

Implementazione di un modello di valutazione della cinetosi in treni ad assetto variabile

C. Braccesi, F. Cianetti

*Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università degli Studi di Perugia
Via G. Duranti 1 – 06100 Perugia
E-mail: cianfi@unipg.it*

Keywords: motion sickness, comfort, railway, tilting train, multibody simulation

Sommario

Il fenomeno cinetosi, comunemente noto con il nome di mal di mare o mal d'auto, anche se interessa comunque una piccola percentuale dei passeggeri, non è trascurabile se si analizza il comfort di treni ad assetto variabile. La cinetosi è un complesso fenomeno sia fisiologico sia psicologico che, pur essendo legato alla percezione del movimento, non presenta un'evidente relazione tra moto e grado di malessere.

Con il presente lavoro si è cercato di esaminare dei modelli che siano in grado di valutare la cinetosi a partire da grandezze facilmente misurabili. L'analisi dei modelli è stata effettuata a partire dalle simulazioni condotte su di un semplice modello multibody di veicolo ferroviario ad assetto variabile. Si è quindi implementato un nuovo modello di previsione che fornisce risultati vicini a quelli attesi risultando un notevole passo in avanti rispetto a quanto la normativa di oggi propone. Questo modello, oltre ad essere facilmente implementabile in ambiente di simulazione e, quindi, in fase di prototipazione, è, altresì, facilmente inseribile nel sistema di controllo di assetto rendendo possibile la modifica dei parametri di marcia del veicolo in time-domain.

Abstract

Although affecting a small percentage of passengers, motion sickness can not be neglected when tilting train comfort is analysed. Motion sickness is a complex physiological and psychological phenomenon linked to the perception of motion, however, there is no obvious relation between motion and sickness.

In this paper, different models have been examined which are able to assess motion sickness starting with easily measurable quantities. Models examination is performed using dynamic simulations, realised using a simple multibody model of a tilting train. Moreover, a new motion sickness theoretical model has been developed; it seems to yield the expected results and it is surely a step ahead compared to what the existing norm has proposed. This theoretical model can be easily implemented in dynamic simulation environment, that is in prototyping one, and easily usable in tilting control system allowing modification of vehicle ride parameters in time domain.

1. INTRODUZIONE

Oggi, nell'ambito del trasporto ferroviario, la ricerca è volta all'incremento della velocità di percorrenza dei convogli e al miglioramento del comfort dei passeggeri. I due aspetti sono però contrastanti, infatti, il principale limite che condiziona la velocità di percorrenza delle curve è la forza centrifuga che, se troppo elevata, rende il viaggio poco piacevole generando un fenomeno fisiologico comunemente noto con il nome di mal di mare o mal d'auto (cinetosi). Una soluzione al conseguimento dei suddetti obiettivi è l'utilizzo di treni ad assetto variabile (fig.1) che sono in grado di inclinare la carrozza verso l'interno della curva compensando l'accelerazione laterale subita dal passeggero [18]. In questo modo si riescono ad ottenere, a parità di comfort, incrementi di velocità del 25÷35 % rispetto ai normali treni.

Ma questa considerazione, del tutto generica e basata sull'esperienza, non è supportata da tecniche affidabili di valutazione oggettiva del livello di comfort raggiunto. Anzi i metodi codificati, validi ed utilizzati fino ad oggi per treni di tipo convenzionale, forniscono valori del tutto inattendibili.

La possibilità di prevedere il livello di comfort di un veicolo ferroviario, anche di tipo tiltante, in fase di progettazione è la principale motivazione di questa attività di ricerca condotta presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Perugia [5,6]. In questo lavoro in particolare è stata effettuata un'attenta ricerca ed analisi bibliografica per catalogare e valutare i diversi approcci sviluppati fino ad oggi per studiare la suddetta sintomatologia al fine di mettere a punto un modello di previsione attendibile. L'analisi dello stato dell'arte ha evidenziato l'esistenza di due principali approcci al problema: empirico e teorico, uno legato alla misura del numero di persone che sottoposto ai diversi tipi di moto riporta sintomi di

cinetosi, l'altro che cerca di individuarne le cause. Al primo è legato lo schema di analisi utilizzato dalla normativa oggi in vigore [1] che seguendo tale approccio si limita a cercare l'interazione fra il moto e la cinetosi trascurando tutti gli altri possibili stimoli ritenendo il moto sua principale causa (modello di *Griffin* nel quale viene analizzata la sola componente verticale delle accelerazioni). Per quanto riguarda il secondo approccio si deve parlare principalmente della teoria denominata "teoria del conflitto sensoriale", proposta da *Reason* e *Brand*, poiché è quella che oggi sembra meglio interpretare il problema. L'idea di base di *Reason* e *Brand* è che tutte le situazioni che provocano cinetosi sono caratterizzate da una condizione di rielaborazione sensoriale nella quale i segnali di moto trasmessi dagli occhi, dal sistema vestibolare e da tutti gli altri organi di senso sono in disaccordo l'un l'altro o con quelli attesi in base alle passate esperienze.

Analizzando i due approcci mediante l'utilizzo di semplici simulazioni su di un modello di treno tiltante questo lavoro evidenzia come l'approccio empirico, e quindi anche la normativa, mal si adatti a prevedere un indice di cinetosi in presenza di treni ad assetto variabile. Inoltre, modificando e sviluppando un modello teorico elaborato da *Bos* e *Bles* è stato messo a punto un modello di previsione che, basandosi sul concetto che tutte le situazioni che provocano la cinetosi sono caratterizzate dalla condizione nella quale la verticale percepita è in disaccordo con la verticale soggettiva predetta sulla base delle passate esperienze, ha dimostrato essere pienamente in accordo con i risultati attesi, contrariamente a quanto avveniva con i modelli empirici.

Tale modello può certamente essere definito un notevole passo in avanti rispetto a quanto la normativa di oggi propone. E' importante sottolineare che, oltre ad essere facilmente implementabile in ambiente di simulazione e, quindi, in fase di prototipazione, è altresì facilmente inseribile per esempio nel sistema di controllo di assetto rendendo possibile la modifica dei parametri di marcia del veicolo in time-domain.

