

Politecnico di Milano

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Dipartimento di Energia



ANALISI E DETERMINAZIONE DELLE FASCE DI ACCETTABILITÀ PER IL COMFORT TERMICO IN EDIFICI VENTILATI NATURALMENTE

Relatore: **Dr. Alessandro DAMA**

Tesi di:

Alessio TIENGO Matr. n. 801661

Anno Accademico 2014/2015

Ringraziamenti

Credo sia bello, e al contempo spaventoso, vivere il momento in cui capisci che sta succedendo qualcosa che potrebbe sconvolgere la tua vita. All'inizio uno non ci crede, vede certi traguardi come lontanissimi, al punto da dire: "Chissà quando succederà"? Proprio oggi, come mai prima d'ora, penso che la mia vita come l'ho vissuta fino ad adesso stia per cambiare. Azioni e sensazioni che negli ultimi anni erano per me un pensiero lontano, ora prendono consistenza e mi proiettano verso quello che sarà il mio futuro. Forse i miei sono pensieri esagerati, dopotutto rimango la persona che sono stato nei mesi precedenti a questi. Davvero le cose potrebbero cambiare così tanto? Non lo so.

Una costante è un parametro che tendenzialmente non cambia. Se al momento non l'hai inserita nei tuoi calcoli, lei non si modifica, e quando torni ad inserirla, lei conserva immutato il suo valore. Quello che non cambierei per niente al mondo sono appunto queste costanti della mia vita. A loro modo, hanno permesso che io raggiungessi questo traguardo. Costanti vicine e lontane, che non mi hanno dimenticato e che non ho dimenticato.

A questo punto credo sia il caso di togliere il velo del mistero e delle metafore e iniziare a fare ciò che effettivamente va fatto in questa parte della tesi.

Ringrazio vivamente la mia famiglia, la mia mamma Mariarosa, il mio papà Giuseppe e mia sorella Chiara. Grazie a voi esiste un ambiente che posso chiamare "casa", dove posso ristorare il corpo, la mente e il cuore. Capita a tutti di avere momenti difficili, ma penso che la nostra sia una bellissima famiglia e non la cambierei per niente al mondo, GRAZIE.

Ringrazio vivamente te Martina mia, che SEMPRE mi sei vicina. Ora potrebbe davvero accadere qualcosa, non credi? Anni passati a dire: "fra X anni faremo". Potrebbe mancare poco a finire quei X anni che ogni volta decidevamo arbitrariamente. Nonostante succede spesso che rimarchi il fatto che non hai pazienza, a bilancio concluso risulta che ne hai tirata fuori fin troppa. Soprattutto visto e considerato che hai passato le tue uniche ferie di quest'anno a sentirmi continuamente parlare della tesi. GRAZIE

Ringrazio vivamente Emanuele, Walter e Jack. A noi che in questi ANNI ci siamo sempre ritrovati insieme. Solitamente si dice nel bene e nel male, ma mi sento di dire che la cosa è stata sempre nel bene. Ecco cosa mi piace dire a voi che siete i miei compagni: "è un onore condividere con voi questa vita". Continuiamo così. Una menzione speciale a Walter (progettista e assemblatore dei nostri bolidi) che si è sbattuto per fare in modo che avessi un super computer per scrivere la tesi o per distrarmi così da non scriverla. GRAZIE

Ringrazio Federico e Francesco, grazie a cui abbiamo sempre condiviso serate di altissimo livello tutti insieme. La mia speranza ricade nel fatto che ciò possa tornare a succedere spesso come una volta. GRAZIE

Vorrei davvero ringraziare Eloisa. Ci sono stati momenti in cui mi sono sentito un po' giù in questo percorso di tesi e tu riuscivi sempre a tirarmi su. Io sono in genere una persona ottimista, ma penso che te lo sia molto più di me. GRAZIE

Vorrei ringraziare Michela che sa il piccolo segreto dei ringraziamenti, e che mi manda i gattini per tenermi tutto di un pezzo. GRAZIE

Ringrazio Erika, Matteo, Sarah, Stefano, Paola, Ylenia e Michele. A voi che ci siete sempre stati nei momenti importanti, e non avete mai mancato di farmi fare quattro risate. GRAZIE

Ringrazio Alessandro Dama, il mio relatore. Al terzo anno di università, un professore del politecnico ci disse che il relatore non andava inserito nei ringraziamenti, perché questo lavoro era attribuibile anche lui e il suo nome compariva già in copertina. Io me ne infischio. Grazie mille Alessandro per la pazienza che ci siamo dedicati a vicenda. Penso che abbiamo lavorato bene al fine di realizzare questo lavoro di tesi. GRAZIE

Ringrazio Mauro che il giorno del primo esame in assoluto al politecnico mi trovò appena uscito dal portone di casa. Quel giorno "batté le stecche" così da portarmi fortuna. Eccomi qui alla fine sano e salvo. GRAZIE

Ringrazio i miei parenti, specialmente Sara e Luca, che mi hanno sempre ascoltato mentre raccontavo le peripezie di questo lavoro di tesi e di come prima o poi sarei arrivato alla sua conclusione, senza ovviamente sapere il quando. GRAZIE

Ringrazio tutti quelli che di giorno in giorno mi hanno spronato a dare il massimo, così da arrivare finalmente a questo traguardo. GRAZIE

A questo punto parlo proprio di te, che stai leggendo e sei arrivato fino a qui. Se lo hai fatto vuol dire che hai preso in mano la mia tesi, vuol dire che qualcosa di me ti importa e nel tuo modo speciale sei stato presente in questi anni. Ti ringrazio molto per essermi stato accanto, anche nel caso in cui quel tempo è stato poco. GRAZIE

Riassunto Esteso

Questo lavoro si è basato su database internazionali disponibili online. I risultati ottenuti in questo lavoro derivano dall'importante lavoro effettuato nell'ambito del progetto ASHRAE RP-884. Sono stati elaborati un numero consistente, seppur limitato, di campioni ottenendo in alcuni casi dei dati con una discreta rilevanza statistica. Un limite riscontrato nell'ambito del lavoro è la necessità di avere campioni grandi e numerosi, dove gli individui condividano una condizione climatica il più simile possibile, riferiti a un ampio spettro di condizioni climatiche durante l'anno.

Il lavoro ha preso spunto da una rianalisi dell'esperienza di Fanger del 1970 attraverso la quale veniva determinata nella percezione del benessere termico la correlazione tra il voto medio previsto (PMV) e la percentuale di insoddisfazione prevista (PPD) tra gli occupanti. La metodologia adottata in questa rianalisi permette di determinare la varianza della distribuzione (assunta normale) dei voti e tramite di essa la correlazione tra gli indici PMV e PPD. L'obiettivo di questa tesi è stato: verificare quanto la metodologia di analisi proposta possa essere estesa ed applicata anche ad edifici ventilati naturalmente, dedurre i valori di σ (radice della varianza) e k (fattore di correlazione tra voto medio e scostamento dalla temperatura di comfort) e studiare l'impatto che tali valori hanno nella determinazione degli intervalli di accettabilità nell'intorno della temperatura di comfort.

Il comfort adattivo è una teoria normata da diversi standard, tra cui l'ASHRAE 55-2013 e l'UNI EN 15251:2008, che prevede la determinazione di una temperatura di comfort per gli occupanti in funzione di un parametro che descrive la temperatura esterna. Generalmente sono utilizzate come parametro delle medie pesate delle temperature dei giorni precedenti, denominate *mean running temperature* (Trm). Oltre alla temperatura di comfort, tali standard prescrivono anche un range di temperature entro quale la temperatura deve risiedere, così da garantire una minima quantità di occupanti soddisfatti.

I database utilizzati in questo studio sono quelli mostrati in tabella I. Essi derivano in gran parte da ambienti ventilati naturalmente. Alcuni di essi hanno una controparte di dati ricavata da edifici ventilati meccanicamente che sono stati utilizzati per effettuare dei confronti fra

le due tipologie di impianto. I dati contenuti in questi database sono stati trattati per ottenere dei campioni di almeno 20 individui che condividessero lo stesso edificio, la stessa temperatura operante e la stessa *mean running temperature*. Con i campioni di ogni zona geografica è stata effettuata una *probit analysis* al fine di ottenere la varianza della distribuzione dei voti di percezione termica. Il processo di *probit analysis* si effettua per ogni campione a partire dai voti medi e dalle percentuali di individui che percepivano una situazione sgradevole di tipo caldo o di tipo freddo. L'analisi tra individui che avevano caldo e che avevano freddo era separata e portava ognuna ad un valore di varianza. I valori della radice della varianza ottenuti e la loro affidabilità statistica sono mostrati nelle tabelle II, III, IV, V.

N. Database in RP-884	Luogo	Anno	Tipologia	Stagione
-	Milano, Italia	2008	NV	Estate
-	Milano, Italia	2008	HVAC	Estate
11	Brisbane, Australia	1984	HVAC	Estate
12	Brisbane, Australia	1984	NV	Estate
16	Melbourne, Australia	1983	NV	Estate
23	Peshawar, Pakistan	1993	NV	Estate
27	Atene, Grecia	1993/1994	NV	Estate
33	San Francisco Bay area, California, USA	1987	NV	Estate
38	Merseyside area, Liverpool, Regno unito	1994	NV	Estate
41	Singapore, Repubblica di Singapore	1986	HVAC	Estate
42	Singapore, Repubblica di Singapore	1987	NV	Estate
49	Honolulu, Hawaii, USA	1995	NV	Stagione calda
50	Honolulu, Hawaii, USA	1995	HVAC	Stagione Calda

Tabella I– Database elaborati

Al fine di valutare i risultati, oltre al coefficiente di determinazione R^2 , è stata considerata la numerosità del campione al fine di determinare la probabilità (PF) che il modello di regressione lineare sia risultato di una correlazione fortuita (Taylor, 1986). Tale metodo si basa sul fatto che un R^2 per essere valido, non deve solo essere elevato, ma anche ricavato da un numero cospicuo di campioni. Nella tabelle sono infatti contenuti il numero di punti con cui è stato ricavato ogni valore di varianza e PF. Nel nostro studio un modello era considerato accettabile quando l' R^2 era maggiore del 60% e la PF minore del 15%.

Ramo caldo degli insoddisfatti NV			
Località	σ	R^2	PF (n. punti)
Peshawar	1,13	97 %	< 1 % (7)
Singapore	0,87	94 %	< 1 % (7)
Melbourne	0,77	94 %	12 % (4)
Brisbane	0,82	89 %	< 1 % (15)
San Francisco Bay Area	0,96	85 %	14 % (5)
Atene	0,61	74 %	< 1 % (24)
Honolulu	1,05	74 %	3 % (9)
Milano	0,67	54 %	51 % (4)
Merseyside Area	1,12	0 %	100 % (3)

Tabella II – Deviazioni standard per il ramo caldo degli insoddisfatti NV

Ramo freddo degli insoddisfatti NV			
Località	σ	R ²	PF (n. punti)
Melbourne	0,95	> 99 %	< 1 % (3)
Singapore	0,77	54 %	39 % (5)
Milano	0,96	45 %	59 % (4)
Atene	1,16	41 %	73 % (3)
Brisbane	1,04	27 %	68 % (5)
Peshawar	0,22	7 %	92 % (5)
Honolulu	1,04	0 %	100 % (7)
Merseyside Area	1,44	0 %	100 % (3)
San Francisco Bay Area	na	na	na

Tabella III – Deviazioni standard per il ramo freddo degli insoddisfatti NV

Ramo caldo degli insoddisfatti HVAC			
Località	σ	R ²	PF (n. punti)
Singapore	1,01	82 %	27 % (4)
Milano	1,03	72 %	36 % (4)
Brisbane	0,92	66 %	13 % (7)
Honolulu	0,89	14 %	91 % (3)

Tabella IV – Deviazioni standard per il ramo caldo degli insoddisfatti HVAC

Ramo freddo degli insoddisfatti HVAC			
Località	σ	R ²	PF (n. punti)
Singapore	0,97	97 %	3 % (5)
Honolulu	1,06	93 %	1 % (6)
Milano	0,90	84 %	25% (4)
Brisbane	0,86	51 %	26 % (7)

Tabella V – Deviazioni standard per il ramo caldo degli insoddisfatti HVAC

Il primo confronto è tra le radici della varianza ottenute in questo lavoro e tra la varianza della distribuzione ottenuta dai dati contenuti nella pubblicazione del professor Fanger (1970). Tali dati sono quelli da cui deriva la correlazione che lega il PPD al PMV. La distribuzione dei voti estrapolati dall'esperienza del Professor Fanger, risulta avere una radice delle varianza pari a 0,75. Osservando i risultati contenuti nelle tabelle osserviamo come i valori attendibili ottenuti siano in maggioranza maggiori da tale valore. Tali distribuzioni risultano più larghe rispetto a quella modellata da Fanger (1970). Un'osservazione che mostra un risultato analogo è stata fatta nell'ambito del progetto SCATs (Nicol 2005), dove viene mostrato che la distribuzione degli insoddisfatti nei casi reali si discosta da quella del professor Fanger ottenuta in camera climatica.

Successivamente è stata ottenuta per ogni zona geografica la sensibilità del voto medio espresso dagli occupanti in funzione dello scostamento dalla temperatura di comfort ottimale. I risultati sono mostrati nella tabella VI. Tale valore, il fattore k, lega secondo una dipendenza lineare il voto medio allo scostamento dalla temperatura di comfort come mostrato nella formula I.

Coefficiente del legame tra voto medio e ΔT dal comfort			
Località	k	R ²	PF (n. punti)
Honolulu	0,31	87 %	< 1 % (10)
Melbourne	0,32	82 %	5 % (6)
Peshawar	0,25	73 %	8 % (7)
Brisbane	0,32	60 %	4 % (16)
Singapore	0,26	57 %	13 % (9)
Atene	0,18	48 %	2 % (24)
Milano	0,28	45 %	59 % (4)
San Francisco Bay Area	0,20	39 %	55 % (5)
Merseyside Area	na	na	na

Tabella VI – Coefficiente del legame tra voto medio e ΔT dal comfort

$$\langle V \rangle = k \cdot \Delta T \quad (I)$$

Tali correlazioni sono state utilizzate insieme alla varianza delle distribuzioni per ottenere gli intervalli di accettabilità per l'intorno della temperatura di comfort. Il procedimento partiva dall'analisi di una distribuzione normale di voti con varianza nota, dove veniva fissato il valore di soglia e la percentuale cumulativa di insoddisfatti oltre tale soglia. In questo modo veniva ottenuto il valore medio che inserito nella formula I restituiva l'intervallo associato a tale percentuale cumulativa. Il valore di soglia ipotizzato è $\pm 1,5$, cioè il voto di demarcazione che divide quelli che classificano un ambiente come confortevole da quelli che lo classificano non confortevole. I valori degli intervalli di accettabilità sono mostrati in tabella VII.

Località	Soddisfatti > 90%	Soddisfatti > 80%
	°C	°C
Brisbane	±1,2	±2,5
Melbourne	±1,6	±2,7
Peshawar	na	±1,3
Atene	±3,9	±5,4
Singapore	±1,0	±2,9
Honolulu	na	±1,6
ASHRAE 55	±2,5	±3,5

Tabella VII – Intervalli di accettabilità

Attraverso i valori di σ e k è possibile anche ottenere un grafico che mostra l'andamento della percentuale di insoddisfatti in funzione dello scostamento dalla temperatura di comfort. Un esempio è mostrato in figura I. Nel nostro caso i punti sperimentali presenti si limitano alle differenze di temperatura positive. Ciò è dovuto al fatto che i dati sono stati raccolti nella stagione estiva. Un grafico simile è stato prodotto nell'ambito del progetto SCATs. Attraverso questi grafici è possibile determinare gli stessi intervalli di accettabilità ottenuti attraverso il procedimento utilizzato in questo lavoro di tesi.

