

VALUTAZIONE DEL COMFORT GLOBALE ALL'INTERNO DI UN VEICOLO FERROVIARIO*

Dario Lo Bosco^a, Giovanni Leonardi^a, Riccardo Ferrara^b, Valeria La Fauci^a

^aDipartimento DICEAM, Università Mediterranea, Via dell'Università 25, 89124 - Reggio Calabria, Italia

^bR&D Engineer, Sim&Cure, Montpellier, Francia

dario.lobosco@unirc.it; giovanni.leonardi@unirc.it; riccardo85ferrara@gmail.com; valeria.lafauci@hotmail.it

Abstract

The aim of this study is to propose a method for the evaluation of railway passengers' comfort in relationship to temperature, noise, and vibration. Estimated the single comfort for every sensation considered, the global comfort is evaluated with the Hyper-Sphere Method [1]. The human-vehicle-infrastructure-environment variables which influence comfort are individuated. Thus, their value and correspondent global comfort could be evaluated in management strategy or predicted in design problem. The results show how to construct the hyper-sphere in which the surface is representative of best possible condition for human comfort and the center represents the minimum.

KEY WORDS: *Thermal Comfort, Vibration, Noise, Global Comfort, Hyper Sphere, Train Passengers, Railway.*

1. Introduzione

Lo scopo principale dell'articolo proposto consiste nel definire un singolo indice di comfort che rappresenti il grado di soddisfacimento globale dei passeggeri in relazione alle tre variabili considerate: temperatura, rumore e vibrazioni. Gli stati di comfort relativi ad ognuna di queste variabili sono stati ben documentati ed analizzati in numerosi studi.

La società americana ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) [2, 3] si è occupata di valutare gli effetti delle variabili ambientali sul comfort termico.

Yang & Kang [4] hanno studiato il comfort acustico in spazi pubblici urbani all'aperto, ma senza trovare un coefficiente di correlazione soddisfacente tra il livello equivalente di decibel Leq e l'indice di comfort.

Huston et al. [5] hanno analizzato la dipendenza tra il grado di comfort, l'ampiezza e la frequenza delle vibrazioni, ma senza arrivare a una metodologia per legare il comfort alle variabili progettuali.

Il presente studio esamina come le variabili del sistema uomo-veicolo-infrastruttura-ambiente interagiscono tra loro producendo e condizionando rumore, vibrazioni e temperatura e, quindi, influenzando il comfort dei passeggeri.

Tale approccio vuole, quindi, mettere in correlazione alcuni fattori che possono maggiormente influenzare il benessere del passeggero, infatti, appare evidente l'impossibilità di definire un indice di comfort che descriva in maniera completa la sensazione del passeggero.

2. La Metodologia

Inizialmente è stata eseguita una divisione delle variabili relative al sistema uomo-veicolo-infrastruttura-ambiente in due sotto-insiemi:

- sotto-insieme H: che include le n variabili appartenenti al sistema "uomo" (human subset);
- sotto-insieme E: comprendente le m variabili relative

* Il documento nella sua interezza è frutto del lavoro congiunto dei quattro autori.

al sistema “veicolo-infrastruttura-ambiente” (environment subset).

Sono state individuate, tra le $n+m$ variabili del sistema in esame, quelle che influiscono direttamente nelle variazioni di comfort relativo analizzato: termico, acustico e vibrazionale.

Il passo successivo è consistito nel definire le tre funzioni relative: temperature / comfort-index, noise/comfort-index e vibration/comfort-index. Infine, per ogni variabile ed ogni funzione, è stato possibile definire un intorno corrispondente ad una variazione di comfort relativo, compreso tra una soglia inferiore (massimo comfort) ed una superiore (minimo comfort).

La soglia superiore di ciascuna variabile viene valutata massimizzando la funzione di comfort relativo, mentre tutte le altre variabili sono fisse in corrispondenza della soglia inferiore e viceversa. Le $n+m$ variabili rappresentano pertanto, da un punto di vista geometrico, $n+m$ assi dello spazio R^{n+m} (vedi Fig. 1).