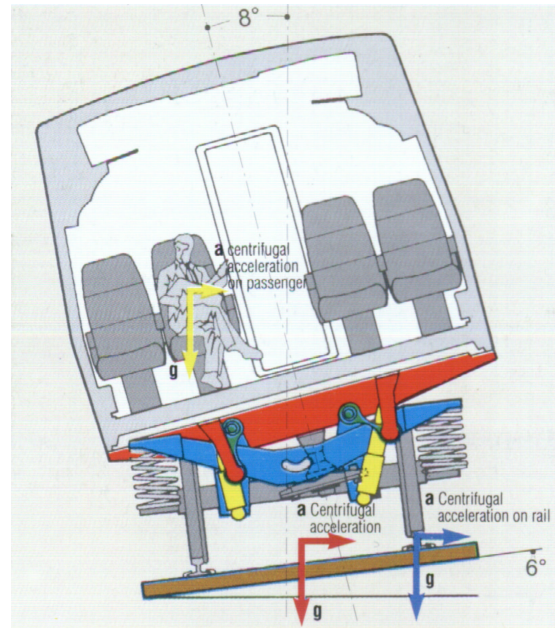


Fig. 1 Schema di carrozza ad assetto variabile

2. IL COMFORT NEI VEICOLI FERROVIARI

Il comfort di viaggio è l'effetto sul passeggero di un insieme di fattori ambientali, abitativi e dinamici del veicolo o dovuti al moto dello stesso. In figura (2) viene illustrata schematicamente l'interazione tra il sistema treno/tracciato ed il comfort di marcia.

Nella valutazione della qualità di viaggio sono spesso trascurati tutti i fattori ambientali e abitativi, limitandosi alla valutazione di poche variabili come l'accelerazione, le sue variazioni e gli spostamenti angolari; i disturbi che provocano una riduzione del comfort sono in genere raggruppati in tre principali gruppi:

- causati dal livello di vibrazioni;
- causati dall'alto valore dell'accelerazione laterale o dal jerk;
- causati da cinetosi.

Mentre le normative e la letteratura forniscono un certo numero di metodi di valutazione del discomfort nei veicoli ferroviari, dovuto all'alto livello di

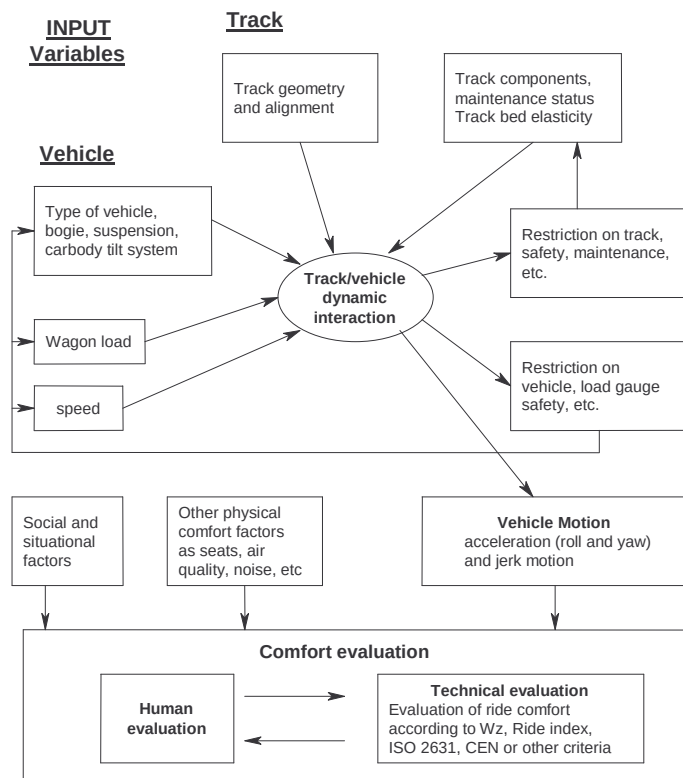


Fig. 2 Interazione tra sistema Treno/tracciato e comfort di marcia

vibrazioni, all'accelerazione laterale e dal jerk, non si può dire altrettanto per quello legato alla cinetosi.

3. ANALISI DELLA CINETOSI

La cinetosi è un complesso fenomeno sia fisiologico sia psicologico che pur essendo legato alla percezione del movimento non presenta un'evidente relazione tra moto e grado di malessere. Numerosi sono i fattori che possono essere collegati alla cinetosi; i principali sono le accelerazioni lineari e angolari a bassa frequenza che sono percepite dal sistema vestibolare (statolite e canale semicircolare), visivo e propriocettivo¹. I segnali sono trasmessi al sistema nervoso centrale (CNS) dove sono interpretati. Possibili fattori di modificazione sono l'esperienza, l'età, oltre a l'alcool, le droghe ecc. Tutte queste informazioni sensoriali sono integrate e registrate nel cervello dove sono continuamente confrontate sia tra loro sia con quelle immagazzinate con le passate esperienze. Questo confronto, fatto a livello subconscio permette di mantenere l'equilibrio, di muoversi o di fare altre attività. Le nuove informazioni raccolte vanno sempre ad arricchire il bagaglio delle nostre esperienze; in pratica il nostro sistema nervoso centrale si comporta come un sistema retro azionato.

4. APPROCCIO EMPIRICO

L'approccio empirico al problema della cinetosi è senz'altro il più comune ed è stato usato fin dai primi decenni del '900 anche se fino ad ora non ha dato i risultati sperati.

In uno studio sperimentale i parametri da tenere sotto controllo sono molteplici: la direzione del moto cui sono soggetti i volontari; la presenza di rollio o di altri movimenti angolari; il contenuto in frequenza; la postura dei volontari, che possono stare in piedi, seduti, con la testa appoggiata o meno; la presenza di stimoli visivi che possono anticipare o posticipare il sopraggiungere della nausea [4].

Tutto questo ha fatto sì che i risultati fino ad oggi disponibili, siano abbastanza incompleti e talvolta incoerenti tra loro. La maggior parte di essi riguarda le vibrazioni verticali con una forma d'onda semplicemente sinusoidale e solo in tempi più recenti la ricerca si è interessata alle vibrazioni orizzontali o angolari. Ancora, però, non sono stati presi in considerazione moti che abbiano componenti nelle tre direzioni, per cui risulta arduo costruire ed impossibile verificare un modello generale valido per qualunque tipo di movimento.

Un comune denominatore di tutti i risultati è che sono le bassissime frequenze (0.1÷0.5 Hz) ad essere la causa della cinetosi, indipendentemente dalla direzione del moto.

Tra tutte le ricerche sperimentali menzioniamo soltanto quella di *McCauley* [19]; anche se riguarda soltanto le oscillazioni verticali è la più completa e, soprattutto, dai suoi risultati *Griffin* [21] ha derivato il modello di previsione della cinetosi oggi utilizzato dalla normativa [1].