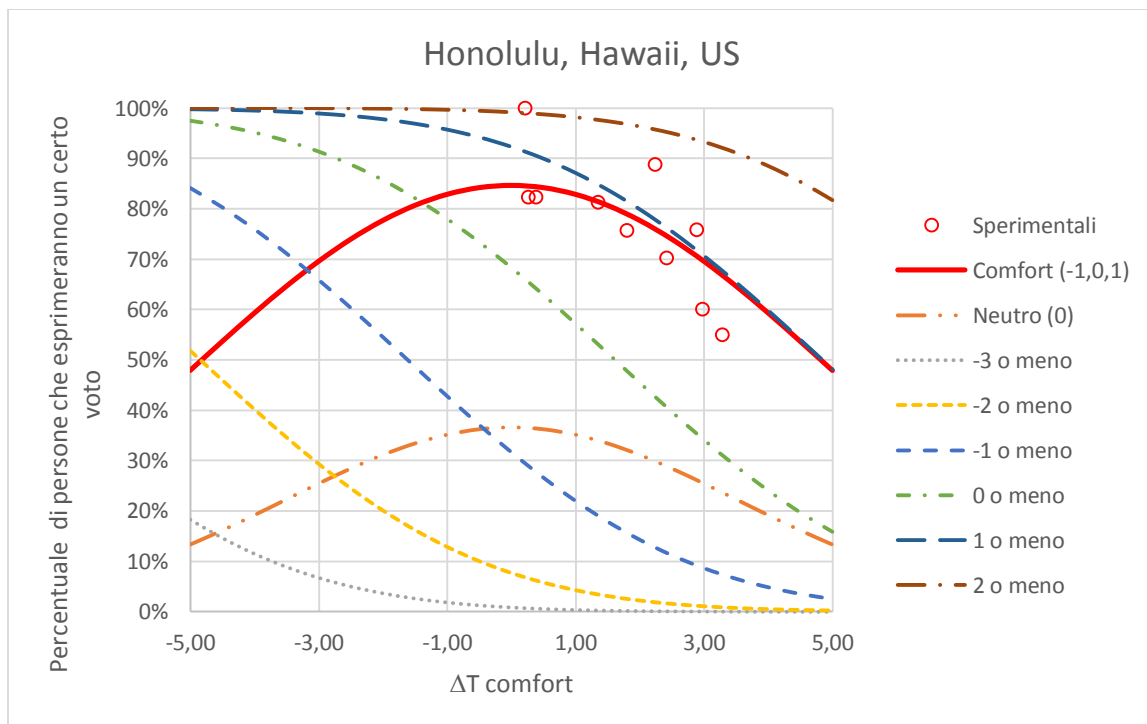


Figura I – Honolulu, Probit Lines per la percentuale di individui che esprimerebbero un intervallo di voti.

Gli intervalli di accettabilità così ottenuti per le varie zone geografiche risultano tra loro significativamente diversi e sono stati confrontati con quelli previsti dalla norma ASHRAE 55. A livello quantitativo, facendo riferimento alle tre fasce di accettabilità/non-accettabilità (percentuale prevista di insoddisfatti < 10%, compresa tra 10% e 20%, > 20%) possiamo osservare come gli intervalli ASHRAE arrivino a collocare correttamente il 51 % di campioni studiati (37 su 72) mentre per gli intervalli ottenuti nell'ambito di questa analisi la corrispondenza sale al 68 % (49 su 72). Analogamente accorpando le fasce di accettabilità (PPD < 20%) il 71% dei casi (51 su 72) risulta ben collocato attraverso la previsione ASHRAE, percentuale che sale al 81 % dei campioni (58 su 72) adottando l'analisi proposta.

Si dimostra pertanto l'utilità dell'identificazione dei parametri σ e k nel dedurre le fasce di accettabilità e l'importanza di indagare i fattori che incidono nella loro variabilità, al fine di migliorare la previsione del livello di soddisfazione degli occupanti.

Extended Summary

This work is based on international databases available online. The results obtained in this study are derived from the important work carried out under the project ASHRAE RP-884. We have processed a substantial number, but limited, of samples and in some cases we have obtained a discrete statistical relevance.

The work was inspired by a re-analysis of the experience of Fanger (1970) through which was determined the correlation between the predicted mean vote (PMV) and the percentage of planned dissatisfaction (PPD) from the occupants in the perception of thermal comfort. The methodology used in this re-analysis allows to determine the variance of the distribution (assumed normal) of the votes and, through it, the correlation between PMV and PPD. The aim of this thesis was: verify if the methodology proposed can be extended to naturally ventilated buildings, obtain the values of σ (root of the variance) and k (factor of correlation between mean vote and deviation from comfort temperature) and study the impact that such values have in determining the acceptability ranges of the comfort temperature.

The adaptive thermal comfort is a standardized theory by some standards like ASHRAE 55-2013 and UNI EN 15251:2008. These regulations prescribe a comfort temperature related to a parameter function of the external temperature. The mean running temperature (T_{rm}) that is a weighted mean of the daily mean temperature of the past day is often used. In addition to the comfort temperature, the standards suggest a temperature range to ensure a minimal percentage of satisfied occupants.

In Table I there are the databases used in this work. They come from naturally ventilated buildings. Some of them include data from mechanically ventilated buildings whose data are used for comparison purpose. To obtain samples of 20 individuals, questionnaire that share the same buildings, operative temperatures and mean running temperature were grouped in the same samples. For each geographical zone, with those samples, a probit analysis was performed to obtain the variance of the distribution of the thermal sensation vote. The probit analysis process starts from the mean thermal sensation vote and the percentage of

dissatisfied of each samples. The analysis was split in two, one describes the dissatisfied that feel cold and the other the dissatisfied that feel hot. The value of the variances obtained are presented in table II, III, IV, V.

N. Database in RP-884	Place	Year	Type	Season
-	Milano, Italy	2008	NV	Summer
-	Milano, Italy	2008	HVAC	Summer
11	Brisbane, Australia	1984	HVAC	Summer
12	Brisbane, Australia	1984	NV	Summer
16	Melbourne, Australia	1983	NV	Summer
23	Peshawar, Pakistan	1993	NV	Summer
27	Atene, Greece	1993/1994	NV	Summer
33	San Francisco Bay area, California, USA	1987	NV	Summer
38	Merseyside area, Liverpool, United Kingdom	1994	NV	Summer
41	Singapore, Republic of Singapore	1986	HVAC	Summer
42	Singapore, Republic of Singapore	1987	NV	Summer
49	Honolulu, Hawaii, USA	1995	NV	Hot season
50	Honolulu, Hawaii, USA	1995	HVAC	Hot season

Table I– Database

To evaluate the results we use two parameter. The R^2 coefficient and the percentage that the results could be casual. This percentage defined like PF (Taylor, 1986). A Good results have a high R^2 , but this value must be obtained by a conspicuous number of samples. Every results presented in the table have the number of points from which was derived the correlation and the associated value of PF. In this work, the acceptability condition for the results is an R^2 of at least 60% and a PF below 15%.

Hot dissatisfied NV			
Place	σ	R ²	PF (points)
Peshawar	1,13	97 %	< 1 % (7)
Singapore	0,87	94 %	< 1 % (7)
Melbourne	0,77	94 %	12 % (4)
Brisbane	0,82	89 %	< 1 % (15)
San Francisco Bay Area	0,96	85 %	14 % (5)
Atene	0,61	74 %	< 1 % (24)
Honolulu	1,05	74 %	3 % (9)
Milano	0,67	54 %	51 % (4)
Merseyside Area	1,12	0 %	100 % (3)
Oxford	na	na	na

Table II – Standard deviation for Hot Dissatisfied NV

Cold dissatisfied NV			
Place	σ	R ²	PF (points)
Melbourne	0,95	100 %	< 1 % (3)
Singapore	0,77	54 %	39 % (5)
Milano	0,96	45 %	59 % (4)
Atene	1,16	41 %	73 % (3)
Brisbane	1,04	27 %	68 % (5)
Peshawar	0,22	7 %	92 % (5)
Honolulu	1,04	0 %	100 % (7)
Merseyside Area	1,44	0 %	100 % (3)
San Francisco Bay Area	na	na	na
Oxford	na	na	na

Table III– Standard deviation for Cold Dissatisfied NV

Hot dissatisfied HVAC			
Place	σ	R ²	PF (points)
Singapore	1,01	82 %	27 % (4)
Milano	1,03	72 %	36 % (4)
Brisbane	0,92	66 %	13 % (7)
Honolulu	0,89	14 %	91 % (3)

Table IV – Standard deviation for Hot Dissatisfied HVAC

Cold dissatisfied HVAC			
Place	σ	R ²	PF (points)
Singapore	0,97	97 %	3 % (5)
Honolulu	1,06	93 %	1 % (6)
Milano	0,90	84 %	25% (4)
Brisbane	0,86	51 %	26 % (7)

Table V – Standard deviation for Cold Dissatisfied HVAC

The first comparison is between the standard deviation obtain in this study and the one obtained from the data contained in Fanger's publication (1970). From that data, Fanger's obtain the correlation that relate the PPD at the PMV. Dr. Alessandro Dama calculated the standard deviation from the Fanger's data, and that value seems to be 0,75 with a R² of 99%. By observing the results we could see how they are bigger than the one obtain from the Fanger's data. Those distribution seems to be larger than one modelled by Fanger (1970). Nicol (2005) in the results of SCAT project show that the distribution of dissatisfied obtain from real life situation data is larger than the ones proposed by Fanger, which is obtained from studies performed in climatic chamber.

The next objective is the determination of the sensibility of mean thermal sensation vote according to the deviation of the operative temperature from the comfort temperature. The results of this analysis is presented in Table VI. The equation related to this analysis is the one showed in equation I.

factor of correlation between mean vote and deviation from comfort temperature			
Place	k	R ²	PF (n. punti)
Honolulu	0,31	87 %	0 % (10)
Melbourne	0,32	82 %	5 % (6)
Peshawar	0,25	73 %	8 % (7)
Brisbane	0,32	60 %	4 % (16)
Singapore	0,26	57 %	13 % (9)
Atene	0,18	48 %	2 % (24)
Milano	0,28	45 %	59 % (4)
San Francisco Bay Area	0,20	39 %	55 % (5)
Merseyside Area	na	na	na
Oxford	na	na	na

Table VI – Sensibility of occupants

$$\langle V \rangle = k \cdot \Delta T \quad (I)$$

By using the deviation standard of the dissatisfied distribution and the sensibility of the occupants, we obtain the acceptability comfort range for every geographical zones. The method starts with the analysis of a distribution with known standard deviation. By setting the cumulative percentage of dissatisfied and the threshold quantile, we got the mean thermal sensation vote, which that situation occur. With the equation I and the mean vote, we could obtain the acceptability range presented in Table VII.

Place	Satisfied > 90%	Satisfied > 80%
	°C	°C
Brisbane	±1,2	±2,5
Melbourne	±1,6	±2,7
Peshawar	na	±1,3
Atene	±3,9	±5,4
Singapore	±1,0	±2,9
Honolulu	na	±1,6
ASHRAE 55	±2,5	±3,5

Tabella VII – Acceptability intervals

Through the values of σ e k it is also possible to obtain a graphic that shows the trend in the percentage of dissatisfied as a function of the deviation from the comfort temperature. An example is shown in Figure I. In our case the experimental points present are limited to the positive temperature differences. This is due to the fact that the data were collected in the summer season. A similar graph was produced as part of the SCATs project. Through these graphs, you can determine the same acceptable temperature ranges showed in Table VII.

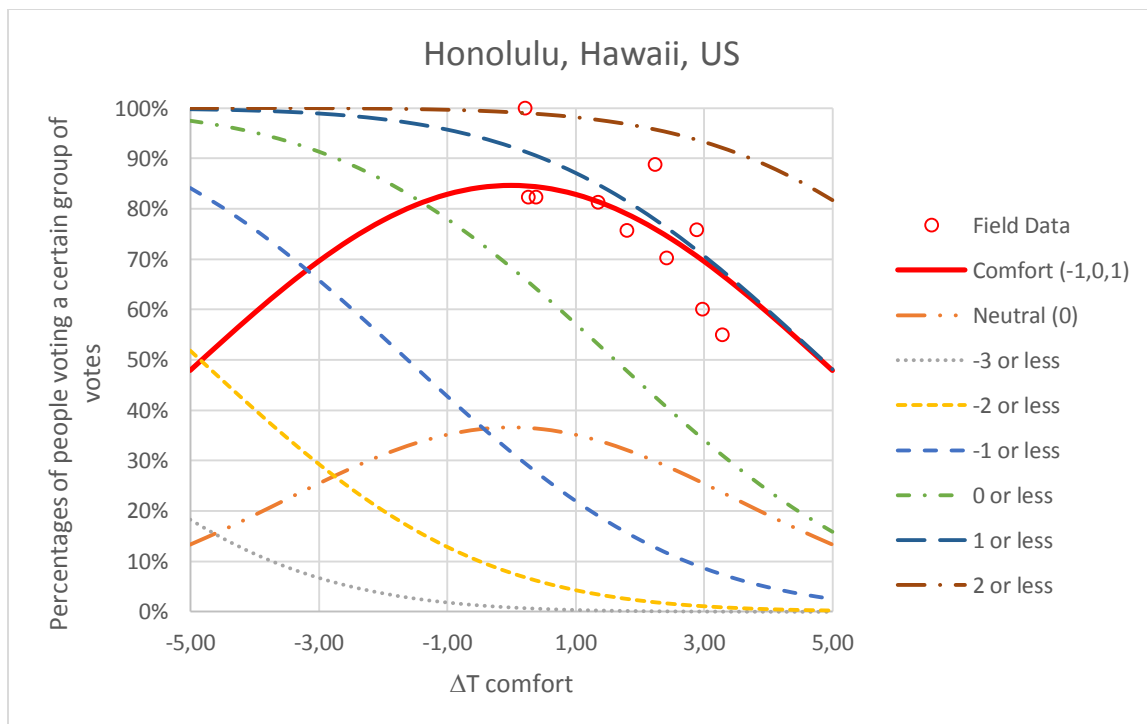


Figura I – Honolulu, Probit Lines for percentages of people voting a certain group of votes.

Acceptability ranges obtained for the different geographical areas are significantly different. We compare them with those provided by the standard ASHRAE 55. We could see by referring to the three bands of acceptability / non-acceptability (predicted percentage of dissatisfied <10 %, between 10% and 20%, > 20%) how the intervals ASHRAE arrive to place correctly 51% of the samples studied (37 out of 72) whereas in the interval obtained in the context of this analysis the correspondence raise to 68% (49 of 72). Similarly, by unifying the acceptability intervals (PPD <20%) 71% of the cases (51 of 72) is well placed through the provision ASHRAE, rising to 81% of the samples (58 of 72) by adopting the proposed analysis.

Finally, we could demonstrate the utility of the parameter σ and k for deducing the acceptability temperature ranges and the importance of investigating the factors affecting their variability in order to improve prediction of the level of satisfaction of the occupants.

Indice

Ringraziamenti	III
Riassunto Esteso	V
Extended summary	XIII
Indice	XXI
Sommario	XXIII
Parole chiave	XXIV
Abstract	XXV
Keywords	XXVI
CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE	1
1.1 Introduzione ai parametri del comfort termico.....	3
1.2 Correlazione tra PPD e PMV.....	6
1.3 Risultati del progetto ASHRAE RP-884.....	9
1.3.1 Interazioni con il clima interno.....	9
1.3.2 Interazioni con il clima esterno.....	16
1.4 Risultati del Progetto SCATs.....	19
1.5 Obiettivi dell'analisi.....	24
CAPITOLO 2 – METODOLOGIA	27
2.1 Metodologia di analisi.....	27
2.2 Ipotesi di lavoro.....	28
2.3 Elaborazione dei dati.....	29
2.3.1 Organizzazione Database.....	29
2.3.2 Dati climatici e Mean Running Temperature.....	31
2.3.3 Elaborazione primaria database.....	32
2.3.4 Determinazione della varianza della distribuzione dei voti.....	33
2.3.5 Determinazione del legame tra voto medio e scostamento della temperature operante da quella di comfort.....	37

2.3.6 <i>Determinazione delle bande di accettabilità della temperatura operante</i>	38
2.4 Possibilità di confronto.....	39
CAPITOLO 3 – DISCUSSIONE DEI RISULTATI.....	41
3.1 Varianza dei campioni.....	41
3.2 Correlazione tra voto medio e scostamento della temperatura di comfort.....	47
3.3 Confronto bande di accettabilità: Tesi Vs ASHRAE 55.....	50
3.3.1 <i>Caso Brisbane</i>	52
3.3.2 <i>Caso Melbourne</i>	54
3.3.3 <i>Caso Peshawar</i>	56
3.3.4 <i>Caso Atene</i>	58
3.3.5 <i>Caso Singapore</i>	60
3.3.6 <i>Caso Honolulu</i>	62
3.4 Confronto grafici: SCATs vs Tesi.....	64
CAPITOLO 4 – CONCLUSIONI.....	67
Allegato A.....	69
Allegato B.....	87
Allegato C.....	102
Indice delle tabelle e delle figure.....	109
Nomenclatura e lista acronimi.....	113
Bibliografia.....	115
Sitografia.....	119

Sommario

Questo lavoro si è basato su database internazionali disponibili online. I risultati ottenuti in questo lavoro derivano dall'importante lavoro effettuato nell'ambito del progetto ASHRAE RP-884. Sono stati elaborati un numero consistente, seppur limitato, di campioni ottenendo in alcuni casi dei dati con una discreta rilevanza statistica. Il lavoro ha preso spunto da una rianalisi dell'esperienza di Fanger del 1970 attraverso la quale veniva determinata nella percezione del benessere termico la correlazione tra il voto medio previsto (PMV) e la percentuale di insoddisfazione prevista (PPD) tra gli occupanti. La metodologia adottata in questa rianalisi permette di determinare la varianza della distribuzione (assunta normale) dei voti e tramite di essa la correlazione tra gli indici PMV e PPD. L'obiettivo di questa tesi è stato: verificare quanto la metodologia di analisi proposta possa essere estesa ed applicata anche ad edifici ventilati naturalmente, dedurre i valori di σ (radice della varianza) e k (fattore di correlazione tra voto medio e scostamento dalla temperatura di comfort) e studiare l'impatto che tali valori hanno nella determinazione degli intervalli di accettabilità nell'intorno della temperatura di comfort. I valori della radice della varianza ottenuti nell'ambito di questo lavoro differiscono da quello ottenuto a partire dai dati dell'esperienza di Fanger, valore attraverso cui è possibile ricostruire la correlazione tra PPD e PMV proposta da Fanger. Nello specifico, la gran parte dei valori di σ tende ad essere maggiore del valore 0,75 ottenuto dai dati di Fanger. Anche tra le diverse zone geografiche ci sono delle differenze tra i valori di σ . Vista la discreta rilevanza statistica di alcuni modelli, si può affermare che non sembra quindi esistere un'univoca distribuzione dei voti, ma questa può variare come visto nei casi selezionati, dove la zona geografica è differente. Ragion per cui uno studio più mirato potrebbe indagare quali siano i parametri che incidono nella determinazione di tale valore. Anche per quanto riguarda il valore di k , si è osservata una certa variabilità. Gli intervalli di accettabilità così ottenuti per le varie zone geografiche risultano tra loro diversi e sono stati confrontati con quelli previsti dalla norma ASHRAE 55. Le due tipologie sono state tendenzialmente diverse e identificavano situazioni reali in modo differente. In conclusione si dimostra l'utilità dell'identificazione dei parametri σ e k nel dedurre le fasce di accettabilità e l'importanza di indagare i fattori che incidono nella loro variabilità, al fine di migliorare la previsione del livello di soddisfazione degli occupanti.