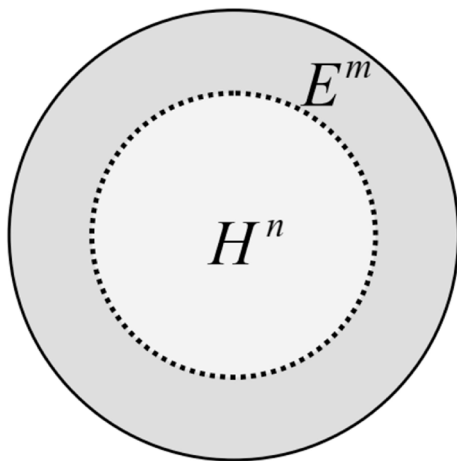


Fig. 1 - Spazio R^{n+m}
[Fonte: [1]]

Una volta definite le variabili e le soglie associate, al fine di uniformare le dimensioni dello spazio definito e far coincidere l'origine degli assi in un unico punto (in corrispondenza della soglia minima), risulta opportuno effettuare un'operazione di normalizzazione.

Ogni variabile è stata, pertanto, sostituita dalla sua normalizzata associata tramite le equazioni [2]:

$$\begin{cases} \tau_1 = \frac{\alpha_1 - \alpha_1^i}{\alpha_\Delta}, \dots, \tau_m = \frac{\alpha_m - \alpha_m^i}{\alpha_\Delta} \alpha_\Delta = (\alpha^s - \alpha^i) \\ \tau_1 = \frac{Z_1 - Z_1^i}{Z_\Delta}, \dots, \tau_n = \frac{Z_n - Z_n^i}{Z_\Delta} Z_\Delta = (Z^s - Z^i) \end{cases} \quad [2]$$

Appare dunque evidente che lo spazio ivi definito racchiude in sé la geometria di un'ipersfera di equazione [3] in cui la superficie è rappresentativa delle condizioni di massimo comfort e l'origine indica invece il punto di minimo.

$$\tau_1^2 + \dots + \tau_n^2 + \tau_{n+1}^2 + \dots + \tau_m^2 \leq 1 \quad [3]$$

I vettori appartenenti all'iperspazio la cui norma soddisfa l'equazione [3] si trovano all'interno dell'ipersfera, il loro modulo è pertanto rappresentativo di ogni particolare condizione tale che l'Indice di Comfort Globale: $GCI \in [0;1]$.

Il vettore comfort globale, qui definito, ha un duplice impiego:

- in fase di progetto, è uno strumento di scelta tramite il quale risulta semplice individuare l'alternativa ottima; tale alternativa sarà infatti quella che massimizza il modulo del vettore;
- in fase di management dei veicoli ferroviari, può essere di ausilio nella gestione delle variabili che possono essere regolate direttamente in corsa o durante le operazioni di manutenzione.

3. Il Comfort Termico

Le sensazioni di comfort termico scaturiscono dal bilancio energetico [6] uomo-ambiente la cui equazione, per unità di superficie è scrivibile come segue:

$$S = M - W_k - E_{sk} - E_r - C - R - C_k \quad [4]$$

dove S è l'energia istantanea scambiata con l'ambiente (vedi Tab. 1).

Affinché vi sia equilibrio e, dunque, si verifichi una sensazione di comfort, occorre che tale scambio non avvenga, o, comunque, sia limitato il più possibile, ovvero, al limite, S deve risultare nullo. Alcune delle variabili dell'equazione, [4] che appartengono al sistema *uomo*, non sono indipendenti, e possono essere scritte in funzione di variabili appartenenti al sistema *ambiente*, pertanto, più in generale, si ha equilibrio se l'equazione [5] è soddisfatta:

$$f(M, W, I_{cl}, rh, t_{mr}, t_{sk}, E_{sw}) = 0 \quad [5]$$

L'equazione sopra definita risulta formalmente identica alle equazioni previste dalla teoria di comfort-equilibrio proposta da Leonardi & Ferrara [1].