4.1 Modello di Griffin

Appartiene all'approccio empirico l'unica relazione proposta dalla normativa [1] per la valutazione della cinetosi (eq. 1).

$$MSI = K \cdot \left[\int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (1)$$

La suddetta relazione si basa sul concetto di "motion dose" ($MSDV_z$) (eq. 3) e definisce un indice *MSI* (Motion Sickness Incidence) che rappresenta la percentuale di persone che vomita entro un certo tempo; tale relazione è stata sviluppata da *Griffin* [21] utilizzando i dati sperimentali di *McCauley*. Sfruttando la relazione approssimativamente lineare tra la percentuale di persone che vomitavano prima della fine degli esperimenti ed il valore dell'accelerazione a cui erano sottoposti (eq. 2) *Griffin* stabilì che tale percentuale rimaneva dipendente

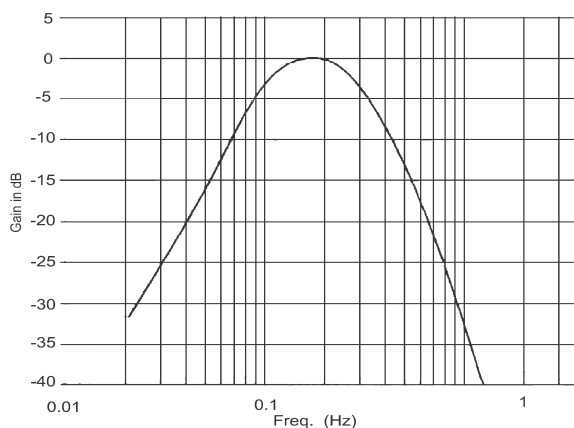


Fig. 3 Filtro W_f

¹ Le informazioni sensoriali che il sistema nervoso centrale elabora per mantenere l'equilibrio o per qualunque altra performance motoria provengono dal sistema esterolettivo (vista, udito, tatto, ecc.) e dal sistema propriocettivo (stato interno del sistema).

dalla sola frequenza.

$$\text{normalized sickness score} = \frac{\text{vomiting incidence}}{\text{acceleration (rms)}} \quad (2)$$

E' stato quindi possibile ricavare la relazione tra quest'ultima ed il "normalized sickness score"; rappresentata dal filtro in frequenza W_f illustrato in fig. (3).

Esaminando l'effetto della durata di esposizione al moto, poiché per sua stessa definizione l'indice *MSI* è un indice cumulativo, cioè il suo valore non può decrescere con l'andare del tempo, non possono essere presi in considerazione i fenomeni di recupero o di adattamento; *Griffin* introdusse il concetto di "motion dose" ($MSDV_z$), definito come l'integrale nel tempo del valore quadratico medio dell'accelerazione filtrata (funzione monotona crescente):

$$MSDV_z = \left[\int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (3)$$

dove T rappresenta il tempo espresso in secondi W_f il peso e a_w l'accelerazione verticale pesata. Quindi venne introdotta la relazione (1) che lega linearmente l'indice $MSDV_z$ con l'indice *MSI* attraverso la costante di proporzionalità K (con $K=1.3$).

È importante ricordare da quali dati è stata ricavata questa relazione e quindi definire i limiti di applicabilità che sono innanzi tutto la durata dell'esposizione (20 minuti + 6 ore) e il range in frequenza (0.1÷0.5 Hz).

Si può facilmente intuire che un modello di questo tipo (eq. 1), avendo come unico ingresso l'accelerazione verticale, mal si adatta ai treni ad assetto variabile, nei quali il rollio combinato con l'accelerazione laterale è ritenuto essere la principale causa della cinetosi. Tuttavia, essendo consigliato per la valutazione della cinetosi dalla norma ISO 2631 [1] resta comunque un ottimo termine di paragone.

4.2 Modello di Fostemberg

A seguito di una serie di test effettuati nel 1995 dallo "Swedish National Road and Transportation Research Institute (VTI)", realizzati al fine di comprendere come modificare la strategia di controllo di un treno ad assetto variabile avendo come obiettivo quello di aumentare il comfort collegato alla cinetosi senza ridurre la velocità o peggiorare in modo significativo il comfort dipendente dagli altri fattori, è stata individuata una relazione fra la "Motion Dose Roll Angle" ed i sintomi di cinetosi riportati dai passeggeri nei vari tratti del viaggio. In realtà, *Fostemberg* propone un modello molto simile a quello di *Griffin* tranne per il fatto che utilizza l'accelerazione angolare piuttosto che quella verticale:

$$SMSI \propto \left[\int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (4)$$

dove $a_w(t)$ è l'accelerazione angolare filtrata con lo stesso filtro utilizzato da *Griffin*.

Anche questo modello, derivato da un approccio di tipo sperimentale, è caratterizzato da una grande semplicità e dal fatto di avere un solo ingresso: l'accelerazione angolare [7–12].

5. APPROCCIO TEORICO

Utilizzando un approccio di tipo teorico, come già accennato nell'introduzione al lavoro, si deve parlare principalmente della teoria denominata "teoria del conflitto sensoriale", proposta da *Reason* e *Brand* (fig. 4). Nello schematizzare la sua teoria, *Reason* suppone l'esistenza di una memoria (neural store), nella quale sono registrate le caratteristiche essenziali di tutte le informazioni sensoriali precedentemente ricevute, e di un comparatore che sottrae dalle informazioni provenienti dagli organi di senso quelle opportunamente selezionate dalla memoria. Questa differenza,

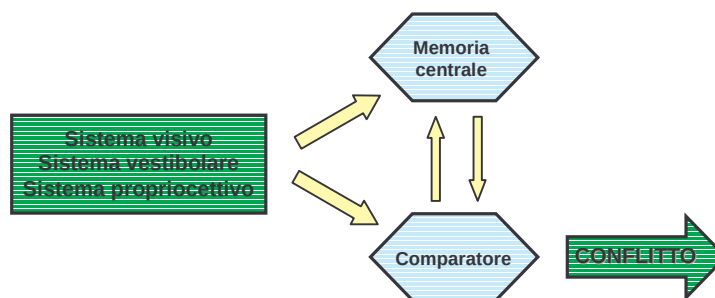


Fig. 4 Teoria del conflitto sensoriale

secondo l'autore, è la causa della cinetosi [22,23].

