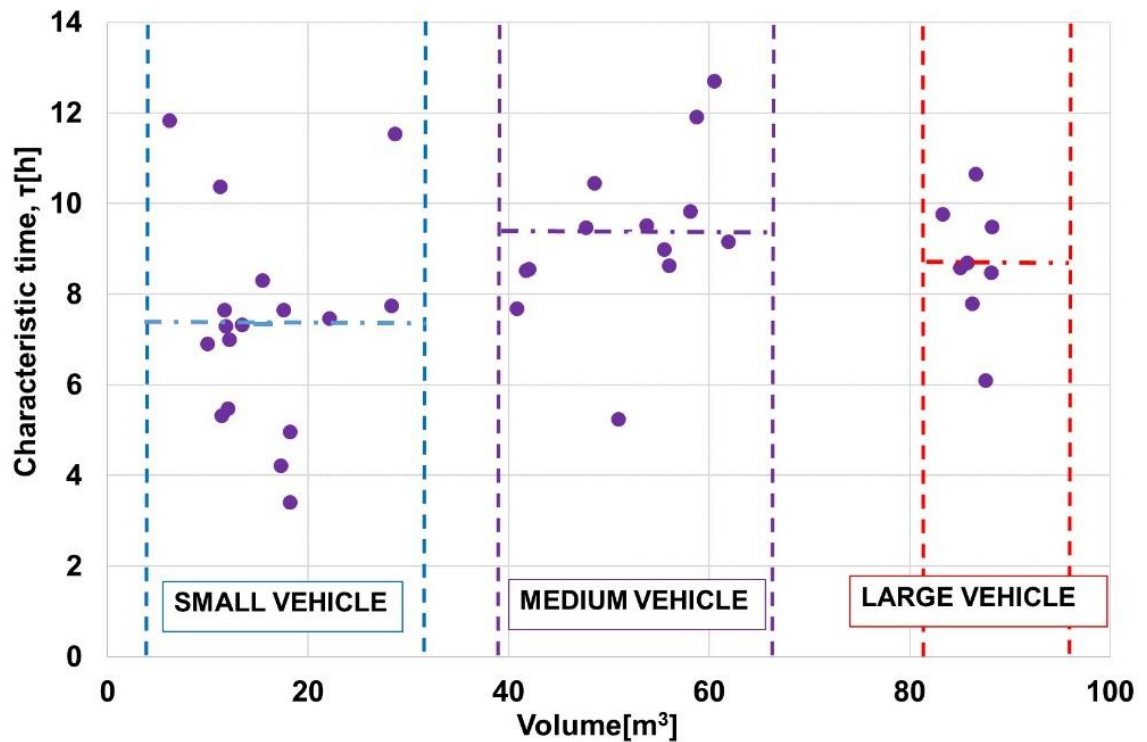


Figura 4: Rappresentazione del tempo caratteristico in funzione del volume del cassone isolato e dispersione attorno al valor medio.

5. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'obiettivo di questo articolo è quello di presentare lo studio della risposta dinamica del cassone isolato di un camion frigorifero ad un ingresso a gradino. Il fine di questo studio è quello di valutare il tempo necessitato dal sistema per raggiungere una nuova condizione operativa e, dato che la risposta del sistema può essere approssimata alla risposta di un sistema lineare di primo ordine, questo tempo può essere valutato con il tempo caratteristico. Lo studio è stato successivamente esteso a diverse tipologie di camion classificate in 3 gruppi differenti: veicoli piccoli, veicoli medi e veicoli grandi a seconda del volume del cassone. Per ogni classe è poi stato possibile stimare un tempo caratteristico medio pesato sul volume. Gli sviluppi futuri comprenderanno l'acquisizione di un maggior numero di dati sperimentali per ogni gruppo in maniera tale da poter effettuare una miglior analisi statistica. La conoscenza del tempo caratteristico medio è fondamentale per poter simulare propriamente un camion refrigerato e per poter valutarne l'efficienza del gruppo frigorifero durante una missione

RIFERIMENTI

- [1] Bin Li, Neera Jain, William F. Mohs, Scott Munns, Vikas Patnaik, Jeff Bergie & Andrew G. Alleyne (2012) Dynamic modeling of refrigerated transport system with cooling-mode/heating-mode switch operations, HVAC&R Research, 18:5, 974-996
- [2] United Nations economic commission for Europe (2015), *Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs and on the Special Equipment to be Used for such Carriage*, Annex 1(pp.15-19)