Variabili introdotte nell'eq. [4]	
M	indice metabolico
W_k	lavoro esterno
E_{sk}	calore scambiato per evaporazione tramite pelle
E_r	calore scambiato tramite respirazione
C	calore scambiato per convezione tra il corpo umano (coperto da indumenti) e superfici esterne
R	calore scambiato per irraggiamento tra il corpo umano (coperto da indumenti) e superfici esterne
C_k	calore scambiato per conduzione tra pelle ed oggetti solidi
Variabili introdotte nell'eq. [5]	
E_{sw}	calore scambiato tramite sudorazione
rh	umidità relativa dell'aria
t_{mr}	temperatura media radiante
t_{sk}	temperatura della pelle
I_{cl}	indice del tipo di abbigliamento, funzione della resistenza termica e della permeabilità al vapore

Tab. 1 - Elenco delle variabili
(Fonte: [1])

Flanger [7] ha condotto dei sondaggi su un gran numero di soggetti, registrando l'indice di comfort espresso da ciascuno in relazione a determinate variabili relative al sistema uomo-ambiente. In seguito, studiandone la correlazione, ha proposto la relazione seguente per predire tale indice [PMV - Predicted Mean Vote].

$$\begin{aligned}
 PMV &= (0.303 \cdot e^{-0.036M} + 0.028) \\
 &\cdot \{(M - W) - 3.05 \\
 &\cdot 10^{-3}[5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a] \\
 &- 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \cdot 10^{-5}M \\
 &\cdot (5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3.96 \\
 &\cdot 10^{-8}f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mr} + 273)^4] - f_{cl}h_c \\
 &\cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad [6]
 \end{aligned}$$

Variabili introdotte nell'eq. [6]	
p_a	pressione parziale di vapore
f_{cl}	rappporto di superficie coperta/nuda del corpo umano
t_a	temperatura dell'aria
t_{cl}	temperatura superficiale degli indumenti
h_c	coefficiente medio di convezione per lo scambio di calore pelle-aria
Scala di percezione termica	
+	3 hot
+	2 warm
+	1 slightly warm
	0 neutral
-	1 slightly cool
-	2 cool
-	3 cold

Tab. 2 - Variabili introdotte nell'eq. [6] e scala di percezione
(Fonte: [1])

In condizioni di normalità, durante un viaggio, le persone sono sedute, pertanto il tasso metabolico può essere assunto $M=58,15 \text{ W/m}^2$ [6]. Per lo stesso motivo il lavoro esterno è nullo, $W_k=0$. La pressione parziale di vapore può essere calcolata tramite formule empiriche [7] in funzione della temperatura e dell'umidità relativa.

$$\begin{aligned}
 P_a &= rh \cdot P_s \\
 \ln(P_s) &= \frac{\alpha_1}{T} + \alpha_2 + \alpha_3 T + \alpha_4 T^2 + \alpha_5 T^3 + \alpha_6 T^4 + \alpha_4 \ln(T) \quad [7]
 \end{aligned}$$

Il rapporto di superficie coperta/nuda del corpo umano può essere calcolato come segue:

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290I_{cl} \text{ for } I_{cl} < 0.078 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W} \\ 1.05 + 0.645I_{cl} \text{ for } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W} \end{cases} \quad [8]$$

dove I_{cl} dipende dal tipo di indumenti indossati dai passeggeri, e dunque dalla stagione e dalle condizioni meteorologiche esterne. Il coefficiente medio di convezione per lo scambio di calore pelle-aria:

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \text{ for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v_{ar}} \\ 12.1\sqrt{v_{ar}} \text{ for } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad [9]$$

con:

$$\begin{aligned}
 v_{ar} &= v_a + 0.005 \left(\frac{M}{A_{DU}} - 58.15 \right) \\
 A_{DU} &= 2.02(w_b)^{0.425}(h|b)^{0.725}
 \end{aligned}$$

dove V_{ar} è la velocità dell'aria relativa (nel caso studio la velocità dell'aria percepita dai passeggeri all'interno delle carrozze); A_{DU} rappresenta la superficie corporea calcolabile tramite la formula empirica di Dubois [8] in funzione dell'altezza e del peso. Nella fattispecie, occorre fare riferimento a valori medi (es. in Italia, $h'_m=1.75\text{m}$; $h'_w=1.65\text{m}$; $\Rightarrow h'=1.70\text{m}$; $w'=75\text{kg}$ $\Rightarrow A_{DU}=1.86\text{m}^2$). La temperatura superficiale degli indumenti:

$$\begin{aligned}
 t_{cl} &= 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \{3.96 \cdot \\
 &10^{-8}f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mr} + 273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)\} \quad [10]
 \end{aligned}$$

La temperatura dell'aria è un dato di ingresso, essendo regolabile dall'impianto di condizionamento.

La temperatura media radiante può essere calcolata come segue:

$$t_{mr} = \sum t_i F_{P,i} \quad [11]$$

dove t_i è la temperatura dell'i-esima superficie isotermica visibile dal passeggero (una parete, la finestra, un pezzo di mobilio della carrozza, un altro passeggero, etc.); $F_{P,i}$ è il fattore prospettico (o angolare) tra il soggetto-p e la superficie-i.

Una volta calcolate tutte le variabili è possibile eseguire una stima dell'indice di comfort per mezzo della [6].

Il passo finale è quello di individuare le variabili indipendenti che possono essere regolate e/o controllate in fase di progetto/gestione:

- $\alpha 1$: isolamento termico;
- $\alpha 2$: potenza dell'impianto di condizionamento (capacità di regolare temperatura dell'aria ed umidità relativa);
- $\alpha 3$: velocità dell'aria;
- $\alpha 4$: temperatura media radiante.

Le soglie di comfort suggerite delle norme ISO Standard 77302 [9] sono $PMV \in [-0.5; +0.5]$. Un altro parametro, proposto da Flanger [7], particolarmente utile per la stima dei livelli di comfort, è la percentuale di passeggeri non soddisfatti (PPD - predicted percentage of dissatisfied passengers) calcolabile con la seguente equazione:

$$PPD = 100 - 95e^{-(0.03353PMV^4 + 0.21PMV^2)} \quad (12)$$

Tale indice è funzione della sola variabile PMV , ed è pertanto possibile valutare le soglie di comfort del PPD direttamente dal grafico (vedi Fig. 2). Per $PMV \in [-0.5; +0.5]$, PPD varia da 0% al 10%.

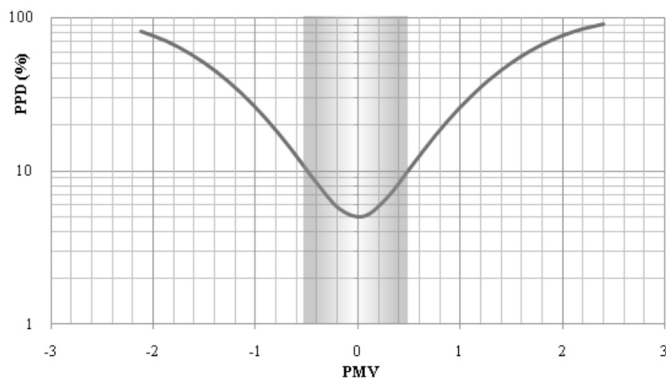


Fig. 2 - Grafico tipo della funzione $PPD=f(PMV)$
[Fonte: [1]]

Infine, l'ultimo passo consiste nel valutare per ogni variabile le soglie ed i campi di variazione $\alpha_{\Delta} = \alpha^{\wedge}s - \alpha^{\wedge}i$ come mostrato nel primo paragrafo (vedi Tab. 3).