5.1 Modello di Bos e Bles

Il modello di *Bos* e *Bles* può essere considerato l'implementazione matematica di un'evoluzione dalla teoria di *Reason*. Il punto chiave della teoria di *Reason* è che la cinetosi è collegata alla differenza tra il vettore che rappresenta tutte le informazioni percepite dagli organi di senso ed il vettore che rappresenta informazioni sensoriali attese, differenza che appunto rappresenta il conflitto sensoriale.

Benché esistano molti esempi di diversi tipi di conflitti sensoriali che possono provocare la cinetosi, secondo *Bos* e *Bles* [2,3,25] sono tutti riconducibili alla difficoltà di determinare la verticale, ovvero la rappresentazione interna dell'accelerazione di gravità.

A dimostrazione di quest'ipotesi, si possono riportare i risultati di alcuni esperimenti in cui si è verificato che dopo una lunga centrifugazione solo i movimenti delle testa, che cambiavano l'orientamento di quest'ultima rispetto alla gravità, potevano portare alla nausea; in posizione seduta solo i movimenti di rollio e beccheggio della testa e non la rotazione di questa intorno ad un asse verticale, mentre se una persona è in posizione supina è il rollio a non avere alcun effetto.

Possiamo quindi concludere che tutte le situazioni che provocano la cinetosi sono caratterizzate dalla condizione nella quale la verticale percepita determinata sulla base delle informazioni provenienti dagli occhi, dal sistema vestibolare e dal sistema propriocettivo è in disaccordo con la verticale soggettiva predetta sulla base delle passate esperienze.

6. SVILUPPO DI UN NUOVO MODELLO TEORICO DI PREVISIONE DELLA CINETOSI

A partire dall'evoluzione introdotta da *Bos* e *Bles* alla teoria del conflitto sensoriale e, trascurando le informazioni sensoriali provenienti dal sistema propriocettivo e dal sistema visivo, gli autori hanno sviluppato un modello matematico della cinetosi del tutto generale facilmente applicabile al caso del comfort in treni tiltanti (fig. 5).

Gli ingressi sono l'accelerazione percepita dal passeggero, in generale un vettore di tre componenti e lo spostamento angolare della testa di questo rispetto ad un riferimento fisso.

Per calcolare la verticale attesa, si è ipotizzato che il sistema propriocettivo fosse schematizzabile come un filtro passa del primo ordine. In generale per ogni componente dell'accelerazione servirà un filtro con una diversa costante di tempo, quindi per far sì che queste costanti siano indipendenti dall'inclinazione della testa del passeggero, si è utilizzata una matrice di rotazione T che consente di proiettare l'accelerazione su un sistema di riferimento solidale con la testa del passeggero.

La stima della verticale attesa deve essere fatta tramite un modello interno basato sulle precedenti esperienze. Si potrebbe pensare di creare una tavola della memoria in cui inserire la rappresentazione matematica di tutte le situazioni che si possono incontrare. Il compito risulterebbe estremamente arduo e noioso. Si è scelta la strada, più semplice, di copiare le funzioni di trasferimento del sistema vestibolare aggiungendone altre che simulino il comportamento del sistema nervoso centrale. In pratica il conflitto moltiplicato per un fattore K è usato come ingresso al modello interno, costituito da un'integrazione e da un filtro passa basso analogo a quello usato per la verticale percepita. Per quanto riguarda la relazione fra il conflitto c e l'indice di cinetosi MSI , essendo c un vettore tridimensionale deve essere prima trasformato in uno scalare, per esempio facendone il modulo oppure, se si vuole tenere conto dell'influenza della direzione dell'accelerazione sulla rapidità di sviluppo della nausea, con una funzione opportuna $f(c)$. Poiché la relazione fra MSI ed il conflitto c è non lineare e, il massimo è raggiunto asintoticamente, si deve utilizzare una funzione di trasferimento che abbia queste proprietà. La scelta è caduta sulla funzione di Hill che ha anche il vantaggio di essere compresa tra 0 ed 1 e di privilegiare i bassi o gli alti valori di c impostando in modo opportuno i parametri n e b (fig. 5).

Per applicare tale modello generale di valutazione della cinetosi ai treni ad assetto variabile è sufficiente utilizzare una versione bidimensionale, il cui input è costituito solo dalle componenti laterale e verticale dell'accelerazione e dall'angolo di rollio; infatti, un treno in genere, percorre lunghi tratti a velocità costante e comunque le sue eventuali variazioni sono sempre di breve durata, limitata intensità oltre che poco frequenti mentre per le sue caratteristiche costruttive fenomeni di beccheggio sono in pratica assenti.

Come può notarsi dallo schema a blocchi del modello descritto in fig. (5), il modello contiene dei parametri che devono essere opportunamente tarati confrontando l'uscita del modello con alcune curve sperimentali. Per ciò che riguarda la componente verticale del conflitto si sono utilizzate alcune delle curve che descrivono andamento nel tempo dell'indice MSI ricavate da *McCauley* [19]. La scelta è caduta su queste sia perché sono fra le poche disponibili ma soprattutto perché con queste è stato ottenuto il modello di *Griffin*, utilizzato dalla norma ISO per la cinetosi oggi in vigore [1].

Per la componente orizzontale purtroppo, non esistono in letteratura delle curve analoghe per cui i