Parole chiave:

- Comfort termico
- Ventilazione naturale
- Distribuzione degli insoddisfatti
- Fasce di accettabilità
- Database ASHRAE RP-884

Abstract

This work is based on international databases available online. The results obtained in this study are derived from the important work carried out under the project ASHRAE RP-884. We have processed a substantial number, but limited, of samples and in some cases we have obtained a discrete statistical relevance. The work was inspired by a re-analysis of the experience of Fanger (1970) through which was determined the correlation between the predicted mean vote (PMV) and the percentage of planned dissatisfaction (PPD) from the occupants in the perception of thermal comfort. The methodology used in this re-analysis allows to determine the variance of the distribution (assumed normal) of the votes and, through it, the correlation between PMV and PPD. The aim of this thesis was: verify if the methodology proposed can be extended to naturally ventilated buildings, obtain the values of σ (root of the variance) and k (factor of correlation between mean vote and deviation from comfort temperature) and study the impact that such values have in determining the acceptability ranges of the comfort temperature. The root of the variance values obtained in this work differ from that obtained from the data of Fanger's experience, value by which it is possible to reconstruct the relationship between PPD and PMV proposed by Fanger itself. Specifically, most of the values of σ tends to be greater than the value 0.75 obtained from the Fanger's data. Also between different geographical areas, there are differences between the values of σ . Given the discrete statistical significance of some models, we can say that does not seem to exist an unambiguous distribution of votes, but this may change as seen in selected cases, where the geographical area were different. A focused study could investigate what are the parameters that affect the determination of that value. Also with regard to the value of k , some variability is observed. Acceptability ranges obtained for the various geographical areas are different from each other and they were compared with those predicted by the standard ASHRAE 55. The two types of intervals are different and they identify real situations in a different way. In conclusion, it proves the usefulness of the parameter σ and k in deducing the ranges of acceptability and the importance of investigating the factors affecting in their variability, in order to improve the predictions of the level of satisfaction of the occupants.

Keywords:

- Thermal comfort
- Natural ventilation
- Distribution of dissatisfied
- Acceptability range
- Database ASHRAE RP-884

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE

Gli edifici ventilati naturalmente rispondono a criteri per la valutazione del comfort termico diversi rispetto a quelli che vengono climatizzati meccanicamente. Ciò è il risultato di molti studi sul campo effettuati nell'ambito del comfort termico, che hanno portato alla definizioni di diversi approcci e modelli teorici.

Il professor Fanger, in una sua pubblicazione (1970) mostra un modello in grado di predire la sensazione termica degli occupanti di un edificio partendo da parametri quali metabolismo, vestiario, temperatura dell'aria interna, temperatura media radiante dell'ambiente, velocità dell'aria e umidità dell'aria. Applicato ad ambienti climatizzati, dove i parametri climatici sono generalmente controllati da un impianto, il modello ha dimostrato di fornire una buona predizione del livello di soddisfazione degli occupanti. Applicato ad ambienti meno controllati o ventilati naturalmente, non sempre il risultato coincide con quello sperimentale ottenuto attraverso dei questionari di sensazione termica soggettiva.

Agli inizi degli anni '70 Nicol e Humprheys, in un loro articolo (1972), mostrarono un'alternativa alla teoria di Fanger basata sul bilancio termico del corpo umano in regime stazionario, introducendo quella del comfort termico adattivo. Tale teoria prevede che l'occupante non sia più un ricevitore passivo delle condizioni ambientali, ma partecipi, con azioni volontarie e non, al raggiungimento della condizione di comfort. Egli diventa così in grado di tollerare condizioni più severe.

Proseguendo nelle sue ricerche Humprheys (1978), vide come la temperatura interna a cui gli occupanti esprimevano una sensazione di comfort poteva essere legata alla temperatura esterna. Egli segnalò che un buon parametro per esprimere la temperatura esterna poteva essere la temperatura media mensile ottenuta dai dati metereologici.

Brager (1998) e Humprheys (2002), a distanza di alcuni anni tra di loro, mostrarono come il PMV poteva portare a sovrastime della condizione termica dell'ambiente. Ciò avveniva più spesso negli ambienti ventilati naturalmente. Gli occupanti di questi edifici

provavano una sensazione di comfort anche quando il modello di Fanger catalogava l'ambiente come eccessivamente caldo. Questo ha mostrato l'esistenza di ulteriori parametri legati al comfort, che però non rientravano nel calcolo del PMV.

Proprio a questo proposito, il professor Fanger (2002) ha proposto un'estensione del PMV in cui è tenuta in considerazione l'aspettativa che l'occupante ha dell'ambiente.

Parallelamente all'osservazione della discrepanza del PMV dal voto sperimentale, alcuni ricercatori tra cui Richard de Dear, Gail Brager e Donna Cooper (1997) prima, Kathryn J. McCartney e J. Fergus Nicol (2002) più tardi, attraverso campagne di raccolta dati in diversi paesi del mondo e dell'Europa, si proposero di correlare tali dati al fine di ottenere dei modelli di comfort basati sulla teoria del comfort adattivo. Tali modelli stimano la temperatura di comfort di un ambiente in funzione di quella esterna.

I risultati di questi studi sono stati poi inseriti negli standard odierni del comfort termico, come l'ASHRAE 55-2013 e la UNI EN 15251-2008. In essi sono prescritte le condizioni termiche per l'ottenimento di ambienti confortevoli per gli occupanti. Tali standard forniscono modelli in grado di stimare la temperatura di comfort partendo da un parametro che descrive le condizioni esterne dell'ambiente. Oltre a definire la temperatura target per un ambiente confortevole, definiscono gli intervalli intorno a quest'ultima per fare in modo che una certa quantità di occupanti permanga in una situazione di comfort.

Come mostrato nella sezione 2.3.4, si può dimostrare che utilizzando i dati contenuti nella pubblicazione di Fanger ed elaborandoli attraverso un procedimento di probit analysis, si può ottenere il valore della deviazione standard della distribuzione di tali dati. Questo valore di deviazione standard non deriva dalla normale formula che passa per gli scarti quadratici medi, ma è ottenuta tramite un best fit applicato a campioni di cui si ipotizza che la distribuzione sia normale. Questa analisi, come mostrato negli appunti del Dr. Dama (2013), porta all'ottenimento del valore di 0,75 circa per la varianza della distribuzione dei voti. Il risultato è ottenuto con una regressione lineare avente un coefficiente di determinazione pari al 99%. Il modello di Fanger che esprime il PPD in funzione del PMV si basa sulla distribuzione dei dati precedentemente citati. Tale modello è quindi un'interpolazione di una distribuzione normale con deviazione standard 0,75.

In questo studio riprenderemo il procedimento di probit analysis, per valutare come si distribuiscono gli insoddisfatti nell'intorno del voto medio in edifici ventilati naturalmente. L'idea è quella di osservare se la varianza delle distribuzioni dei voti sia sempre la stessa, e come si modifichi. Sarà così possibile ottenere delle nuove bande di accettabilità nell'intorno della temperatura di comfort. A questo scopo approfondiremo la metodologia utilizzata e i risultati ottenuti dal professor de Dear, presentati all'interno del report sullo studio del database RP-884 (1997), per arrivare poi ad effettuare un confronto fra i due lavori nell'ambito della determinazione delle fasce di accettabilità nell'intorno della temperatura di comfort.

Un articolo più recente, redatto dalla professoressa Angellotti (2010), rafforza l'idea che le aspettative abbiano un peso significativo sul comfort termico. Attraverso uno studio condotto nelle aule del politecnico di Milano, la professoressa Angelotti mostra come le aspettative siano in grado di modificare la percezione dell'ambiente di un occupante. In tale articolo, viene mostrato come il voto medio di comfort di una popolazione abituata a frequentare ambienti climatizzati in estate sia generalmente più alto di quello di una popolazione che non frequenta spesso ambienti climatizzati, sempre nel periodo estivo.

1.1 Introduzione ai parametri del comfort termico

In questa sezione verranno descritti i principali parametri utilizzati nel campo del comfort termico. La condizione di comfort termico è quella per il quale l'individuo permane in una situazione mentale di soddisfazione relativa all'ambiente circostante.

Secondo gli studi del professor Fanger (1970), le variabili che incidono sulla condizione di comfort sono sei, di cui due legate al comportamento dell'individuo e quattro fisiche, come mostrato in tabella 1.1.

Ogni individuo può essere messo in grado di valutare la sua sensazione termica attraverso una scala di gradimento. Fanger nei suoi studi ha utilizzato una scala a 7 punti che va -3 (molto freddo) a 3 (molto caldo), con il valore 0 che rappresenta la neutralità.

Legate all'individuo	Attività metabolica
	Vestiario
Fisiche	Temperatura dell'aria
	Temperatura media radiante
	Umidità dell'aria
	Velocità dell'aria

Tabella 1.1 – Variabili che incidono sul comfort termico

L'attività metabolica è l'indice che descrive il calore prodotto dall'organismo dell'occupante. Esso dipende dal tipo di attività svolta dal soggetto, che va a incidere sui suoi processi biologici. "Metabolismo" è il termine che descrive tali processi biologici. Il tasso di metabolismo è l'energia liberata per unità di tempo.. Si esprime in Watt/mq di superficie corporea o in "Met" (1 Met = tasso metabolico di una persona in riposo = 58,2 W/mq).

Il vestiario influisce sulle perdite di calore per evaporazione, sugli scambi di calore per conduzione e irraggiamento. Il vestiario è l'isolamento termico delle persone e il cambio del vestiario rappresenta il più efficace sistema cosciente di controllo sulle dispersioni termiche. L'isolamento termico del vestiario è espresso in "Clo" (1 Clo = 0,155 m²·K·W⁻¹).

La temperatura dell'aria interna è definita come la temperatura di bulbo secco di quest'ultima.

La temperatura media radiante è la temperatura media pesata delle temperature delle superfici che delimitano l'ambiente, incluso l'effetto dell'irraggiamento solare incidente.

Si definisce anche la temperatura operante come la media fra la temperatura dell'aria e quella media radiante proprio per valutare con un unico valore gli scambi termici per convezione e irraggiamento.

L'umidità relativa è il rapporto fra la quantità di acqua contenuta in un Kg d'aria secca ad una certa temperatura e la quantità massima di acqua che potrebbe essere contenuta alla stessa temperatura dallo stesso kg d'aria. Essa influisce sugli scambi latenti del corpo umano anche se in condizioni di temperatura di comfort il suo apporto alla sensazione termica risulta limitato.

La velocità dell'aria rappresenta i movimenti dell'aria all'interno dell'ambiente. Essa alla base degli scambi convettivi forzati e può essere causa di discomfort se risulta essere troppo elevata.

Prendendo un campione numeroso di persone situate in un certo ambiente e chiedendo di valutare la loro sensazione termica attraverso un questionario, è possibile valutare la situazione globale di comfort dell'ambiente come il valor medio di tutti i voti di sensazione termica espressi dagli individui. Questo valore è però vincolato alla somministrazione fisica dei questionari e viene ottenuto quando l'ambiente è già costruito e operativo.

Fanger nei suoi studi (1970), grazie a misurazioni in camera climatica, ottiene un modello per stimare il voto medio attraverso i sei parametri citati precedentemente. Tale voto è definito come voto medio previsto o PMV. L'espressione del PMV è molto complessa, ma permette di stimare la sensazione termica di un ambiente ipotizzando i sei parametri precedenti in funzione della destinazione d'uso di un ambiente.

Ai fini del comfort termico non basta il PMV per valutare l'ambiente, ma si ragiona anche in termini di persone insoddisfatte. Fanger nella sua pubblicazione fornisce una formula che correla il PPD al PMV. In questo modo, non solo è possibile ottenere una previsione del voto previsto all'interno di un ambiente, ma anche della percentuale prevista di persone insoddisfatte.

Attraverso queste relazioni è possibile ottenere una previsione della sensazione termica di un ambiente. Come mostrato all'inizio dell'introduzione in alcuni articoli (Brager 1998, Humphreys 2002, Angelotti 2010), tali relazioni forniscono generalmente delle buone previsioni in ambienti ventilati meccanicamente la cui condizione climatica è rigidamente controllata o quasi. Per ambienti ventilati naturalmente è necessario tenere in considerazione anche le possibilità di adattamento degli individui e la teoria del comfort adattivo tiene conto di questi parametri.

Quest'ultima prevede di stimare la temperatura di comfort sulla base della sola temperatura esterna. Gli odierni standard forniscono una correlazione che lega la temperatura di comfort ottimale ad un parametro che descrive la temperatura esterna. Uno di questi parametri può essere la mean running temperature. Essa è una media pesata delle temperature medie giornaliere di diversi giorni precedenti a quello di interesse. Per calcolarla

è stato necessario reperire i dati climatici delle località oggetto dello studio. La sua formula sarà mostrata successivamente.

Insieme alla temperatura di comfort sono prescritti degli intervalli di temperatura nell'intorno della temperatura di comfort atti a garantire una quantità minima di soddifatti tra gli occupanti dell'ambiente in questione.

1.2 Correlazione tra PPD e PMV

All'interno della sua pubblicazione, Fanger (1970), ha incluso una correlazione che correla il PMV al PPD. Attraverso i dati che mostriamo in tabella 1.2 e applicando un procedimento di probit analysis egli è stato in grado di definire un modello di previsione in grado di stimare la quantità di insoddisfatti di un ambiente in funzione del voto medio previsto.

T °C	N	Votes							Dissatisfied		
		-3	-2	-1	0	1	2	3	Cold	Warm	Total
18,9	80	42,4%	36,3%	16,2%	3,8%	1,3%			78,7%	0,0%	78,7%
20	80	28,8%	48,7%	15,0%	7,5%				77,5%	0,0%	77,5%
21,1	144	12,5%	30,5%	45,2%	10,4%	1,4%			43,0%	0,0%	43,0%
22,2	80	8,8%	33,7%	31,2%	26,3%				42,5%	0,0%	42,5%
23,3	144	5,6%	11,1%	47,2%	33,3%	2,1%	0,7%	0,0%	16,7%	0,7%	17,4%
24,4	80		3,8%	22,5%	62,5%	11,2%			3,8%	0,0%	3,8%
25,6	144	0,7%	2,1%	18,1%	57,5%	18,8%	2,8%	0,0%	2,8%	2,8%	5,6%
26,7	80			3,8%	57,5%	31,2%	5,0%	2,5%	0,0%	7,5%	7,5%
27,8	144			4,2%	38,8%	41,0%	14,6%	1,4%	0,0%	16,0%	16,0%
28,9	80				17,5%	41,3%	30,0%	11,2%	0,0%	41,2%	41,2%
30	80				25,0%	45,0%	26,3%	3,7%	0,0%	30,0%	30,0%
31,1	80				8,8%	38,7%	36,3%	16,2%	0,0%	52,5%	52,5%
32,2	80				5,0%	16,3%	50,0%	28,7%	0,0%	78,7%	78,7%

Tabella 1.2 – Dati esperienza di Fanger. Thermal Comfort”, Danish Technical Press (1970)

Nella sua esperienza sono stati considerati come insoddisfatti, quegli individui il cui voto era uguale o inferiore a -2 e uguale o superiore a 2. Applicando la probit function alle percentuali cumulative di insoddisfatti che provavano caldo e che provavano freddo sono stati ottenuti i quantili della normale standard associati ad ognuna di loro. I risultati sono mostrati nella tabella 1.3.