PMV - Predicted Mean Vote						
dipende da:						
M	W	t_a	t_{mr}	P_a	f_{cl}	
fissato	fissato	regolabile da:	regolabile da:	dipende da:	dipende da:	dipende da:
0 [W/m ²]	0 [W/m ²]	sistema di condizionamento	disposizione dei posti, finestre, etc.	T non regolabile (dato di progetto)	rh regolabile da: sistema di condizionamento (dato di progetto)	I_{cl} non regolabile (dato di progetto)
h_r			t_{cl}			
dipende da:			dipende da:			
v_{ar}	t_a	M, W	I_{cl}, f_{cl}, t_a			
dipende da:	dipende da:	←	←	←		
v_a	A_{DU}					
regolabile da:	fixed					
velocità e direzione del getto d'aria condizionata	e.g. 1.86 [m ²] (media italiana)					

Tab. 3 - PMV - Predicted Mean Vote
[Fonte: [1]]

4. Il Comfort Acustico

In un veicolo ferroviario, le vibrazioni ed i rumori avvertiti dagli utenti trovano origine dalle medesime cause; la differenza consiste nel mezzo attraverso il quale si propagano. L'onda sonora di pressione si propaga nell'aria, le vibrazioni meccaniche invece, attraverso strutture solide. Entrambi i fenomeni sono caratterizzati da frequenza e ampiezza.

La caratterizzazione in frequenza, oltre che in ampiezza, risulta particolarmente rilevante se si tiene conto del fatto che l'orecchio umano non è ugualmente sensibile a tutte le frequenze. In particolare, tale sensibilità risulta meno accentuata per toni a frequenze basse (poche decine di Hz) ed a frequenze alte (oltre i 15 kHz). Per paragonare le percezioni relative a due suoni uguali in ampiezza, ma differenti in frequenza, occorre utilizzare un filtro di ponderazione che simuli la risposta dell'apparato uditivo.

A tale scopo le norme ISO 226 [10] hanno proposto una metodologia e un filtro ad hoc.

L'obiettivo di questo studio consiste nel semplificare l'interpretazione dei dati relativi a rilievi/predizioni di emissioni sonore, proponendo un metodo di valutazione/previsione del comfort funzione di un'unica variabile: il livello di dB.

L'ipotesi che sta alla base di questa semplificazione è stata verificata da dati sperimentali mostrati in seguito. La veridicità di tale assunzione trova spiegazione nella casualità della frequenza relativa alle onde sonore emesse da un veicolo ferroviario. Infatti, variando di continuo la frequenza delle onde sonore emesse, la sensazione uditiva associata a un lasso di tempo, anche breve, risulta relativa ad una serie di suoni a frequenza random abbracciante un largo dominio di variazione. Pertanto, risulta statisticamente valida l'operazione di ritenere la percezione uditiva indipendente da un parametro che varia con casualità. Al fine di verificare sperimentalmente l'ipotesi sono stati utilizzati i dati rilevati da un esperimento condotto da Yamaguchi et al. [11]. In questo esperimento un gruppo di persone con capacità uditive normali (studenti con età compresa tra i 20 ed i 22 anni) è stato sottoposto ad un'emissione sonora a frequenza random e livello di dB variabile ogni 5 secondi. I soggetti sono stati invitati ad indicare in un questionario la sensazione di comfort uditiva percepita in una scala da 1 a 7 (vedi Tab. 4).

F_i	Impressioni
1	molto calmo
2	abbastanza calmo
3	leggermente calmo
4	medio
5	leggermente rumoroso
6	piuttosto rumoroso
7	molto rumoroso

Tab. 4 - Scala di percezione del rumore
[Fonte: [1]]

I dati rilevati durante l'esperimento hanno permesso a Yamaguchi et al. [11] di tracciare sette curve sperimentali, rappresentanti la distribuzione di frequenza dell'indice di comfort in funzione ai livelli di dB emessi.