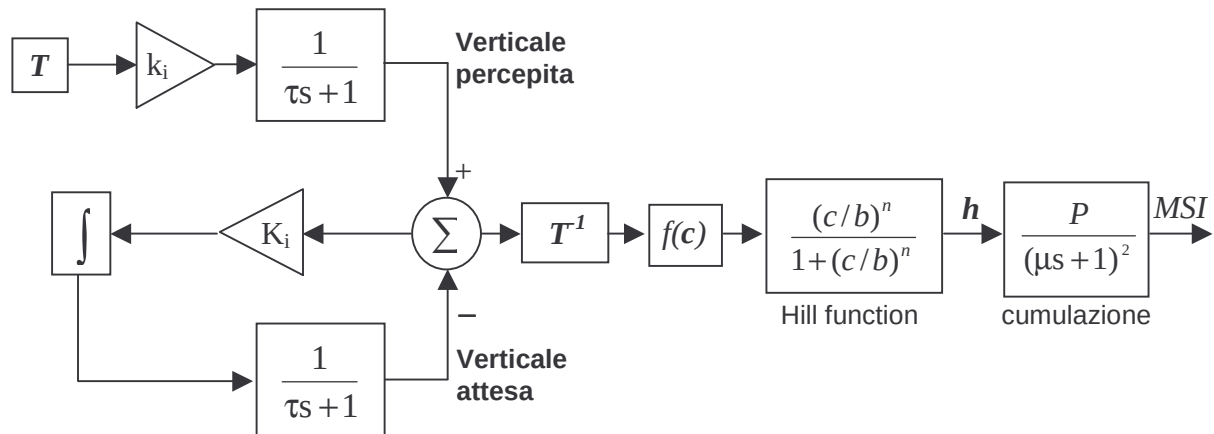


Fig. 5 Schema funzionale del modello di cinetosi implementato

rispettivi parametri sono stati modificati sulla base delle conclusioni fatte da *Golding* [13–17] al termine di alcuni suoi esperimenti. Egli applicando la formula di *Griffin* alle oscillazioni orizzontali notò che queste erano più nauseogeniche a parità d'accelerazione e che il filtro di pesatura doveva essere diverso. Si è deciso, quindi, in analogia a quanto suggerisce lo stesso *Golding* di moltiplicare la componente orizzontale dell'accelerazione per un fattore pari a radice di 2 e, seguendo le indicazioni dello stesso che indicano l'utilizzo di un filtro con pendenza compresa tra -3.7 dB/oct e -5.5 dB/oct per frequenze superiori a 0.25 Hz (non di -12 dB/oct come per le vibrazioni verticali), si sono opportunamente modificati i parametri K e τ (tab. 1).

τ_v (s)	τ_o (s)	K_v	K_o	n	b	μ (s)	P
2.4	0.6	3.36	0.84	2	0.7	900	0.85

Tab. 1 Valori delle costanti utilizzate nel modello di cinetosi

7. VERIFICA DEL MODELLO PROPOSTO

Al fine di confrontare la risposta dei vari modelli di cinetosi analizzati ed in particolare di quello sviluppato dagli autori, si sono effettuate delle simulazioni utilizzando un codice di calcolo di tipo multibody realizzando a tal fine un semplice modello di treno ad assetto variabile.

7.1 Il modello del veicolo

Il modello realizzato permette di analizzare l'influenza del sistema di controllo del tilting sul fenomeno della cinetosi. La carrozza è un corpo rigido posizionato sopra due carrelli e collegato ad essi dal sistema di sospensioni secondarie. Al suo interno sono stati costruiti i sensori necessari per misurare le accelerazioni a cui è sottoposto il passeggero e tutti gli altri input dei modelli di cinetosi proposti. Il carrello, che rappresenta il cuore del treno ad assetto variabile, contiene tutti i meccanismi che permettono l'inclinazione della cassa. La strategia di controllo del tilting che è stata utilizzata è molto semplice ma più che sufficiente per i nostri scopi. Si è deciso di utilizzare un solo ingresso, l'accelerazione non compensata sul carrello (ANC), ed un semplice filtro passa basso del prim'ordine per ripulirla dal rumore. Ovviamente in questo modo si introduce anche un ritardo pari a τ_1 .

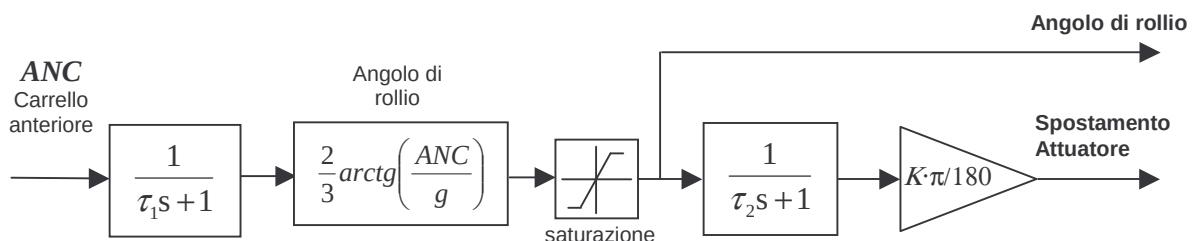


Fig. 6 Schema del sistema di controllo di assetto del modello MBS

Da semplici considerazioni geometriche si può stimare in modo approssimativo l'angolo di rollio per compensare circa il 67% della forza centrifuga (fig. 6).

È stata inoltre inserita una saturazione di 8° per tenere conto dei limiti cinematici; con un altro filtro del prim'ordine si introduce un ulteriore ritardo τ_2 , la cui uscita è convertita in spostamento dell'attuatore.

7.2 Le simulazioni

Il principale obiettivo delle simulazioni è stato quello di valutare la bontà dei modelli di previsione della cinetosi in assenza ed in presenza del controllo di assetto. Inoltre, le simulazioni dovevano consentire di valutare gli indici al variare delle strategie di controllo in particolare al variare del ritardo cui il treno inizia ad inclinarsi rispetto al momento in cui entra in curva, essendo questo uno dei fattori più importanti ai fini del comfort.

A questo scopo sono state fatte cinque simulazioni (tab. 2); nelle prime tre sono state cambiate le costanti di tempo dei filtri del sistema di controllo di assetto (fig. 6), mentre nelle altre due si è bloccato sistema di tilting.

Simulazione	Assetto variabile	τ_1 (s)	τ_2 (s)	Velocità (Km/h)
I	Si	0.5	0.1	125 ÷ 130
II	Si	0.5	0.2	125 ÷ 130
III	Si	0.7	0.2	125 ÷ 130
IV	No	-	-	125 ÷ 130
V	No	-	-	105 ÷ 110

Tab. 2 Parametri caratteristici delle simulazioni condotte

Analizzando le condizioni di simulazione possiamo osservare che l'aumento delle costanti di tempo dei filtri mira ad incrementare il ritardo con cui il treno inizia ad inclinarsi e, quindi, ci si attende un peggioramento del comfort. Per quanto riguarda la simulazione IV, condotta ad assetto fisso ed ad alta velocità e, quindi, caratterizzata da accelerazioni subite dal passeggero molto elevate (ben al di sopra di quelle tollerate dalla normativa), ci si è prefissi l'obiettivo di capire come si comportano i vari modelli di cinetosi quando il rollio è quasi nullo e le accelerazioni laterali molto elevate. Per quanto invece concerne la V, la velocità di percorrenza è quella di un normalissimo treno e, quindi, le accelerazioni subite dal passeggero pur essendo più elevate rispetto alle prime tre prove rientreranno in quelle ammesse dalle norme. In questo caso ci si attende che i valori dei vari indici di cinetosi siano relativamente bassi in quanto nei normali treni non si segnalano frequenti casi di nausea o malessere.