Dissatisfied		<V>	Xi cold	Xi hot
Cold	Warm			
78,7%	0,0%	-2,1	0,8	
77,5%	0,0%	-2,0	0,8	
43,0%	0,0%	-1,4	-0,2	
42,5%	0,0%	-1,3	-0,2	
16,7%	0,7%	-0,8	-1,0	
3,8%	0,0%	-0,2	-1,8	
2,8%	2,8%	0,0	-1,9	1,9
0,0%	7,5%	0,4		1,4
0,0%	16,0%	0,7		1,0
0,0%	41,2%	1,3		0,2
0,0%	30,0%	1,1		0,5
0,0%	52,5%	1,6		-0,1
0,0%	78,7%	2,0		-0,8

Tabella 1.3 – Risultati della probit function

I dati della tabella 1.3 sono graficati all'interno della figura 1.1. In essa vediamo come tali dati seguano un andamento lineare.

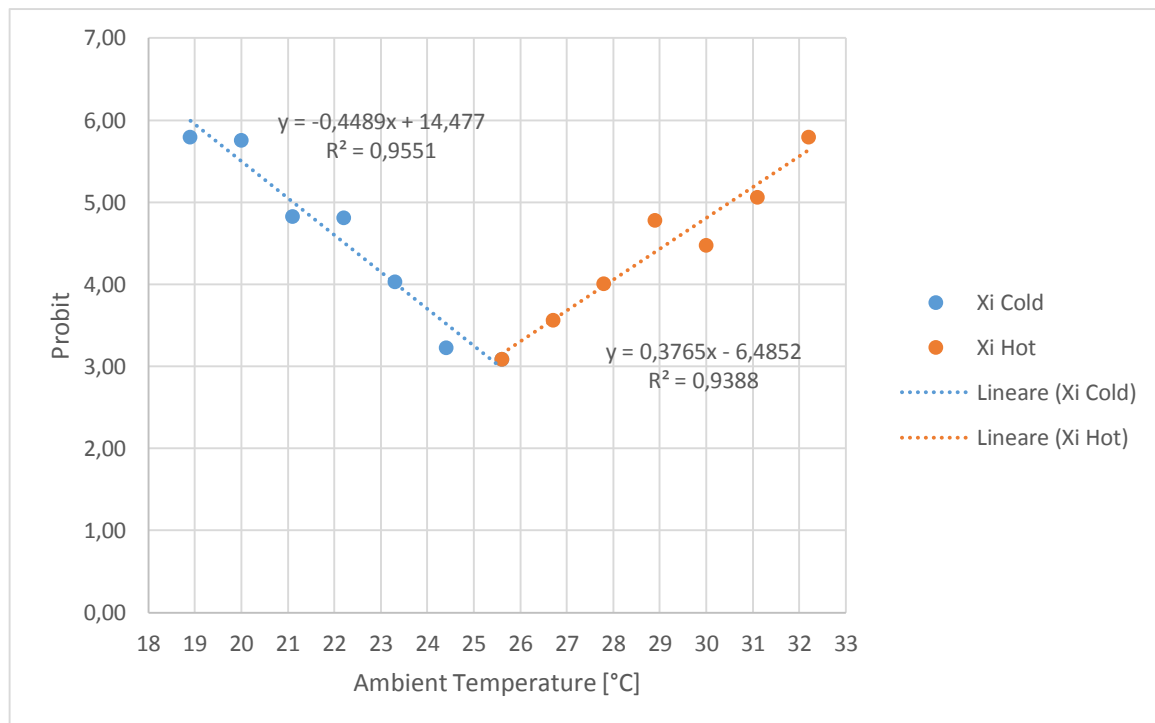


Figura 1.1 – Risultati probit function effettuata da Fanger. Thermal Comfort”, Danish Technical Press (1970)

Le due rette della figura 1.1 si incontrano nella temperatura 25,6 °C, che coincide con la temperatura ottimale ottenuta dall'equazione di comfort di Fanger e quella derivata sperimentalmente dai dati trattati. Dalle rette di figura 1.1 Fanger ha ottenuto le porzioni di insoddisfatti che correlato al PMV, come mostrato in figura 1.2. Fanger scrive come sia stata relativamente semplice passare dalla temperatura interna al PMV, in quanto tutte le variabili erano misurate e ben controllate durante gli esperimenti.

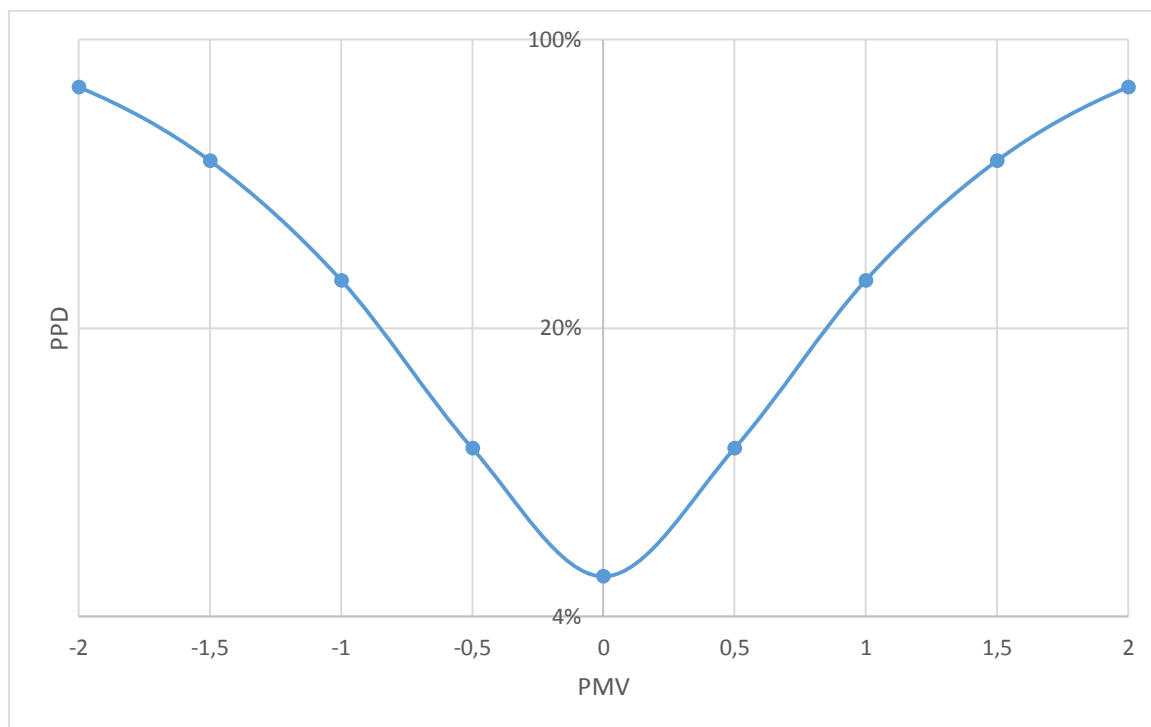


Figura 1.2 Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) correlata al voto medio previsto (PMV). Fanger, Thermal Comfort”, Danish Technical Press (1970).

L'equazione della curva mostrata in figura 1.2 è quella mostrata nella formula 1.1. Essa può essere utilizzata per valutare un ambiente in funzione del numero di insoddisfatti previsti all'interno di esso.

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{[-(0.03353^4 \cdot PMV + 0.2179^2 \cdot PMV)]} \quad (1.1)$$

Possiamo osservare come esista un minimo non nullo per gli insoddisfatti presenti in un ambiente. Risulta quindi impossibile, anche per un ambiente perfettamente condizionato, garantire l'assenza di persone non soddisfatte.

1.3 Risultati del Progetto ASHRAE RP-884

Il lavoro del professor Richard de Dear, Gail Brager e Donna Cooper è completamente riportato nel report finale dello studio del database ASHRAE RP-884 (1997). In esso sono descritti tutti i passi che hanno portato alla definizione dei modelli di comfort adattivo e dei loro intervalli di accettabilità, inclusi poi nello standard ASHRAE 55. Per quanto riguarda gli edifici ventilati naturalmente, nel 2002 è stata effettuata una revisione dello standard, sempre sulla base del precedente lavoro. Il report si basa su un database contenente 21000 voci di questionario con annesse ad ognuno di essi i parametri climatici necessari allo studio.

La parte del report che andremo a riportare è incentrata sui risultati di base dell'elaborazione. Essa mostra modelli basati su parametri ambientali interni all'edificio, parametri ambientali esterni e confronti tra ventilazione meccanica e naturale.

1.3.1 Interazioni con il clima interno

Per ogni edificio del database, il professor de Dear ha ottenuto delle correlazioni che legavano il voto medio soggettivo a diversi parametri ambientali interni come la temperatura operante o il PMV. Le tabelle riepilogative per questi due casi sono la 1.4 e la 1.5. I modelli ottenuti erano di tipo lineare.

Come osservato statisticamente dal professor de Dear, esiste una differenza significativa, tra il gradiente che lega il voto medio e la temperatura operante, nel caso a ventilazione meccanica rispetto a quello in ventilazione naturale (Risultato del T-Test: $T=5,37$, Gradi di libertà: $df=97$, affidabilità: $p<0,001$). La sensibilità degli occupanti di edifici ventilati meccanicamente è in media doppia rispetto a quella degli occupanti di edifici ventilati naturalmente.

	HVAC	NV	MIX
N. edifici	109	44	4
Modelli con rilevanza statistica > 95 %	63 (58 % del totale)	36 (82 % del totale)	3 (75 % del totale)
Intercetta media (\pm Dev.st)	-11,96 (\pm 5,84)	-6,65 (\pm 3,57)	-8,65 (\pm 2,98)
Gradiente medio (\pm Dev.st)	0,51 (\pm 0,25)	0,27 (\pm 0,13)	0,39 (\pm 0,11)

Tabella 1.4 – $\langle V \rangle$ in funzione di Top [°C], Final report ASHRAE RP-884 (1997)

	HVAC	NV	MIX
N. edifici	111	44	4
Modelli con rilevanza statistica > 95 %	33 (28 % del totale)	28 (64 % del totale)	3 (75 % del totale)
Intercetta media (\pm Dev.st)	0,06 (\pm 0,27)	-0,04 (\pm 0,61)	0,68 (\pm 0,70)
Gradiente medio (\pm Dev.st)	0,74 (\pm 0,27)	0,62 (\pm 0,33)	0,65 (\pm 0,20)

Tabella 1.5 – $\langle V \rangle$ in funzione di PMV, Final report ASHRAE RP-884 (1997)

Dalla regressione tra $\langle V \rangle$ e PMV sarebbe logico pensare di ottenere un gradiente unitario, ma come mostrato dal professor de Dear vediamo come tale valore sia inferiore all'unità. Da questi risultati si può evincere che il voto medio risulta meno sensibile rispetto al PMV. La differenza fra i due campioni non è però significativa ($T=1.56$, $df=59$, $p>0.1$), al contrario di come era successo per la sola temperatura operante. Questo calo di sensibilità tra le due modalità di ventilazione rispetto al caso precedente, mostra come esistano altri parametri che

entrano in gioco nel bilancio termico del corpo umano, soprattutto nel contesto a ventilazione naturale. Gli occupanti di edifici ventilati naturalmente tendono a sfruttare di più le possibilità adattive per migliorare la propria percezione di comfort, anche quando la temperatura operante è più alta.

Partendo dai modelli che legano il voto medio alla temperatura operante, il professor de Dear ha ricavato per ogni edificio la temperatura operante neutra. Ipotizzando che tale temperatura porti ad un voto di sensazione termica nullo, invertendo il modello è possibile ottenere la temperatura a cui gli occupanti esprimono un voto neutro. I risultati, mediati per ogni edificio sono mostrati in tabelle 1.6. L'elaborazione è stata divisa per stagione e per tipologia di sistema di ventilazione.

	HVAC	NV	MIX
N. edifici con risultati significativi - Estate	47 su 78	27 su 32	1 su 2
Temperatura neutra media (\pm Dev.st) - Estate	24,1 (\pm 1,31)	24,6 (\pm 2,42)	23,9 (\pm 0)
N. edifici con risultati significativi - Inverno	14 su 30	7 su 11	2 su 2
Temperatura neutra media (\pm Dev.st) - Inverno	22,5 (\pm 0,35)	22,4 (\pm 2,78)	20,7 (\pm 0,50)

Tabella 1.6 – Temperatura Neutra [°C], Final report ASHRAE RP-884 (1997)

In inverno, egli osserva come la temperatura neutra è praticamente la stessa in edifici ventilati naturalmente e ventilati meccanicamente, con la differenza che la deviazione standard del caso a ventilazione naturale è molto più elevata. In estate la temperatura degli edifici ventilazione naturalmente è leggermente più elevata, ma la differenza non è statisticamente rilevante ($T = 1.16$, $df = 72$, $p > 0.1$).

I modelli riepilogativi sono mostrati in figura 1.3. In essa si può vedere come i gradienti che legano la temperatura neutra siano diversi per le due tipologie di sistema di ventilazione, ma un'analisi statistica non ha portato a differenze significative ($T=0.08$, $df=96$, $p>0.5$).

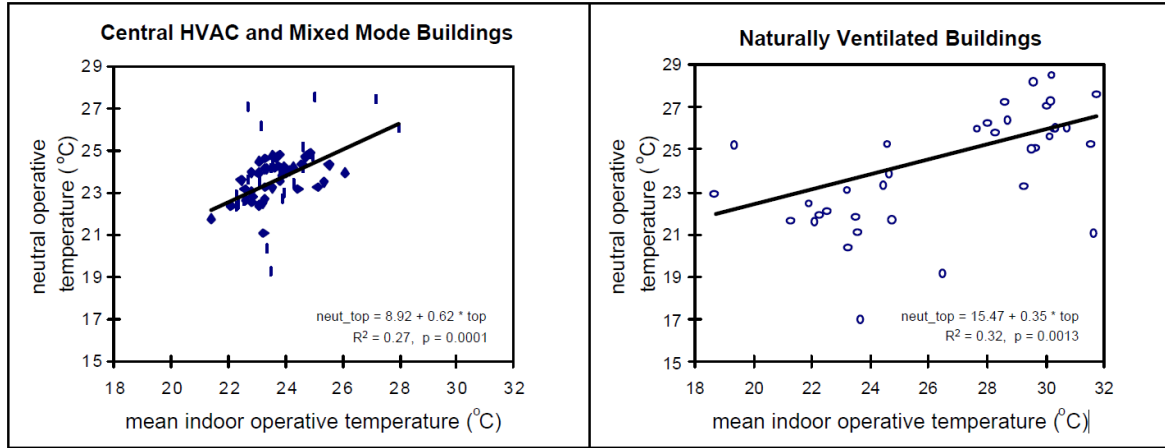


Figura 1.3 – Top neutra in funzione di Top media, Final report ASHRAE RP-884 (1997)

Il professor de Dear, dai modelli che legano il voto medio al PMV, ha ottenuto il valore del PMV che corrisponde alla neutralità. I risultati ottenuti sono mostrati nella tabella 1.7.

	HVAC	NV	MIX
N. edifici con risultati significativi - Estate	23 su 79	26 su 32	1 su 2
PMV neutro medio (±Dev.st) - Estate	0,01 (±0,32)	-0,43 (±1,40)	-0,24 (±0)
N. edifici con risultati significativi - Inverno	7 su 32	1 su 12	1 su 2
PMV neutro medio (±Dev.st) - Inverno	-0,55 (±0,30)	1,11 (±0)	-0,53 (±0)

Tabella 1.7 – PMV neutro, Final report ASHRAE RP-884 (1997)

Nel caso estivo vediamo come gli occupanti di edifici ventilati meccanicamente siano portati a votare zero, proprio quando il PMV è nullo. Nel caso a ventilazione naturale gli occupanti votano zero quando il PMV descrive un ambiente leggermente fresco. Per via dei pochi edifici comparati, i due valori non hanno presentato una differenza significativa ($T = 1.48$, $df = 47$, $p > 0.1$).

Un altro modo con cui il professor de Dear ha ottenuto la temperatura neutra è stato quello di estrapolarla dalla formula del PMV. Nella figura 1.4 è mostrata la dipendenza della temperatura neutra ottenuta dal PMV in funzione della temperatura operante media interna.

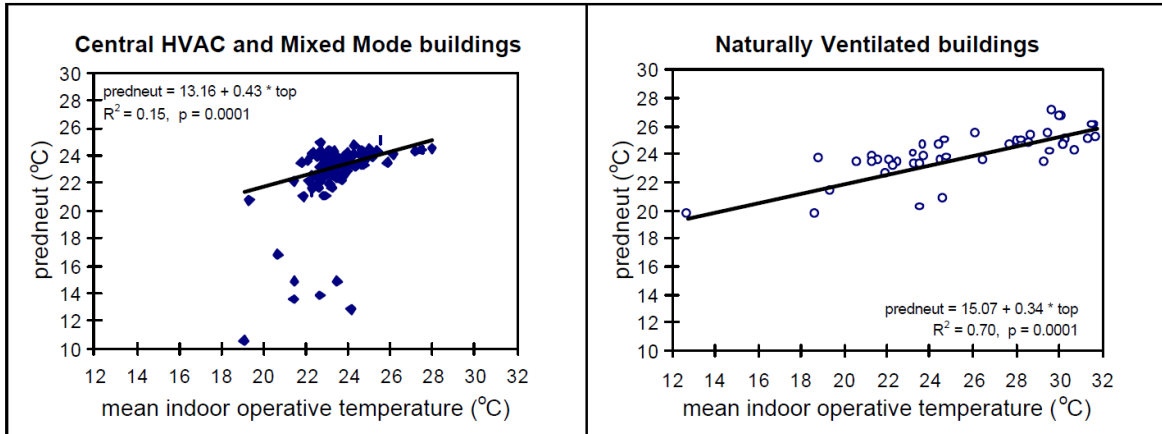


Figura 1.4 – T_{PMV} neutra in funzione di T_{op} media, Final report ASHRAE RP-884 (1997)

L'evidente relazione crescente tra la temperatura neutra proveniente da PMV e la temperatura operante media interna, mostra come altri parametri contenuti nel bilancio termico del corpo umano, come vestiario e velocità dell'aria, siano cruciali nel modificare le neutralità ottenute dal PMV. Il modello della ventilazione naturale, essendo molto significativo ($R^2 = 70\%$), dà l'idea di come questi parametri siano in grado di modificare la sensazione termica provata da un occupante al variare della temperatura operante, mantenendo quest'ultimo in una situazione confortevole.