Volendo considerare solo l'indice di comfort più frequente in ciascuna delle sette distribuzioni, è possibile costruire un singolo grafico in cui l'ordinata rappresenta proprio l'indice di comfort e in ascissa si hanno i livelli di dB.

Una volta determinati i punti sperimentali, l'equazione di regressione, che ha restituito risultati ottimali, è la relazione esponenziale di Stevens [12] tra stimolo fisico ed intensità percepita:

$$\psi = k\varphi^n \quad (13)$$

dove ψ rappresenta la percezione, φ lo stimolo, k ed n sono due parametri da valutare a seconda del fenomeno esaminato. Modificando opportunamente l'equazione, è stata integrata una taratura sulla soglia minima di dB che ha scaturito il massimo comfort ($F_i=1$).

$$\begin{cases} F_i = k(L_k - L_{k,0})^n - F_0 \\ k = 0.50; n = 0.64; L_{k,0} = 64dB; F_0 = 1 \end{cases} \quad (14)$$

Adottando tali valori, la regressione segue strettamente l'andamento della curva sperimentale (vedi Fig. 3) ed il coefficiente di regressione risulta più che soddisfacente ($R^2=0,9989$).

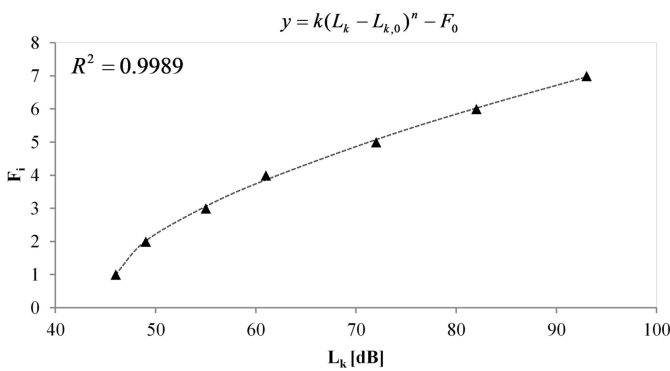


Fig. 3 - Relazione "Indice di comfort - livello di rumore" (Fonte: [1])

Occorre infine individuare le variabili progettuali che influenzano il livello di rumore valutando le relative soglie inferiore e superiore come visto in precedenza.

Le variabili individuate risultano le seguenti:

- α1: isolamento acustico;
- α2: velocità del veicolo ferroviario;
- α3: indice di difettosità della ruota;
- α4: indice di difettosità della rotaia;
- α5: indice di tortuosità.

5. Comfort Vibrazionale

Numerosi indici per la valutazione del disturbo prodotto dalle vibrazioni in ambito ferroviario sono stati proposti nella recente letteratura scientifica.

Generalmente molti di questi indici legano il disturbo fisico con l'accelerazione trasmessa al corpo del passeggero. Inoltre, in questo caso, come nel comfort acustico, le sensazioni umane dipendono sia dall'ampiezza e sia dalla frequenza della sollecitazione.

L'accelerazione nelle tre direzioni: lungo la direzione di marcia del treno [asse x], lungo asse verticale [asse z] e lungo l'asse trasversale [asse y], deve essere misurata attraverso accelerometri o stimata con l'ausilio di una simulazione 3D. È, quindi, possibile calcolare l'indice di comfort secondo il metodo ISO 2631 [13].

I tre valori di accelerazione misurati o stimati devono essere pesati con un filtro e successivamente è possibile calcolare il root mean square RMS:

$$a_w^{r.m.s.} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} a_w^2 dt} \quad (15)$$

L'indice di comfort è calcolato come:

$$a = \sqrt{k_x(a_{xw}^{r.m.s.})^2 + k_y(a_{yw}^{r.m.s.})^2 + k_z(a_{zw}^{r.m.s.})^2} \quad (15)$$

I valori limite dell'indice di comfort, che dimensionalmente è un'accelerazione [m/s^2], sono: $\alpha \in [0; 0.53]$.