Per ogni simulazione sono stati utilizzati nove punti di misura, tre all'altezza del carrello anteriore, tre nella parte centrale del vagone e gli altri tre all'altezza del carrello posteriore. Ovviamente questi sono stati posizionati vicino ai finestrini laterali e nel corridoio centrale. In questo modo si è cercato di vedere se la posizione del punto di misura all'interno del vagone è in grado di determinare variazioni degli indici, è, infatti, noto che nella parte anteriore del vagone si ha probabilità di nausea più elevata in quanto il ritardo con cui avviene la compensazione è maggiore.

Le simulazioni sono state fatte su un tracciato misurato, che corrisponde ad un tratto di circa 20 Km. Questo è caratterizzato da numerose curve di raggio molto stretto (spesso inferiore a 500m), che possono essere percorse ad elevata velocità solo con treni ad assetto variabile.

La velocità imposta al nostro treno varia tra 125 e 130 Km/h e corrisponde esattamente a quella utilizzata dai treni di rango P (sono i treni più veloci). In questo modo in alcune curve abbiamo un'accelerazione non compensata sul carrello maggiore di 1.7 m/s^2 valore che impone il massimo angolo di rollio della cassa.

Per le analisi sono stati utilizzati due software commerciali: il modulo Rail del software multibody ADAMS ed il modulo Simulink del codice di calcolo numerico Matlab.

8. ANALISI DEI RISULTATI

Analizziamo separatamente i risultati ricavati dai tre modelli di cinetosi illustrati.

Per quanto riguarda l'analisi dei risultati ottenuti con il modello proposto in questo lavoro risulta evidente come tutti i risultati siano perfettamente congruenti con quello che ci si attende nella realtà (fig.7, fig.9, fig.10, fig.13). Attraverso tale metodo si possono discriminare in maniera affidabile le scelte progettuali mirate al comfort sia in termini di caratteristiche del controllo di assetto, sia in termini di velocità di marcia nonché delle caratteristiche topologiche del tracciato.

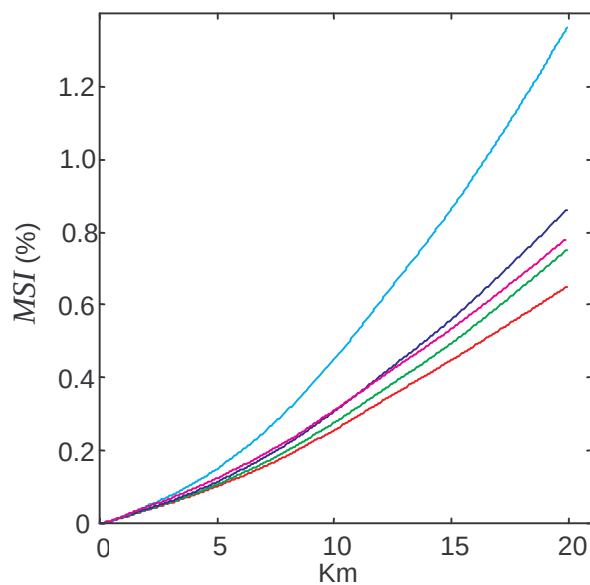


Fig. 7 MSI - Modello proposto

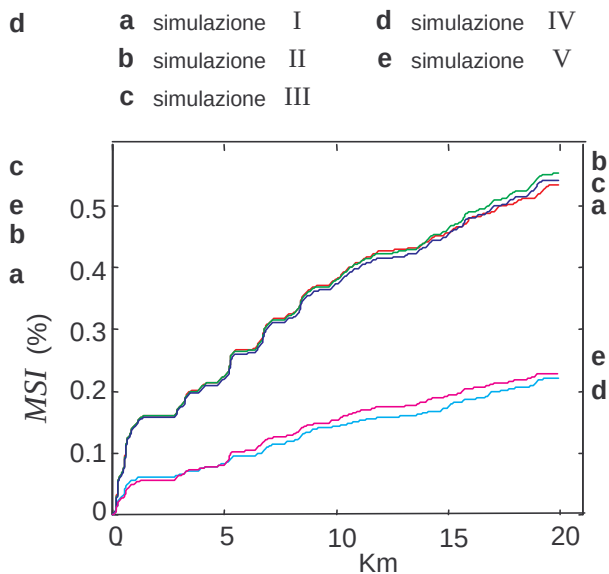


Fig. 8 MSI - Modello di Griffin

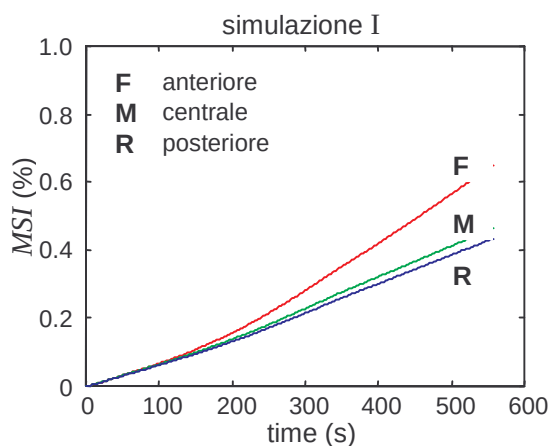


Fig. 9 MSI valutato nella simulazione I in varie posizioni del passeggero (lato dx) – Modello proposto

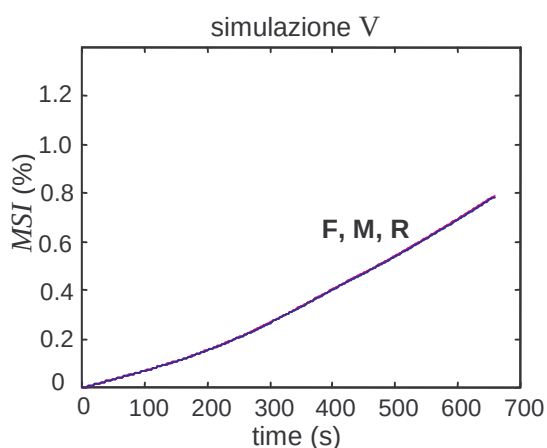


Fig. 10 MSI valutato nella simulazione V in varie posizioni del passeggero (lato destro) – Modello proposto