Per ottenere gli intervalli di accettabilità, il professor de Dear ha inizialmente studiato i dati di accettabilità ottenuti direttamente tramite i questionari (TSA, non presenti in ognuno di essi) e quelli ottenuti considerando accettabili le tre fasce centrali di voto (PXTSA, -1, 0, 1). Osservando il legame tra accettabilità indiretta e diretta in figura 1.5, egli ha notato che il gradiente che li lega non è unitario, ma bensì minore di uno. Questo mostra come gli occupanti possono considerare come accettabile un ambiente anche quando il voto espresso è esterno alle tre fasce centrali.

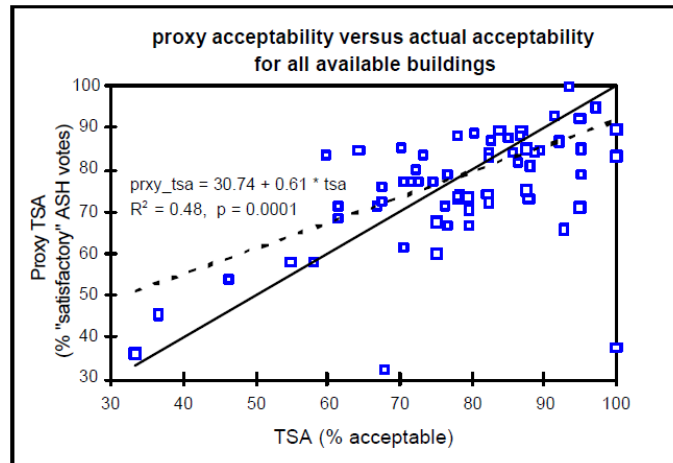


Figura 1.5 – PXTSA VS TSA, Final report ASHRAE RP-884 (1997)

Le figure 1.6 e 1.7 mostrano il tentativo di correlare la percentuale di occupanti che considerano accettabile un ambiente con la temperatura operante media e il PMV. La rilevanza statistica di questi modelli, come osservato dal professor de Dear, seppur risulti significativa, non è abbastanza elevata da permettere il loro utilizzo per la determinazione delle fasce di accettabilità.

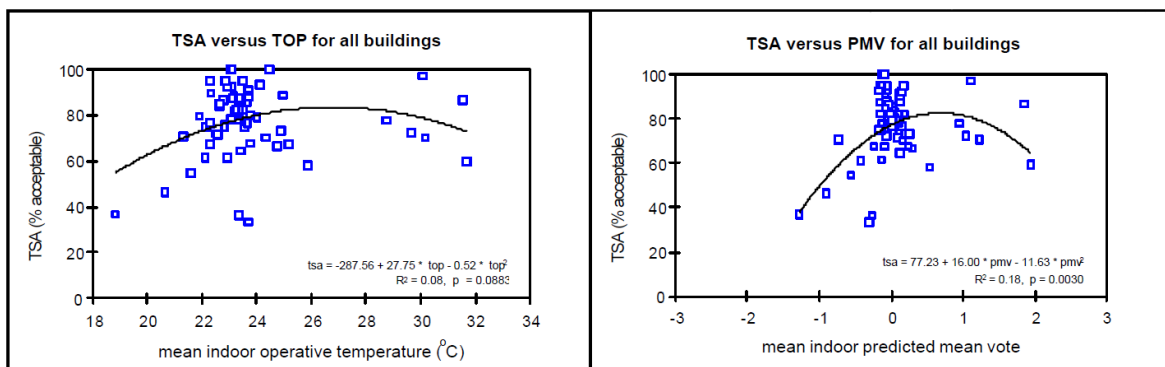


Figura 1.6 – TSA in funzione di Top e PMV, Final report ASHRAE RP-884 (1997)

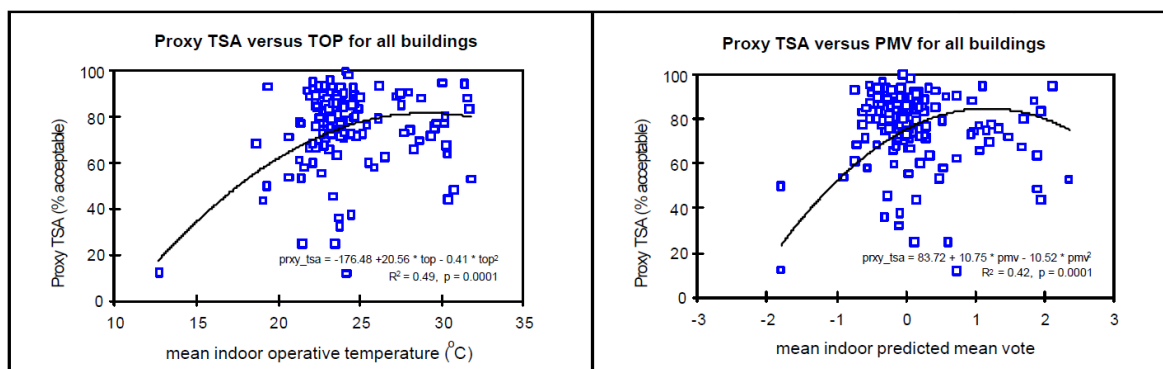


Figura 1.7 – PXTSA in funzione di Top e PMV, Final report ASHRAE RP-884 (1997)

Il professor de Dear ha optato quindi per una più solida alternativa, dato che i modelli da lui ottenuti non erano abbastanza validi. Egli ha utilizzato la correlazione di Fanger che lega la percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) al PMV (1970). Cercando le fasce di accettabilità per cui erano presenti il 20 % e il 10 % di insoddisfatti, ha ottenuto il PMV a cui si realizzano tali situazioni (tabella 1.8).

	PMV
20 % insoddisfatti	±0,85
10 % insoddisfatti	±0,5

Tabella 1.8 – PMV per determinate quantità di insoddisfatti secondo modello Fanger (1970)

Avendo ipotizzato che la distribuzione dei voti medi sperimentali abbia una varianza simile a quella dei voti medi previsti, ha ottenuto attraverso i PMV della tabella 1.5, le temperature di soglia inferiore e superiore dai modelli che legavano il voto medio sperimentale alla temperatura operante. La differenza tra queste due temperature, era il range di accettabilità per quell'edificio. I valori medi degli intervalli sono mostrati in tabella 1.9. In essa vediamo come gli intervalli della ventilazione naturali siano maggiori rispetto a quelli della ventilazione meccanica. La loro differenza risulta statisticamente significativa ($T = 5.69, df = 93, p < 0.001$).

	HVAC	NV	MIX
N. edifici	108	41	4
Modelli con rilevanza statistica > 95 %	62 (57 % del totale)	33 (75 % del totale)	3 (75 % del totale)
Intervallo PD 80% (±Dev.st)	4,1 (±1,91)	6,9 (±2,79)	4,5 (±1,24)
Intervallo PD 90% (±Dev.st)	2,4 (±1,12)	4,9 (±3,27)	2,7 (±0,73)

Tabella 1.9 – Range di accettabilità, Final report ASHRAE RP-884 (1997)

La deviazione standard del caso della ventilazione naturale è più elevata rispetto a quella della ventilazione meccanica, ragion per cui si può dedurre come gli intervalli fossero diversi tra loro nei diversi edifici studiati.

1.3.2 Interazioni con il clima esterno

Le figure 1.8 e 1.9 mostrano, dividendo gli edifici ventilati meccanicamente da quelli ventilati naturalmente, come si modifica la temperatura neutra interna in funzione di quella esterna (parametrizzata come Outdoor Effective Temperature, OET). Attraverso i risultati statisticamente rilevanti della figura 1.7, il professor de Dear vede come la temperatura neutra sia correlata alla OET. Le differenze tra i due tipi di ventilazione sono statisticamente verificate ($T=3.25$, $df=101$, $p < 0.01$). In ambienti ventilati naturalmente la temperatura neutra, a parità di OET, risulta più alta.

Utilizzando le temperature neutre previste (calcolate dalla formula del PMV) il risultato è analogo. La pendenza della correlazione degli ambienti ventilati naturalmente è quasi doppia rispetto a quella degli ambienti ventilati meccanicamente. Ciò è anche statisticamente verificato ($T=3.64$, $df=148$, $p<0.01$).

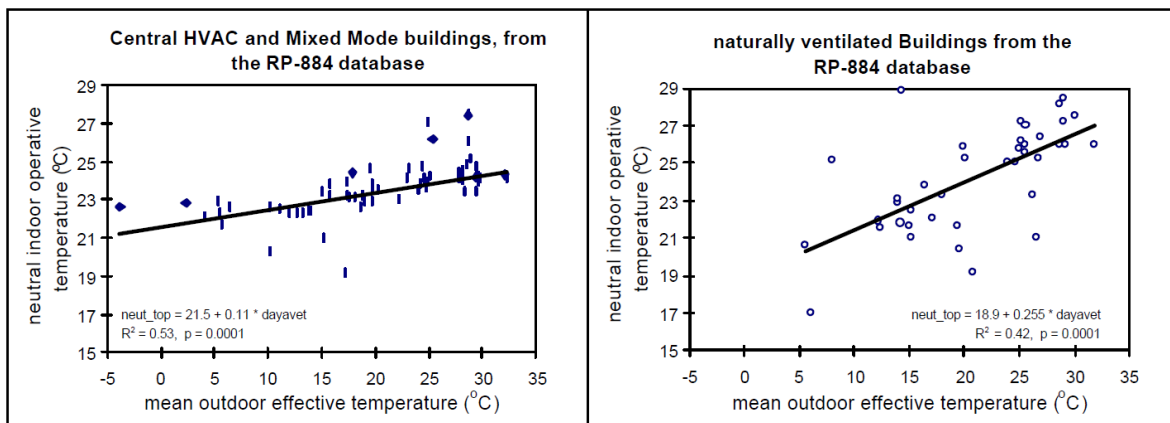


Figura 1.8 – Top neutra in relazione a OET, Final report ASHRAE RP-884 (1997)

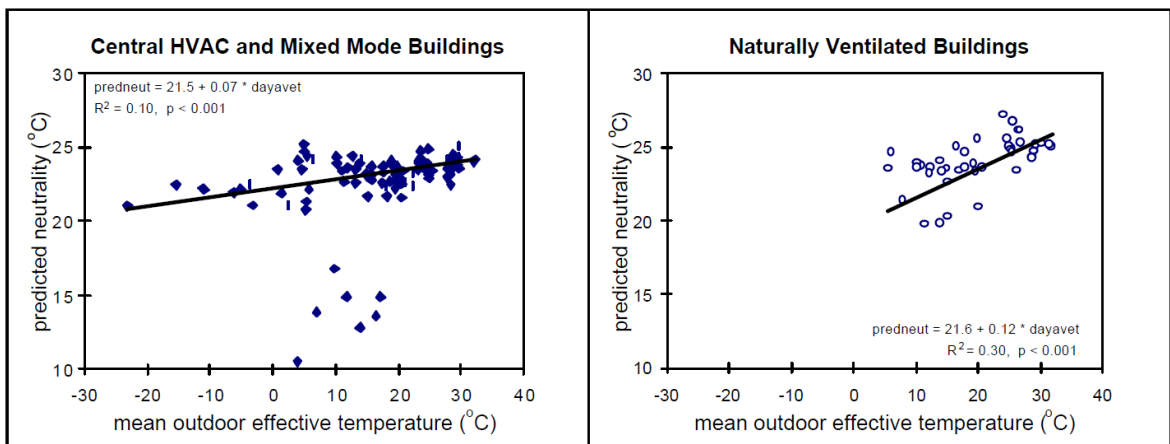


Figura 1.9 – Temperatura neutra prevista in relazione a OET, Final report ASHRAE RP-884 (1997)

Ciò porta ad osservare come le possibilità adattive siano decisive al fine di ottenere una condizione di comfort per gli occupanti di edifici ventilati naturalmente.

Un' ultima osservazione presa dal lavoro del professor de Dear riguarda il legame degli intervalli di compatibilità con la temperatura esterna. La figura 1.10 mostra come gli intervalli di accettabilità non siano correlati al parametro della temperatura esterna.

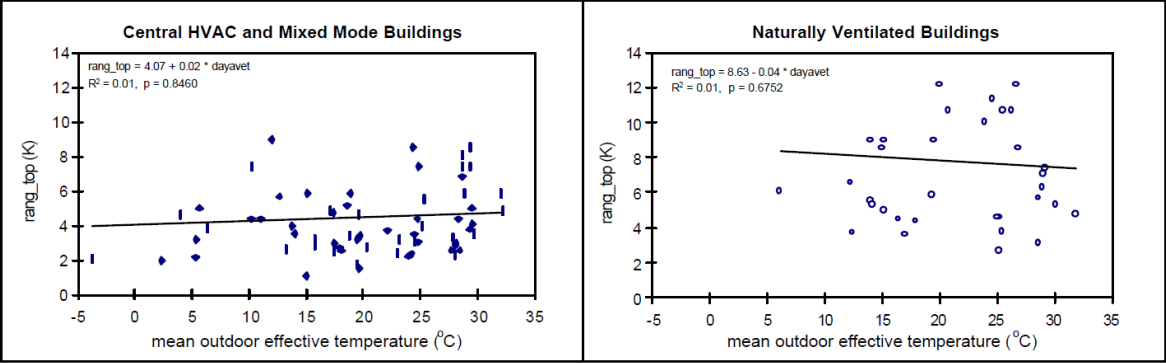


Figura 1.10 – Range di accettabilità in relazione a OET, Final report ASHRAE RP-884 (1997)

1.4 Risultati del progetto SCATs

Il progetto SCATs è stato fondato dalla commissione Europea nell'ambito del progetto Joule III per l'energia non nucleare. Esso è uno studio effettuato nell'ambito delle teorie del comfort adattivo che si basa su database ottenuti nel continente Europeo in edifici prevalentemente adibiti ad attività di ufficio. L'obiettivo dello studio era l'ottenimento di uno standard in grado di ridurre il consumo di energia negli edifici ventilati meccanicamente, sviluppando un sistema di controllo che utilizzasse i principi del comfort adattivo. Gli obiettivi primari dello studio erano:

- Effettuare indagini attraverso tutta l'Europa per poter un algoritmo di controllo adattivo.
- Sviluppare sistemi di controllo per ambiente climatizzati meccanicamente e naturalmente.
- Testare tale algoritmo e accertare i suoi effetti sui consumi energetivi e sui livelli di comfort termico.

In questa sezione ci limiteremo a mostrare i principali risultati legati alle equazioni della temperatura di comfort e agli intervalli di accettabilità nell'intorno di quest'ultima ottenuti in questo studio.