Molte delle variabili che influenzano i valori dell'accelerazione e, quindi, il relativo comfort, sono le stesse viste nel caso del rumore, poiché l'origine è la stessa.

Le variabili individuate, pertanto, sono:

- α1: il sistema di smorzamento (ammortizzatori);
- α2: la velocità del veicolo ferroviario;
- α3: indice di difettosità della ruota;
- α4: indice di difettosità della rotaia;
- α5: indice di tortuosità.

L'ultima fase consiste nel calcolare $\alpha_{\Delta} = \alpha^s - \alpha^i$ come illustrato nel primo paragrafo.

6. Conclusioni

Nel modello proposto, dopo aver esplicitato tutte le variabili considerate e calcolato i relativi campi di variazione, è possibile definire l'ipersfera e il relativo vettore del comfort globale, nello spazio R^{n+m} .

È necessario, tuttavia, fare alcune considerazioni conclusive sulle variabili umane, infatti, anche se queste hanno un'evidente correlazione con il comfort, soprattutto quello

termico, non sono state considerate nell'ipersfera in quanto non regolabili (come visto in [3]). Queste variabili sono considerate come condizioni limite nel calcolo computazionale, cioè il campo variazionale delle variabili deve essere ricalcolato al variare della: stagione, temperatura esterna e umidità; condizioni che influenzano le scelte di vestiario dei passeggeri.

Per quanto, invece, concerne il comfort acustico, nonostante la frequenza del rumore sia rilevante nella determinazione della percezione dei passeggeri, i risultati sperimentali dimostrano che è possibile definire una relazione diretta tra indice di comfort e l'ampiezza delle onde sonore al variare casuale della frequenza. Pertanto, indice di comfort vibrazionale e acustico non dipendono dai fattori umani, un'eccezione può essere fatta nel caso di treni letto, nei quali i passeggeri, stando in posizione orizzontale, hanno una percezione del comfort vibrazionale modificata.

Bibliografia

- [1] Leonardi G., Ferrara R., *Comfort globale e sicurezza d'esercizio nelle infrastrutture viarie: un modello matematico per l'analisi delle relazioni uomo-veicolo-infrastruttura-ambiente*. In: Supplemento ai Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo, Serie II, No. 83, pp. 209 - 218, Palermo (Italy), 2011
- [2] ASHRAE, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ASHRAE Standard 55-1992
- [3] ASHRAE, *Thermal Comfort*. ASHRAE Handbook: Fundamentals, 2001
- [4] Yang W., Kang J., *Acoustic comfort evaluation in urban open spaces*. In: Applied Acoustics, 66, 2005
- [5] Huston D., Zhao X., Johnson C., *Whole-Body shock and vibrations: Frequency and Amplitude dependence of comfort*. In: Journal of Sound and Vibration, 2000
- [6] Butera F.M., *Principles of Thermal Comfort*. Renewable & sustainable energy reviews, 1998
- [7] Fanger P.O., *Assessment of man's thermal comfort in practice*. In: British Journal of Industrial Medicine, 30, pp. 313 - 324, 1973
- [8] DuBois D., DuBois E.F., *A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known*. In: Arch Intern Medicine, 17 :863-71, 1916
- [9] International Standard ISO 7730, *Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and Specifications of the conditions of thermal comfort*, 1984
- [10] International Standard ISO 226:2003 revision, *Acoustics. Normal equal-loudness-level contours*
- [11] Yamaguchi S., Kato Y., Oimatsu K., Saeki T., *A Psychological Evaluation Method for Fluctuating Random Noise Base on Fuzzy Set Theory*. In: Applied Acoustics, 45, 1995
- [12] Stevens S.S., *Psychophysics, Introduction to its Perceptual, Neural and Social Prospects*. Wiley, New York, 1975
- [13] International Standard ISO 2631, *Guide to evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibrations*, 1985
- [14] Leonardi G., Cirianni F., *Analisi dell'efficienza e della sicurezza di esercizio di un'infrastruttura ferroviaria*. In: LaborEst, n. 10, 2015