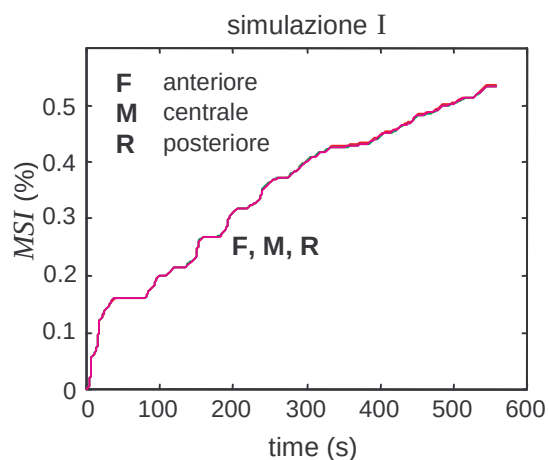


Fig. 11 MSI valutato nella simulazione I in varie posizioni del passeggero (lato destro) – Modello di Griffin

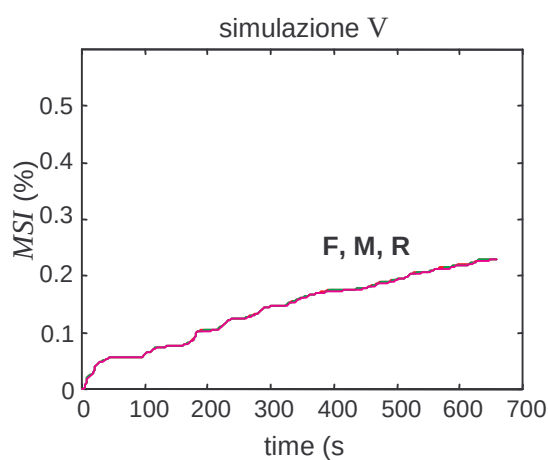


Fig. 12 MSI valutato nella simulazione V in varie posizioni del passeggero (lato destro) – Modello di Griffin

Relativamente alle prime tre simulazioni, è evidente che il modello proposto prevede correttamente la variazione di comfort al variare del ritardo del controllo di assetto (fig. 7), infatti, aumentando il ritardo del tilting si ha un progressivo peggioramento del comfort collegato alla chinetosi. Nella simulazione IV, in assenza di controllo di assetto e con stessa velocità di marcia delle tre analisi precedenti, il comfort risulta notevolmente peggiorato (fig. 7) come era ovvio attendersi. Se invece abbassiamo quest'ultima fino a raggiungere quella usata dai normali treni (simulazione V) otteniamo dei valori di chinetosi intermedi (fig. 7) che dimostrano come il tracciato in esame mal si adatti a treni senza controllo di assetto.

Analizzando i risultati forniti dal modello empirico di *Griffin* (quello di *Fostemberg* ha una analogo comportamento) si nota sia come questo si dimostri insensibile alle variazioni delle costanti di tempo del controllo (fig. 8), sia, soprattutto, come valuti le prove con tilting bloccato molto più confortevoli delle altre completamente in disaccordo con ogni previsione ed esperienza (fig. 8); oltretutto tale modello non rileva una differenza significativa tra la prova a bassa velocità rispetto a quella con velocità più elevata (fig. 8).

Analizzando i risultati in maniera ancor più dettagliata andando a discriminare in funzione delle posizioni dei passeggeri sia in direzione longitudinale che trasversale della cassa si può affermare che solo il modello teorico proposto si dimostra sensibile alla posizione del punto di misura delle accelerazioni. Per quanto riguarda i risultati della simulazione I (fig. 9) si può verificare come, per ciò che concerne la posizione in senso longitudinale al treno, dal modello teorico risulti che i passeggeri seduti nella parte anteriore della carrozza di un treno ad assetto variabile, abbiano una maggiore probabilità di sviluppare nausea rispetto agli altri, mentre non ci sia alcuna differenza nei normali treni (fig. 10), così come accade effettivamente nella realtà; infatti, il ritardo del sistema di tilting è molto più significativo per i passeggeri seduti davanti essendo questi i primi ad entrare in curva, cosa che dovrebbe quindi peggiorare il comfort di viaggio; per i vagoni successivi, qui non considerati, l'importanza della posizione dovrebbe essere molto inferiore.

Gli altri due modelli sia di *Griffin* che di *Fostemberg*, invece, producono delle curve perfettamente sovrapposte dimostrandosi così insensibili alla variazione del parametro in gioco (figg. 11, 12).

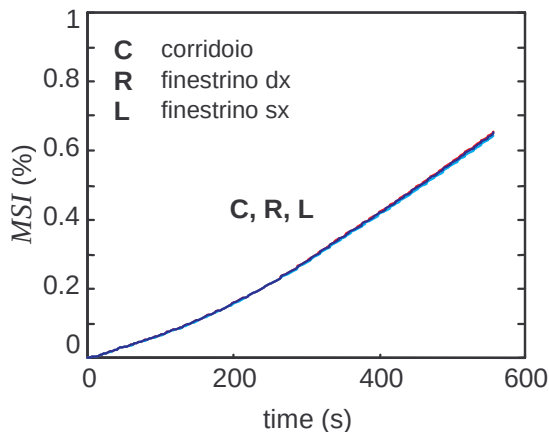


Fig. 13 MSI valutato nella simulazione I in varie posizioni del passeggero – Modello proposto

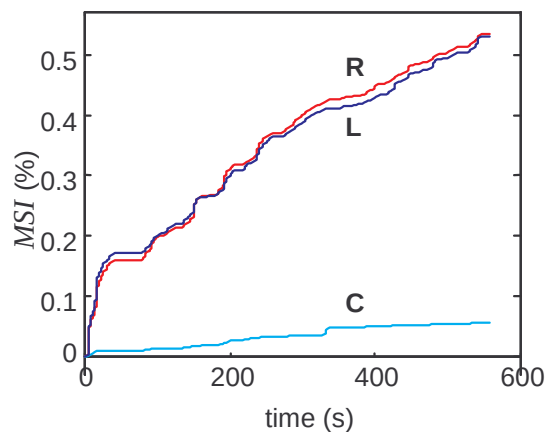


Fig. 14 MSI valutato nella simulazione I in varie posizioni del passeggero – Modello di Griffin

Analoghe conclusioni si possono trarre analizzando i risultati forniti dai vari modelli per ciò che concerne la posizione dei passeggeri in senso trasversale al senso di marcia. Anche in questo caso il modello teorico risulta rispondente alle rilevazioni sperimentali mentre i modelli empirici cadono spesso in contraddizione con la realtà. Come si può osservare nella fig. (13) il modello teorico non fa sostanziali differenze tra le posizioni centrale e laterale (come era da attendersi) mentre il modello di *Griffin* (fig. 14), pesando solo le accelerazioni verticali, osserva una elevata differenza in termini di MSI tra la posizione centrale (sull'asse di rollio e, quindi, con minima accelerazione verticale) e quella laterale (con massima accelerazione verticale), cosa che non è riscontrabile nella realtà, nella quale la probabilità che i passeggeri in una stesa posizione in senso longitudinale segnalino sintomi di nausea è la stessa.