I modelli per la stima della temperatura di comfort in funzione della mean running temperature ottenuti nell'ambito del progetto SCATs sono mostrati dalle formule 1.2, 1.3 e graficate nella figura 1.10. Come possiamo vedere dalla figura 1.11 la pendenza della regressione lineare per la ventilazione naturale è più alta di quella a ventilazione meccanica. Questo è dovuto alle possibilità adattive fornite in ambienti a ventilazione naturale, come ventilatori e altri apparecchi. Nel caso a ventilazione meccanica si può osservare come gli occupanti siano meno disposti a tollerare temperature più alte del normale.

$$T_{\text{conf-NV}} = 0,33 \cdot T_{\text{rm}} + 18,8 \quad (1.2)$$

$$T_{\text{conf-HVAC}} = 0,09 \cdot T_{\text{rm}} + 22,6 \quad (1.3)$$

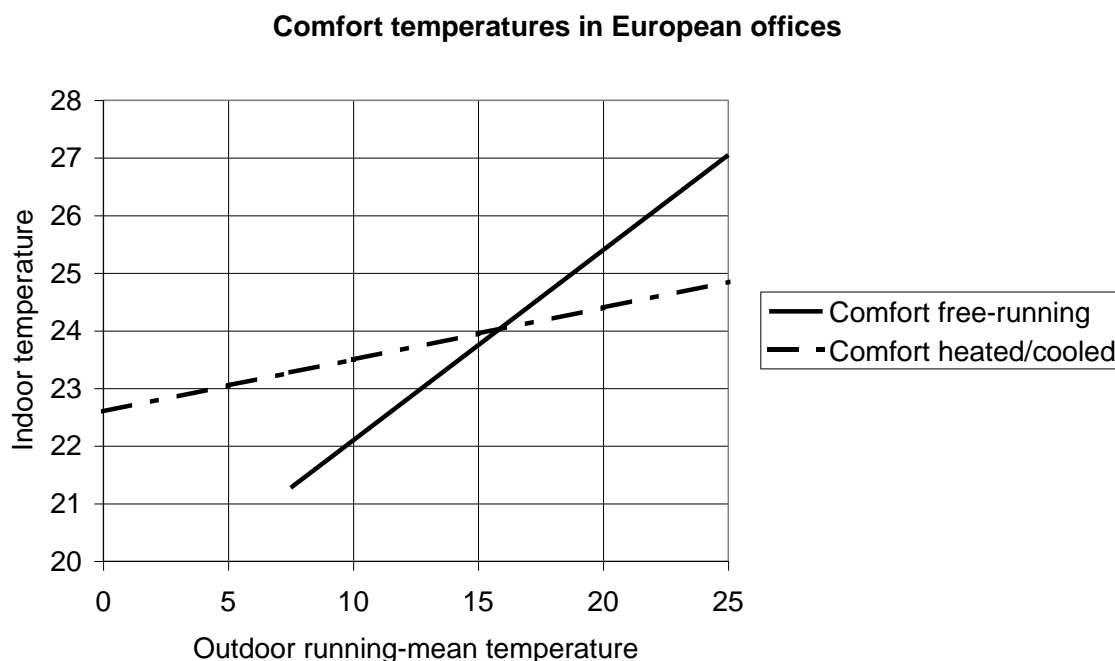


Figura 1.11 – Modelli per la temperatura di comfort degli uffici europei per ambienti ventilati naturalmente e meccanicamente. Nicol, Adaptive comfort in Europe, results from the SCATs surveys with special reference to free-running buildings (2005).

Conseguentemente alla determinazione delle temperature di comfort, è stato valutato l'eccesso discomfort nel caso in cui la temperatura interna si discostasse da quella di comfort. Viene fatto notare come questo discomfort dipenda dalle circostanze e dalle possibilità adattive dell'edificio in quanto temperature più alte possono essere sopportate grazie all'ausilio di apparecchi come i ventilatori. Al fine di stimare il livello di discomfort, cioè la percentuale di insoddisfatti, è stata effettuata una probit analysis per predire, in funzione dello scostamento dalle temperatura di comfort, il numero di persone che risponderebbero con un certo voto ad un questionario sulla sensazione termica. Le Probit Lines mostrate in figura 1.12 mostrano come varia la percentuale che un gruppo di persone esprima un certo voto, o un insieme di voti al variare dello scostamento della temperatura di comfort. Lo stesso procedimento però riferito ad un singolo edificio è mostrato in figura 1.13.

La curva continua presente in entrambi e grafici mostra la percentuale delle persone soddisfatte, cioè che hanno espresso un voto compreso tra -1 e 1. In essa è possibile osservare come la percentuale massima di soddisfatti sia minore del 90%. Ciò è dovuto al fatto che

stimare la temperatura di comfort per un gruppo di edifici non è semplice per via delle differenze che intercorrono tra gli occupanti al loro interno.

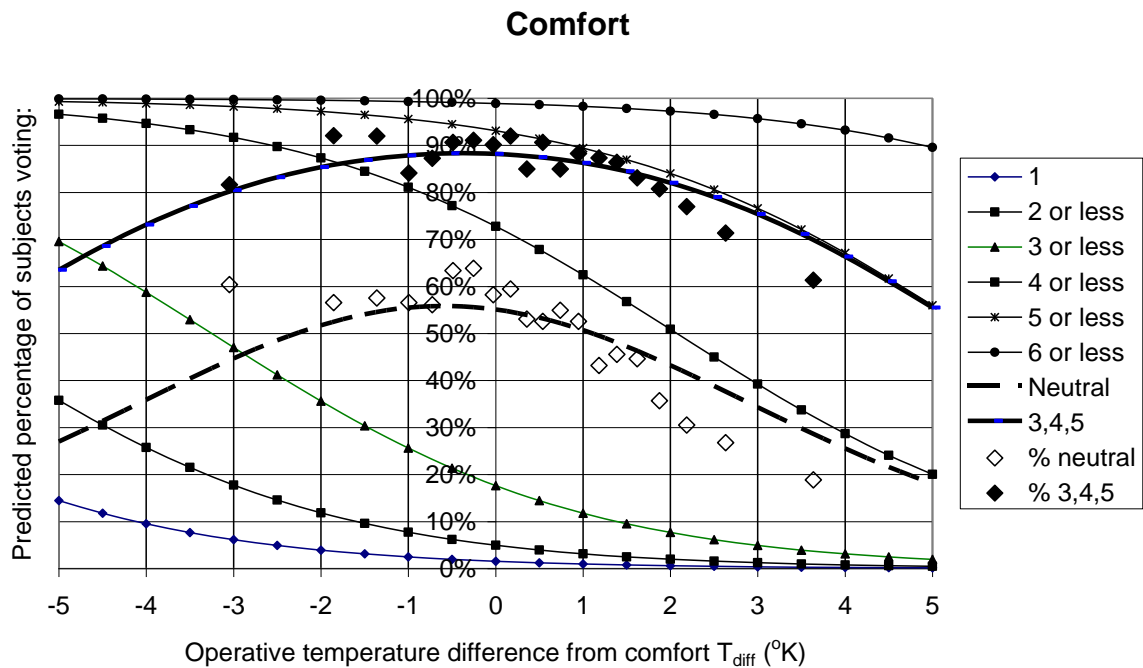


Figura 1.12 – Probit Lines per i dati SCATs. Percentuale dei voti in funzione dello scostamento dalla temperatura di comfort. Nicol, Adaptive comfort in Europe, results from the SCATs surveys with special reference to free-running buildings (2005).

Restringendo il campo di indagine passando dall'insieme totale dei dati ad un solo edificio, il cui grafico è mostrato in figura 1.13, è possibile osservare come la percentuale massima di soddisfatti risulti più elevata quando si è vicini alla temperatura di comfort.

Dalla figura 1.12 è possibile osservare come un intervallo di $\pm 2^{\circ}\text{C}$ sia in grado di garantire al minimo l'80% dei soddisfatti nell'ambiente. Un intervallo di $\pm 4^{\circ}\text{C}$ garantisce invece un tasso di soddisfazione del 65%. Il primo intervallo è mostrato graficamente in figura 1.14.

Il progetto SCATs e il presente lavoro possono essere equiparati per via della possibilità di creare lo stesso tipo di grafico della tipologia mostrata in figura 1.12. Ciò porta a pensare che la variabili studiate possano essere simili.

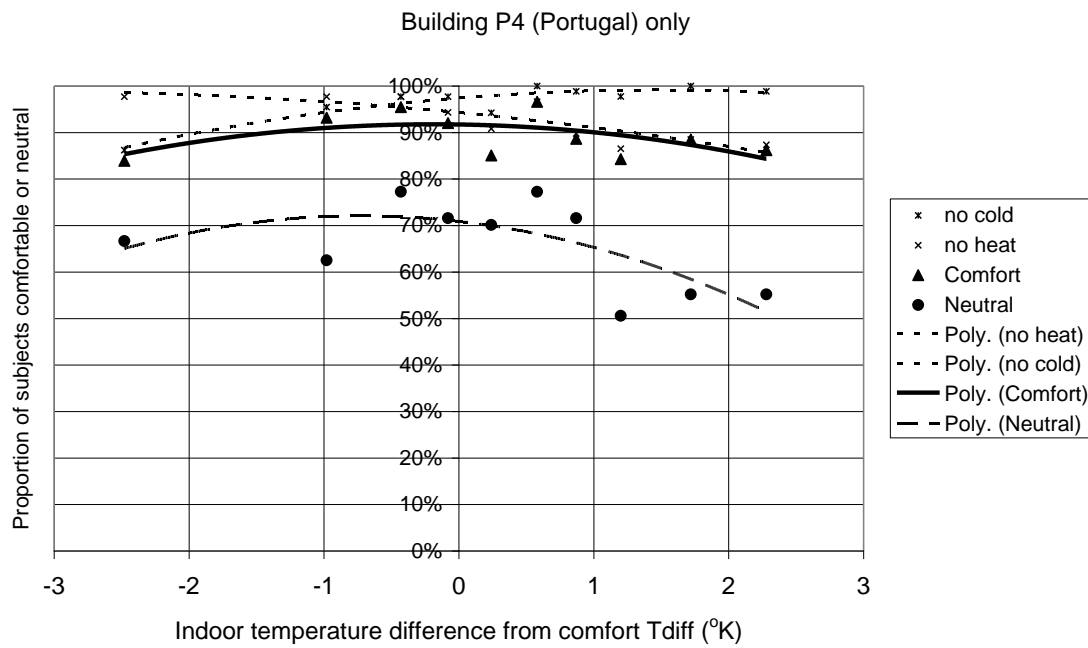


Figura 1.13 – Polinomiali riferite ad un singolo edificio. Percentuale dei voti in funzione dello scostamento dalla temperatura di comfort. Nicol, Adaptive comfort in Europe, results from the SCATs surveys with special reference to free-running buildings (2005).

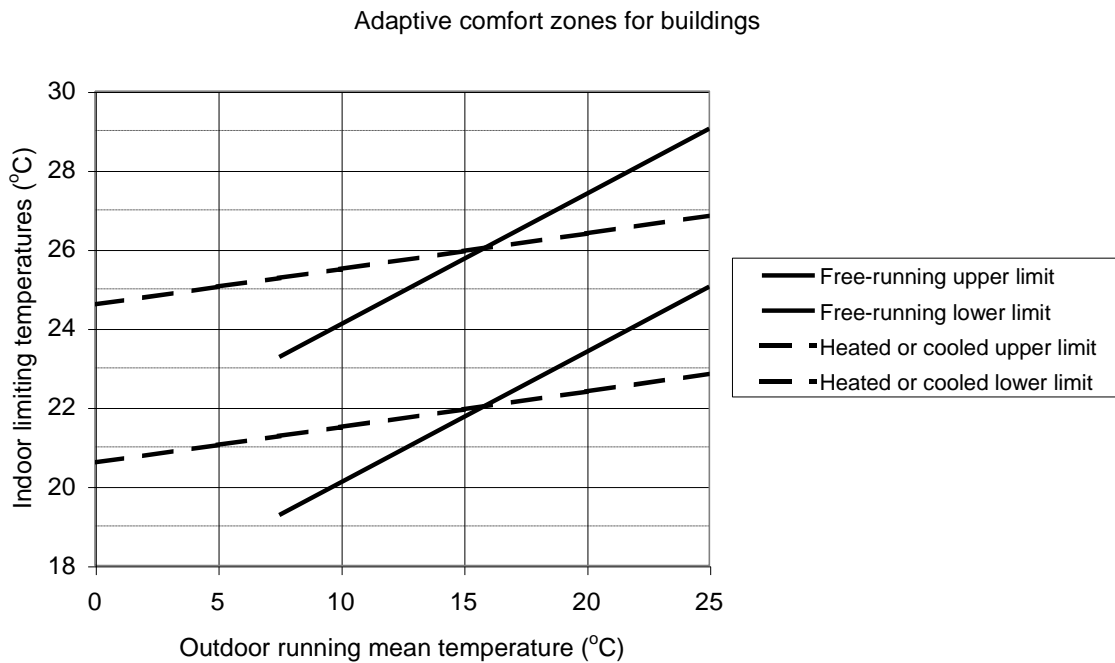


Figura 1.14 – Zone di comfort 80% ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) per edifici ventilati naturalmente e ventilati meccanicamente. Nicol, Adaptive comfort in Europe, results from the SCATs surveys with special reference to free-running buildings (2005).

Humphreys e Nicol (2001), presentarono la figura 1.15 che mostra la percentuale di insoddisfatti ottenuta dalla correlazione PPD/PMV di Fanger in opposizione a quella ottenuta sperimentalmente in altri due casi. Nel primo sono stati utilizzati i dati del database ASHRAE-884, nel secondo quelli del progetto SCATs. Quello che si nota è che la correlazione tra PPD e PMV di Fanger prevede un risultato più ottimista rispetto a quello osservato sperimentalmente. Una ragione per questa discrepanza potrebbe essere dovuta al fatto che il modello PPD/PMV di Fanger è stato ottenuto tramite misurazioni in camera climatica, ragion per cui le incertezze di misura sono state ridotte rispetto agli altri casi.

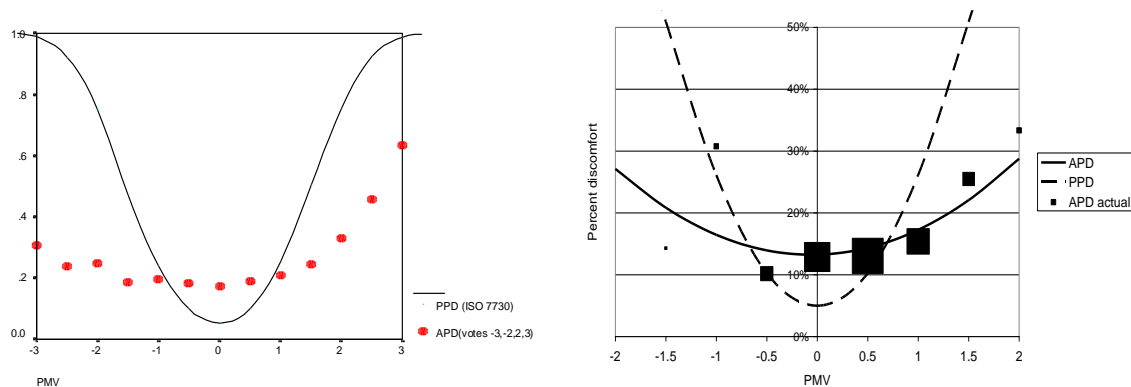


Figura 1.14 - PPD ottenuto dal modello di Fanger confrontato con l'attuale livello di discomfort (APD). Nella prima immagine si fa riferimento ai dati del database ASHRAE RP-884, nella seconda ai dati del progetto SCATs. Nicol, Adaptive comfort in Europe, results from the SCATs surveys with special reference to free-running buildings (2005).

1.5 Obiettivi dell'analisi

Il lavoro si inquadra nell'ambito delle teoria predittive del comfort adattivo. Il comfort adattivo è una teoria normata da diversi standard quali l'ASHRAE 55 e la EN 15251. In essi sono prescritte le temperature di comfort interne in funzione della temperatura esterna insieme agli intervalli entro cui l'utente permane in una condizione di comfort termico.

L'obiettivo dello studio è indagare alcune ipotesi di lavoro legate alla determinazione delle fasce di accettabilità intorno alla temperatura di comfort.

Come visto da Humphreys (1978), la temperatura di comfort dipende dalla temperatura esterna, ma gli intervalli di accettabilità intorno alla temperatura di comfort dipendono invece dalla distribuzione dei voti espressi dagli occupanti.

Applicando un procedimento di Probit Analysis ai dati utilizzati da Fanger (1970), come mostrato nella sottosezione 2.3.4, è possibile dimostrare come la radice della varianza della loro distribuzione sia circa 0,75. Con gli stessi dati, Fanger (1970) ottiene la formula 1.1, essa lega il PPD al PMV.

Il professor de Dear (1997), come mostrato nell'introduzione, ottiene gli intervalli di accettabilità mostrati in tabella 1.10 passando per la formula 1.1.

Categoria	Descrizione	Intervallo	Utenti soddisfatti
I	Alte aspettative, utenti sensibili.	$\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$	90%
II	Normale aspettative	$\pm 3,5 \text{ }^\circ\text{C}$	80%

Tabella 1.10 – classi di accettabilità secondo lo standard ASHRAE 55-2013

Si potrebbe pensare che il valore 0,75 per la radice della varianza possa assumere valori diversi, portando così a molteplici curve che legano il PPD al PMV. In questo modo gli intervalli di accettabilità si modificherebbero di conseguenza.

In alcuni articoli (Brager 1998, Humphreys 2002, Angelotti 2010), viene mostrato come la previsione del PMV ottenuta dai modelli di Fanger si discosti dalle misurazioni sperimentali sugli occupanti di edifici ventilati naturalmente. I modelli di Fanger, se applicati ad ambienti la cui condizione climatica è controllata con un certo rigore, risultano attendibili. Quando invece sono applicati a edifici ventilati naturalmente, la loro previsione sovrastima quella che è la reale sensazione termica degli occupanti. Quindi non è da escludere che la formula 1.1, ottenuta da misurazioni in camera climatica possa essere differente se ottenuta con dati provenienti da edifici ventilati naturalmente. Questo è stato anche precedentemente mostrato nei risultati del progetto SCATs.

Possiamo osservare come i coefficienti dei modelli cambino al variare della località. Alcuni modelli vedono gli occupanti più suscettibili rispetto ad altri. Le linee guida, per semplicità, adottano solamente una correlazione per la temperatura di comfort, e come visto in precedenza, gli associano un intervallo che dipende dalla percentuale di occupanti soddisfatti che si vogliono mantenere nell'ambiente. Essendoci l'evidenza che i modelli della temperatura di comfort si modificano sia con il meccanismo di ventilazione dell'ambiente (Humphreys 1978) che con la zona geografica (McCartney, Nicol 2002) si può pensare che la distribuzione degli insoddisfatti possa seguire anch'essa questi criteri di differenziazione.

Questo lavoro si è basato sui database internazionali disponibili e attraverso la loro elaborazione si è voluto:

- Verificare se il procedimento di probit analysis applicato ad edifici ventilati naturalmente porti a risultati attendibili statisticamente.
- Verificare se i valori ottenuti dalla probit analysis siano congruenti tra loro e con quello ottenuto dai dati di Fanger.
- Verificare come tali valori di varianza, insieme alla sensibilità degli occupanti vada ad incidere sugli intervalli di accettabilità nell'intorno della temperatura di comfort.

CAPITOLO 2 – METODOLOGIA

2.1 Metodologia di analisi

Gli standard del comfort adattivo, come l'ASHRAE 55 e EN 15251, mettono le basi per la progettazione o la verifica del comfort termico degli ambienti. Questi standard sono sviluppati attraverso dati sperimentali raccolti all'interno di edifici dove le persone si occupano dei loro normali compiti lavorativi. Questo tipo di dati è diverso da quello utilizzato dal Professor Fanger (1970), dove questi ultimi erano quelli di una camera climatica tenuta sotto stretto controllo, non assimilabile ad un ambiente di lavoro naturale. I modelli forniti da questi standard non devono solamente essere validi in termini di affidabilità statistica, ma dovrebbero poi rispecchiare i casi pratici reali. In questo senso la verifica risulta duplice perché avviene in fase di modellazione, facendo in modo che il modello rispecchi i dati da cui è ottenuto, e in fase di utilizzo dove si osserva che effettivamente il modello si adatti ragionevolmente bene a diverse situazioni reali.

La metodologia in oggetto è quella utilizzata nell'ambito di questo lavoro per ottenere le bande di accettabilità e la distribuzione dei voti espressi dagli occupanti. In questo studio è proposta una metodologia diversa rispetto a quella utilizzata dal professor de Dear all'interno del report finale sullo studio del Database RP-884 (1997), descritta nell'introduzione. Per confrontare i risultati anche il nostro studio si è basato sul database RP – 884 assemblato e reso disponibile dal professor de Dear stesso, grazie al contributo della ASHRAE (1998). Esso contiene dati di diversi paesi del mondo suddivisi per stagione e tipologia del sistema di ventilazione. La nostra elaborazione si basa su dati di edifici ventilati naturalmente durante la stagione estiva.

2.2 Ipotesi di lavoro

Nell'ambito di questo lavoro sono state fatte alcune ipotesi di base:

- In presenza di voti decimali , è stato necessario definire un valore di soglia entro il cui l'individuo era classificabile come insoddisfatto o meno. Tale valore è stato preso pari a 1,5 per la parte degli insoddisfatti che provavano caldo e pari a -1,5 per quelli che invece provavano freddo.
- Ogni campione di individui ha una sua distribuzione dei dati incentrata nel voto medio e distribuita secondo la varianza. Mettendo insieme più campioni di una stessa zona geografica, si è ipotizzato che abbiano tutti la stessa varianza, che sarà anche quella della distribuzione complessiva degli insoddisfatti. Attraverso la probit analysis, con cui sono state ottenute le varianze, è stato possibile verificare questa ipotesi.
- Il legame tra la temperatura di comfort e la temperatura esterna è stato espresso attraverso la formula contenuta nello standard ASHRAE – 55 mostrata in formula 2.1. Essa descrive la temperatura di comfort quando quella esterna va dai 5°C ai 32°C. Adatta a edifici dove l'attività metabolica è tipicamente sedentaria (1,3 MET). In questa elaborazione viene usata come parametro della temperatura esterna la mean running temperature, come riportato da McCarteney (2002)

$$T_c = 17,8 + 0,31 \cdot T_{rm} \quad (2.1)$$

$$T_{RMn} = \alpha \cdot T_{RMn-1} + (1 - \alpha) \cdot T_{An-1} \quad (2.2)$$

2.3 Elaborazione dei dati

2.3.1 Organizzazione Database

Le categorie di dati contenuti nelle schede del database RP-884 sono molte di più di quelle che sono state necessarie ai fini dello svolgimento di questo lavoro. Si è resa quindi necessaria un'identificazione dei dati contenuti nelle varie schede, selezionando solo le grandezze di interesse. Per ogni questionario le grandezze selezionate sono:

- Codice edificio.
- Met, indicatore di attività metabolica.
- Clo, indicatore di abbigliamento.
- Temperatura media dell'aria
- Temperatura media radiante
- Temperatura aria esterna (solamente per il database del Pakistan).
- Temperatura operante.
- Giorno, anno.
- Voto di sensazione termica.

Il codice edificio è una sigla utilizzata per riconoscere in che edificio è stato eseguito il questionario. I valori di MET e CLO sono stati utilizzati per osservare la compatibilità tra gli occupanti di edifici diversi, appartenenti alla stessa zona geografica. Per ogni edificio sono stati ottenuti i valori medi di MET, CLO e la deviazione standard dei loro campioni. Questi venivano poi confrontati con i risultati degli altri edifici della medesima zona geografica. I grafici su cui è stata studiata la compatibilità degli edifici possono essere consultati all'interno dell'allegato B. Le temperature contenute nel database erano espresse in gradi Celsius e non hanno richiesto alcuna elaborazione di base. La temperatura operante all'intero dei database è ottenuta come media aritmetica della temperatura media radiante e della temperatura dell'aria. Il giorno serve per accostare ad ogni questionario il dato climatico relativo alla temperatura dell'aria esterna. Il voto di sensazione termica è espresso secondo una scala numerica a sette punti, da un minimo di -3 ad un massimo di 3. In alcuni casi i voti erano decimali.

Una lista delle schede del database RP-884 utilizzate è mostrata in tabella 2.1, la loro descrizione proveniente dal Report ASHARE (de Dear, 1998) è consultabile all'interno dell'allegato A.

Nello specifico sono stati analizzati i casi di ventilazione naturale durante la stagione estiva, ma per confronto l'analisi è stata svolta anche per alcuni casi di edifici ventilati meccanicamente localizzati nelle stesse zone degli edifici ventilati naturalmente. L'analisi sugli edifici ventilati meccanicamente si limitava all'ottenimento della varianza della distribuzione degli insoddisfatti nell'intorno del voto medio.

N. Database in RP-884	Luogo	Anno	Tipologia	Stagione
-	Milano, Italia	2008	NV	Estate
-	Milano, Italia	2008	HVAC	Estate
11	Brisbane, Australia	1984	HVAC	Estate
12	Brisbane, Australia	1984	NV	Estate
16	Melbourne, Australia	1983	NV	Estate
23	Peshawar, Pakistan	1993	NV	Estate
27	Atene, Grecia	1993/1994	NV	Estate
33	San Francisco Bay area, California, USA	1987	NV	Estate
38	Merseyside area, Liverpool, Regno unito	1994	NV	Estate
41	Singapore, Repubblica di Singapore	1986	HVAC	Estate
42	Singapore, Repubblica di Singapore	1987	NV	Estate
49	Honolulu, Hawaii, USA	1995	NV	Stagione calda
50	Honolulu, Hawaii, USA	1995	HVAC	Stagione Calda

Tabella 2.1 – Database elaborati

2.3.2 Dati climatici e Mean Running Temperature.

La teoria del comfort adattivo si basa sul legame tra la temperatura di comfort e quella esterna. In un articolo di McCartney e Nicol (2002), dove rimandano ad altri articoli (Humphreys 1995, Nicol 1996), dicono come la temperatura esterna possa essere espressa dalla mean running temperature, per ottenere così delle migliori relazioni. La mean running temperature è una media pesata delle temperature medie giornaliere di diversi giorni precedenti a quello di interesse. Per calcolarla è stato necessario reperire i dati climatici delle località oggetto dello studio.

Sono stati inclusi i dati climatici provenienti da diverse fonti:

- Il National Climatic Data Center (NCDC) Americano che mette a disposizione online un archivio dei dati climatici di diverse località del mondo. Sul sito dell'ente è possibile richiedere e scaricare dei dati climatici.
- La Radcliffe Meteorological Station, UK, ha fornito gentilmente e gratuitamente alcuni dei dati climatici.
- Dati climatici degli aeroporti di riferimento, ottenuti tramite internet sul sito tutempo.net.
- Nel caso del Pakistan i dati climatici dell'aeroporto sono stati integrati con quelli disponibili nella scheda del database, questo per via dell'incompletezza dei dati aeroportuali nell'anno di interesse. Prima di effettuare l'integrazione si è verificato che i dati, nei giorni dove si possedevano le temperature di entrambe le fonti, non differissero di più di 1°C in media.

In questo studio ci si è basati sulla formula riportata dalla norma UNI EN 15251: 2008, riportata qui sotto in formula 2.2.

$$T_{RMn} = \alpha \cdot T_{RMn-1} + (1 - \alpha) \cdot T_{An-1} \quad (2.2)$$

dove T_{RMn-1} è la mean running temperature del giorno precedente a quello di interesse, T_{An-1} è la temperatura media giornaliera dell'aria esterna e α è una costante posta uguale a 0,8. La mean running temperature acquisisce caratteri di validità quando la serie di temperature

utilizzate è molto lunga, questo però non è sempre possibile. In questo caso per ottenere una buona stima della temperatura di partenza può essere utilizzata la formula 2.3

$$T_{RMn} = \frac{(T_{An-1} + 0,8 \cdot T_{An-2} + 0,6 \cdot T_{An-3} + 0,5 \cdot T_{An-4} + 0,4 \cdot T_{An-5} + 0,3 \cdot T_{An-6} + 0,2 \cdot T_{An-7})}{3,8} \quad (2.3)$$

2.3.3 Elaborazione primaria database

Per elaborare i database è stato necessario creare dei campioni i cui soggetti condividessero la stessa condizione termica. Ad ogni questionario, espressione di un soggetto dell'edificio, veniva attribuita la mean running temperature del giorno in cui è stato effettuato. Successivamente i dati venivano divisi in base all'edificio in cui era stata effettuata la misurazione, per poi raggrupparli in base alla temperatura operate e alla mean running temperature. Diversi soggetti erano raggruppati in un unico campione quando la temperatura operante e la mean running temperature erano compresi in un intervallo di al più 1°C. In questo modo si associavano persone dello stesso edificio che si trovavano in una condizione termica interna ed esterna equiparabile. Una volta creati i campioni, per ognuno di essi venivano calcolati:

- Numero totali dei soggetti appartenenti al campione.
- Temperatura operante media e mean running temperature media del campione, basate sulle temperature di ogni questionario.
- Voto medio, ottenuto come media dei singoli voti della scala ASHRAE a sette punti.
- Insoddisfatti che percepiscono una sensazione di freddo. In questo studio sono state considerate persone che provano freddo, quelle con esprimono un voto minore di -1,5.
- Insoddisfatti che percepiscono una sensazione di caldo. In questo studio sono state considerate persone che provano caldo, quelle con esprimono un voto maggiore di 1,5.
- Le persone che rilevano una condizione di comfort. In questo studio sono state considerate persone in condizione di comfort, quelle che esprimono un voto compreso tra -1,5 e 1,5.

I campioni composti da meno di 20 questionari sono stati trascurati per rendere più attendibile l'analisi statistica. Piccoli gruppi di individui mostrano un'elevatissima sensibilità nella valutazione percentuale degli insoddisfatti, dove anche un solo insoddisfatto è in grado di modificare di molto il totale degli insoddisfatti. Tale numero minimo di soggetti è la condizione minima per garantire una soglia di variazione del 5 %

2.3.4 Determinazione della varianza della distribuzione dei voti

Il processo utilizzato per ottenere la varianza degli insoddisfatti nell'intorno del voto medio si basa sulla probit analysis, utilizzata anche dal Dr. Dama nei suoi appunti (2013).

In probabilità e statistica, la probit function è la funzione dei quantili associata alla normale standard. Matematicamente è l'inversa della funzione cumulativa di probabilità della distribuzione normale standard definita come $\Phi(z)$ come nella formula 2.4. La probit function risulta quindi definita come $\Phi^{-1}(p)$ come nella formula 2.5.

$$X_s \xrightarrow{N(0,1)} p = \Phi(X_s) \quad (2.4)$$

$$p \xrightarrow{N(0,1)} X_s = \Phi^{-1}(p) \quad (2.5)$$

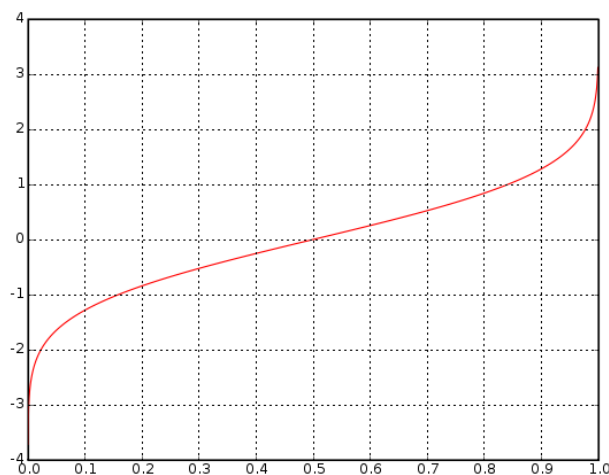


Figura 2.1 – Probit Plot, in ascissa c'è la probabilità cumulativa e in ordinata il quantile della normale standard associato. Wikipedia, “probit function” (2015).

La figura 2.1 mostra graficamente l'andamento della probit in funzione della probabilità cumulativa.

Analizzando i diversi campioni, tra cui anche quelli dell'esperienza di Fanger mostrati in tabella 1.2, è stato ottenuto per ognuno di essi il voto medio di sensazione termica.

Ogni campione rappresenta una distribuzione normale di voti, distribuita intorno al voto medio e dispersa seconda la varianza. Ogni campione possiede un suo valore medio e un suo valore di varianza. L'obiettivo della probit è mostrare come la sovrapposizione di tali distribuzioni porti ad ottenere un nuova distribuzione con un proprio valore di varianza. L'ipotesi di partenza è che la varianza di ognuna delle distribuzioni non dipenda dal voto medio. Il risultato della probit, se statisticamente valido, sarà una conferma di tale ipotesi.

La formula 2.6 mostra la creazione delle famiglie che porteranno alla determinazione dei punti necessari ad effettuare un interpolazione lineare necessaria per la determinazione della varianza della distribuzione.

$$\{p_i\} \xrightarrow{\Phi^{-1}(p_i)} \{X_{si}\} = \left\{ \frac{\bar{x}_s - \langle V \rangle_i}{\bar{\sigma}} \right\} \quad (2.6)$$

Dove X_{si} è il quantile della normale standard, x_s è il valore di soglia degli insoddisfatti, $\langle V \rangle_i$ è il voto medio i -esimo e σ è la radice della varianza della distribuzione reale. Riarrangiando la formula, essa può essere espressa come una funzione lineare, mostrata nella formula 2.6.

$$\{\langle V \rangle_i\} = -\bar{\sigma} \cdot \{X_{si}\} + \bar{x}_s \quad (2.7)$$

L'espressione 2.7 è una retta che ha per coefficiente angolare la radice della varianza della distribuzione degli insoddisfatti, e per intercetta il valore del quantile reale che indica la soglia di accettabilità. Ogni campione dava origine ad una coppia di coordinate, dove l'ascissa era il quantile standard riferito alla percentuale degli insoddisfatti e l'ordinata era il voto medio espresso dal campione. Esistendo contemporaneamente insoddisfatti che provavano caldo e insoddisfatti che provavano freddo, per ogni campione potevano essere presenti due quantili a parità di voto medio. Essendo presa in esame la stagione estiva, gli insoddisfatti che avevano freddo capitavano meno di frequente. Similarmente a come fece

Fanger nel suo lavoro (1970), i due casi sono stati separati, ottenendo la varianza per gli insoddisfatti che avevano caldo e per quelli che avevano freddo.

I punti sono stati graficati per zona geografica e interpolati linearmente. La figura 2.2 e la tabella 2.2 contengono i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati di Fanger.