9. CONCLUSIONI

In questo lavoro si è dimostrato come il modello di previsione della cinetosi di *Griffin*, attualmente proposto dalle normative in vigore [1], non è applicabile ai treni ad assetto variabile. Infatti, considerando la sola accelerazione verticale non si è dimostrato sensibile ai principali parametri di marcia e di assetto. Un discorso analogo può essere fatto sul modello proposto da *Fostemberg* anch'esso di tipo empirico.

Utilizzando un modello teorico proposto dagli autori come evoluzione di quello elaborato da Bos e Bles si è dimostrato invece come l'approccio al problema formulato da questi ultimi, che oltre ad avere una base teorica ben delineata tiene conto sia di tutte le componenti dell'accelerazione sia del rollio, sia idoneo alla valutazione della cinetosi in ogni condizioni di marcia sia in presenza che in assenza di controllo di assetto riuscendo a discriminare oltre che tra le diverse strategie di assetto anche tra altrettanto importanti parametri quali la posizione del passeggero sia in senso parallelo alla direzione di marcia che ad essa trasversale.

Quest'ultimo modello è sicuramente un notevole passo in avanti rispetto a quanto la normativa di oggi propone.

Bibliografia

- [1] International Standard, ISO 2631-1 1997 (E);
- [2] Bos JE. Bles W., *Modelling motion sickness and subjective vertical mismatch detailed for vertical motions*, Brain Research Bulletin, 47(5):537-542, 1998 Nov 15;
- [3] Bles W. Bos JE. de Graaf B. Groen E. Wertheim AH., *Motion sickness: Only one provocative conflict ?*, Brain Research Bulletin, 47(5):481-487, 1998 Nov 15;
- [4] Calkins DS. Reschke MF. Kennedy RS. Dunlop WP., *Reliability of provocative tests of motion sickness susceptibility*, Aviation Space & Environmental Medicine, 58(9 Pt 2):A50-4, 1987 Sep. ;
- [5] Fabio Muzzioli, *Analisi a calcolo di un indice di cinetosi per treni ad assetto variabile*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Perugia, maggio 2000;
- [6] Braccesi C., Cavalletti M., Cianetti F., *Implementazione di una procedura automatica per la valutazione del comfort in veicoli ferroviari*, XXX Convegno Nazionale AIAS, Alghero, settembre 2001;
- [7] Förstberg J., *Motion related comfort levels on trains - influence of different tilting strategies on the ride comfort, tests made with the high-speed train X2000* (in Swedish: *Rörelserelaterad komfortnivå på tåg - Inflytande av olika strategier för korglutningen med avseende på åkkomfort*, utförda på snabbtåget X2000), KTH, Stockholm 1996, ISRN KTH/FKT/FR-96/17-SE;
- [8] Förstberg J and Ledin T., *Discomfort caused by low-frequency motions - A literature survey of hypotheses and possible causes of motion sickness*, KTH, Stockholm 1996, ISRN KTH/FKT/FR-96/39-SE;
- [9] Förstberg J., *Motion-related comfort levels in trains*, Licentiate Thesis, KTH, Stockholm 1996, ISRN KTH/FKT/LA-96/41-SE;
- [10] Förstberg J., *Comfort disturbances caused by low-frequency motions*, VTI, Linköping 1994, VTI 71-1994;
- [11] Förstberg J., *Comfort disturbances caused by low-frequency motions in modern trains - A project description*, VTI, Linköping 1994, VTI 36-1994;
- [12] Förstberg J, Andersson E, and Ledin T., *Influence of different conditions for tilt compensation on symptoms of motion sickness in tilting trains*, Brain Research Bulletin, 1998;
- [13] Golding JF. Finch MI. Stott JR., *Frequency effect of 0.35-1.0 Hz horizontal translational oscillation on motion sickness and the somatogravic illusion*, Aviation Space & Environmental Medicine, 68(5):396-402, 1997 May;
- [14] Golding JF. Markey HM., *Effect of frequency of horizontal linear oscillation on motion sickness and somatogravic illusion*, Aviation Space & Environmental Medicine, 67(2):121-6, 1996 Feb;
- [15] Golding JF. Kerguelen M., *A comparison of the nauseogenic potential of low-frequency vertical versus horizontal linear oscillation*, Aviation Space & Environmental Medicine, 63(6):491-7, 1992 Jun;
- [16] Golding JF. Benson AJ., *Perceptual scaling of whole-body low frequency linear oscillatory motion*, Aviation Space & Environmental Medicine, 64(7):636-40, 1993 Jul;
- [17] Golding JF., *Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness*, Brain Research Bulletin, 47(5):507-516, 1998 Nov 15;
- [18] Gugliotta A. Somà A. Arrus P., *Simulazione dinamica di un veicolo ferroviario ad assetto controllato*, Atti del XXVII Convegno Nazionale AIAS, Perugia, settembre 1998;
- [19] Guignard JC. McCauley ME., *Motion sickness incidence induced by complex periodic waveforms*, Aviation Space & Environmental Medicine, 53(6):554-63, 1982 Jun;
- [20] Hildebrand, R.L., *Low frequency vibration: Modelling and applications*, Inter-Noise 97, Budapest, Hungary;
- [21] Lawther A. Griffin MJ., *Prediction of the incidence of motion sickness from the magnitude, frequency, and duration of vertical oscillation*, Journal of the Acoustical Society of America. 2(3):957-66, 1987 Sep;
- [22] Oman CM., *A heuristic mathematical model for the dynamics of sensory conflict and motion sickness*, Acta Oto-Laryngologica - Supplement. 392:1-44, 1982;
- [23] Oman CM., *Motion sickness: a synthesis and evaluation of the sensory conflict theory*, Canadian Journal of Physiology & Pharmacology. 68(2):294-303, 1990 Feb;
- [24] Park WJ. Crampton GH., *Statistical analysis of censored motion sickness latency data using the two-parameter Weibull distribution*, International Journal of Bio-Medical Computing. 22(3-4):295-301, 1988 May-Jun;
- [25] Wertheim AH. Bos JE. Bles W., *Contributions of roll and pitch to sea sickness*, Brain Research Bulletin, 47(5):517-524, 1998 Nov.