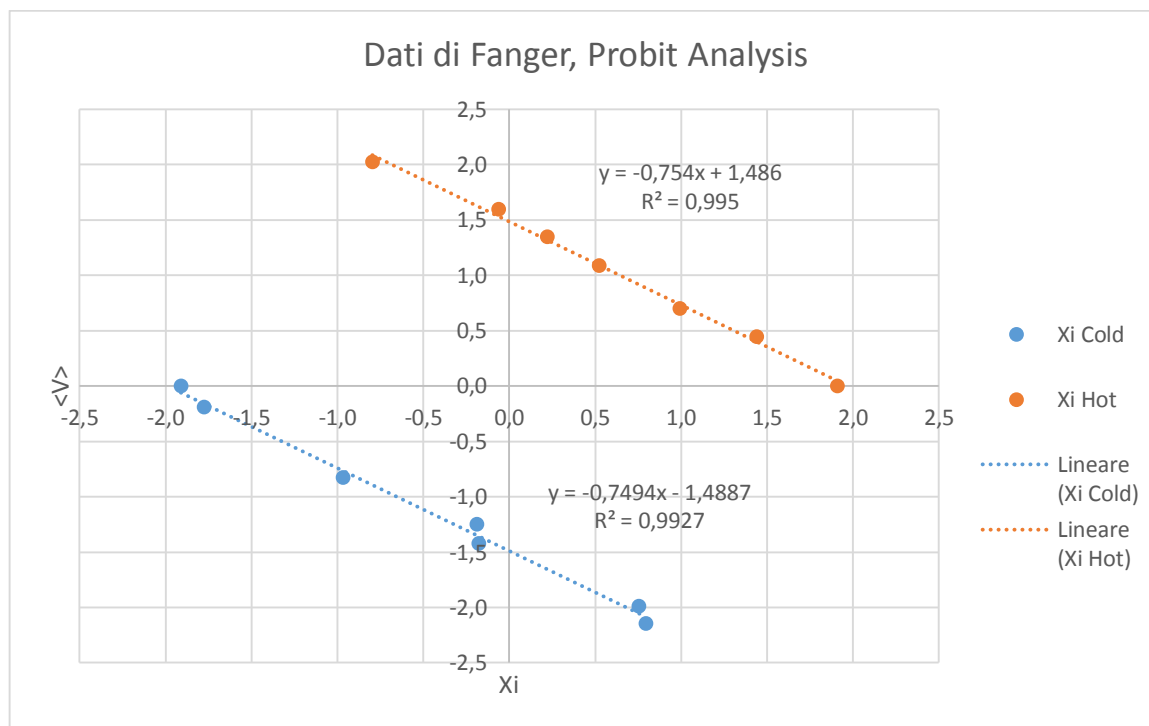


Figura 2.2 – Probit analysis per i dati di Fanger.

Possiamo osservare come la radice della varianza ottenuta dai dati di Fanger si pari a circa 0,75 sia nel caso del ramo caldo degli insoddisfatti che in quello del ramo freddo. Il valore di soglia che divide i voti che esprimono soddisfazione da quelli di insoddisfazione risulta essere per entrambe 1,49. Ciò è in ottimo accordo con la definizione della soglia di insoddisfazione ipotizzata in questo lavoro. Il coefficiente di determinazione R^2 ottenuto in entrambi i casi risulta molto alto e statisticamente rilevante.

Ramo insoddisfatti	σ	x_s	R^2
Caldo	0,75	1,49	99%
Freddo	0,75	1,49	99%

Tabella 2.2 – Risultati probit analysis sui dati di Fanger

Seguendo l'ipotesi secondo cui la soglia degli insoddisfatti è stata presa pari a $\pm 1,5$, l'interpolazione delle altre zone geografiche vincolava l'intercetta a quel valore quando

questo non era ottenuto normalmente. I grafici di tutte le altre località sono visionabili nell'allegato B.

Il risultato ottenuto era valutato in base al valore di R^2 , e in base alla qualità del suddetto valore, seguendo il metodo riportato da John Taylor (1986). Tale Metodo mette in relazione l' R^2 con il numero di punti con cui è stata effettuata l'interpolazione, mostrando la percentuale secondo cui la correlazione ottenuta potrebbe essere dovuta ad un caso fortuito. La tabella 2.3 mostra l'estratto dalla pubblicazione di Taylor.

N p.ti	R^2										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
3	100	94	87	84	74	67	59	51	41	29	0
6	100	85	70	56	43	31	21	12	6	1	0
10	100	78	58	40	25	14	7	2	0,5		0
20	100	67	40	20	8	2	0,5	0,1			0
30	100	49	16	3	0,4						0

Tabella 2.3 – Probabilità che la correlazione sia fortuita in funzione di R^2 e n. di punti interpolati

In questo modo sono stati ottenuti i valori della radice della varianza per ogni località studiata. Quando era possibile veniva calcolata sia quella riferita agli insoddisfatti del ramo caldo, sia a quelli del ramo freddo.

2.3.5 Determinazione del legame tra voto medio e scostamento della temperature operante da quella di comfort

Il passo successivo è stato l'ottenimento della correlazione che lega il voto medio con lo scostamento della temperatura operante da quella di comfort. Il tipo di correlazione cercato è della forma mostrata in formula 2.7.

$$\langle V \rangle = k \cdot \Delta T \quad (2.7)$$

$$\Delta T = T_{op} - T_{c(T_{mr})} \quad (2.8)$$

La correlazione mostra la sensibilità del voto medio in base al variare dello scostamento di temperatura. Attraverso la formula 2.1 mostrata nelle ipotesi, è stato possibile ottenere per ogni campione la sua temperatura di comfort dipendente dalla mean running temperature.

In questo caso i punti utilizzati per l'interpolazione avevano in ascissa lo scostamento della temperatura operante da quella di comfort e come ordinata il voto medio. L'ascissa dei modelli era vincolata all'origine del piano cartesiano, in questo modo quando lo scostamento dalla temperatura di comfort era nullo, il voto medio risulta nullo anch'esso. Un esempio dell'interpolazione effettuata è mostrata in figura 2.2.

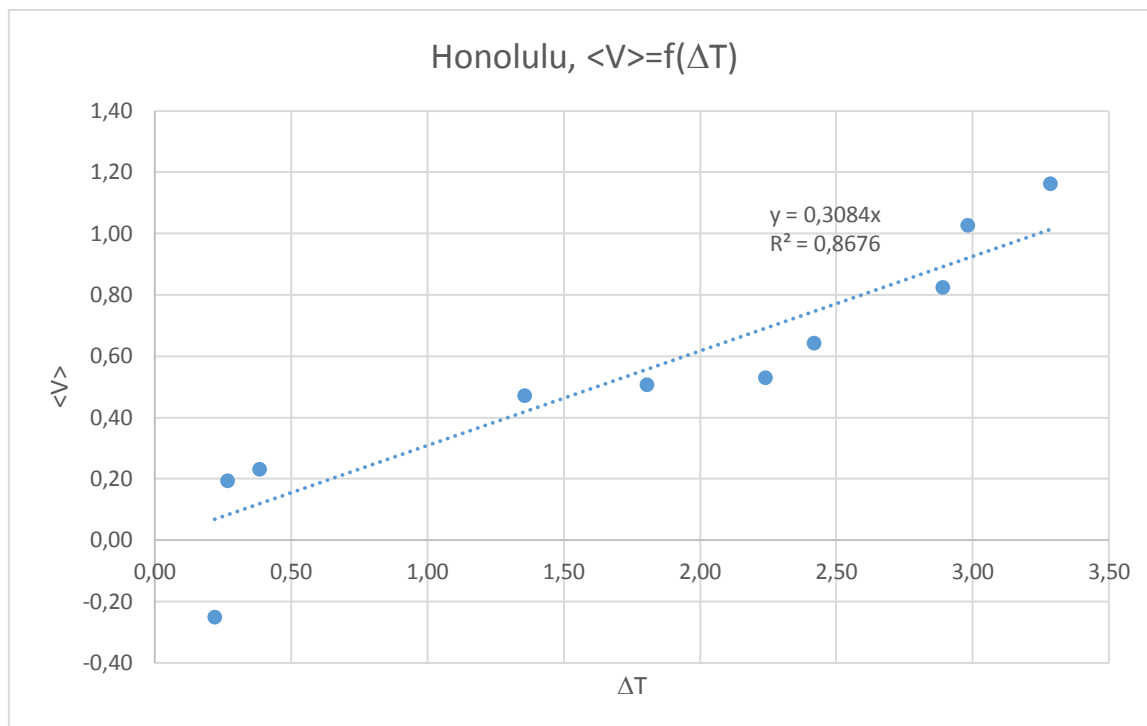


Figura 2.2 - Esempio interpolazione per k, Honolulu

2.3.6 Determinazione delle bande di accettabilità della temperatura operante

Avendo ottenuto la varianza, che mostra come si distribuiscono gli insoddisfatti nell'intorno del voto medio, e la sensibilità dei soggetti in funzione dello scostamento della temperatura operante da quella di comfort, è stato possibile calcolare le classi di accettabilità per ognuna delle zone geografiche coinvolte.

Le fasce di accettabilità più comuni, sono quelle che garantiscono il 90% e l'80% di soddisfatti sul totale degli occupanti. Avendo la varianza di ogni distribuzione e la percentuale di insoddisfatti totale è possibile, attraverso un procedimento numerico inverso, estrapolare il voto medio attorno a cui si verifica tale situazione. Per ogni zona geografica, a cui corrisponde un valore di varianza, sono stati ottenuti i voti medi corrispondenti alla percentuale di insoddisfatti del 10% e del 20%.

Applicando inversamente la formula 2.7, partendo dal voto medio precedentemente ottenuto ed estrapolando gli scostamenti della temperatura operativa dalla temperatura di comfort, sono stati ottenuti gli intervalli di accettabilità per ogni zona geografica che possedeva modelli validi.

2.4 Possibilità di confronto

Precedentemente abbiamo visto come il professor de Dear abbia ottenuto gli intervalli di accettabilità intorno alla temperatura di comfort, e come questi siano legati al modello di Fanger (1970) che lega il PPD al PMV, mostrato in formula 1.1. Egli utilizza tale formula, perché le correlazioni tra percentuale di soddisfatti e parametri come la temperatura operante o il PMV non avevano grande rilevanza statistica. Utilizzando la formula di Fanger ottiene il voto medio previsto quando la quantità di insoddisfatti viene fissata ad un certo valore di soglia. Avendo precedentemente trovato per ogni edificio delle correlazioni che legano il voto medio sperimentale alla temperatura operante, vi ha inserito (quando la rilevanza statistica di quelle correlazioni era significativa) il PMV di soglia per ottenere la temperatura operante di soglia. La differenza tra le due temperature di soglia è la dimensione dell'intervallo di accettabilità. L'utilizzo della formula 1.1 ipotizza che la distribuzione degli insoddisfatti sia sempre la stessa. Nel nostro caso, come verrà successivamente mostrato, la distribuzione degli insoddisfatti deriva da una probit analysis effettuata per ogni zona geografica, quindi ogni intervallo è specifico per una particolare regione. Gli insoddisfatti andranno a distribuirsi in base alla varianza della regione studiata, così da modificare l'ampiezza degli intervalli di accettabilità. Tali intervalli differiscono da quelli proposti dal professor de Dear (1998, 2002), si è resa quindi necessaria un'operazione di verifica e confronto in base ai campioni rilevati. L'idea è stata quella di verificare come si distribuiscono i campioni di insoddisfatti nelle varie fasce di accettabilità proposte da entrambi gli studi.

CAPITOLO 3 – DISCUSSIONE DEI RISULTATI

In questo capitolo sono presentati e discussi i risultati ottenuti nell'ambito dello svolgimento di questo lavoro.

La valutazione delle interpolazioni si è basata sul valore del coefficiente di determinazione R^2 e sulla percentuale (PF) che tale valore non fosse dovuto ad un caso fortuito, secondo la tabella di John Taylor (1986) come mostrato nella spiegazione della metodologia. Viene anche riportato il numero di campioni su cui si è basata l'interpolazione

L'elenco dei campioni utilizzati nell'ambito di questo lavoro di tesi sono consultabili nell'allegato C.

3.1 Varianza dei campioni

Attraverso la probit analysis dei campioni è stato possibile ottenere le deviazioni standard delle loro distribuzioni. Le tabelle proposte in seguito sono ordinate con criterio decrescente attraverso l' R^2 . A seguire, in caso di parità, il valore di casualità della correlazione e il numero di punti correlati. Le condizioni attraverso cui un modello è stato considerato attendibile per la ricerca della varianza sono un R^2 maggiore o uguale al 60% e un valore di PF minore del 15%.

I valori delle distribuzioni standard sono presentati nelle tabelle 3.1 e 3.2, e rappresentano il coefficiente angolare delle rette aventi formula 2.6, in cui l'intercetta è stata vincolata al valore di $\pm 1,5$, in base al ramo degli insoddisfatti interpolato.

Nella zona di San Francisco, l'elaborazione legata al ramo freddo degli insoddisfatti non è stata effettuata perché non erano presenti campioni contenenti individui che avessero freddo.

In tabella 3.3 e 3.4 sono mostrati per confronto i risultati della probit analysis effettuata su edifici ventilati meccanicamente. Questi ultimi si trovano nelle stesse località dei database di ventilazione naturale.

Ramo caldo degli insoddisfatti NV			
Località	σ	R ²	PF (n. punti)
Peshawar	1,13	97 %	<1 % (7)
Singapore	0,87	94 %	<1 % (7)
Melbourne	0,77	94 %	12 % (4)
Brisbane	0,82	89 %	<1 % (15)
San Francisco Bay Area	0,96	85 %	14 % (5)
Atene	0,61	74 %	<1 % (24)
Honolulu	1,05	74 %	3 % (9)
Milano	0,67	54 %	51 % (4)
Merseyside Area	1,12	<1 %	100 % (3)

Tabella 3.1 – Deviazioni standard per il ramo caldo degli insoddisfatti NV

All'interno della tabella 3.1, che mostra i risultati per gli edifici ventilati naturalmente considerando il ramo caldo degli insoddisfatti, possiamo osservare come 7 modelli su 9 siano attendibili secondo i criteri di attendibilità imposti. Alcuni di questi modelli oltre ad aver un R² abbastanza alto, sono ricavati attraverso un discreto numero di punti, rendendo tale correlazione non casuale.

In linea generale si osserva come le deviazioni standard delle varie località siano maggiori di quella derivata dall'esperienza di Fanger. Tra i modelli attendibili fanno eccezione Melbourne, dove il valore è quasi uguale e Atene, dove risulta essere più basso. Tali valori sono stati poi utilizzati per ottenere le fasce di accettabilità per ognuno dei diversi paesi studiati.

Ramo freddo degli insoddisfatti NV			
Località	σ	R ²	PF (n. punti)
Melbourne	0,95	100 %	<1 % (3)
Singapore	0,77	54 %	39 % (5)
Milano	0,96	45 %	59 % (4)
Atene	1,16	41 %	73 % (3)
Brisbane	1,04	27 %	68 % (5)
Peshawar	0,22	7 %	92 % (5)
Honolulu	1,04	<1 %	100 % (7)
Merseyside Area	1,44	<1 %	100 % (3)
San Francisco Bay Area	na	na	na

Tabella 3.2 – Deviazioni standard per il ramo freddo degli insoddisfatti NV

In tabella 3.2 sono mostrate le deviazioni standard nel caso in cui era analizzato il ramo freddo degli insoddisfatti nella stagione estiva. La qualità dei modelli, in questo caso, risulta molto bassa rispetto alle condizioni imposte. Questo perché i campioni studiati non sempre avevano una coda nella zona degli insoddisfatti che provavano freddo. Ragion per cui il numero dei punti è ridotto. Come si può osservare nell'allegato C, la gran maggioranza dei campioni possiede un voto di sensazione termica medio maggiore di zero. Questo comporta

che gli insoddisfatti che provano freddo siano in numero molto ridotto rispetto a quelli che hanno caldo, come nel caso della Grecia dove essi compaiono solo in 3 campioni su 24.

Ramo caldo degli insoddisfatti HVAC			
Località	σ	R ²	PF (n. punti)
Singapore	1,01	82 %	27 % (4)
Milano	1,03	72 %	36 % (4)
Brisbane	0,92	66 %	13 % (7)
Honolulu	0,89	14 %	91 % (3)

Tabella 3.3 – Deviazioni standard per il ramo caldo degli insoddisfatti HVAC

La tabella 3.3 mostra i risultati del ramo caldo degli insoddisfatti in edifici ventilati meccanicamente. In questo caso solo il modello di Brisbane è considerato attendibile. In due dei casi la percentuale di casualità della regressione era troppo alta per via del basso numero di punti interpolati.

Ramo freddo degli insoddisfatti HVAC			
Località	σ	R ²	PF (n. punti)
Singapore	0,97	97 %	3 % (5)
Honolulu	1,06	93 %	1 % (6)
Milano	0,90	84 %	25% (4)
Brisbane	0,86	51 %	26 % (7)

Tabella 3.4 – Deviazioni standard per il ramo freddo degli insoddisfatti HVAC

In tabella 3.4 sono mostrati i risultati del ramo freddo degli insoddisfatti posti in edifici ventilati meccanicamente. In questo caso 2 modelli su 4 sono risultati attendibili e le deviazioni standard a loro collegate sono maggiori di 0,75. L'aspettativa era quella di ottenere tale valore per gli edifici ventilati meccanicamente. Osservando l'allegato C vediamo come i voti medi dei campioni siano distribuiti quasi equamente tra positivi e negativi, con una leggera maggioranza verso quelli negativi.

Al contrario di edifici ventilati naturalmente, dove i voti medi erano praticamente sempre positivi, in edifici ventilati meccanicamente è più frequente trovare persone che hanno freddo. In questo modo risulta possibile l'analisi delle code di insoddisfatti che hanno freddo, potendo quindi effettuare la probit analysis con risultati accettabili.

Nella tabella 3.5 è mostrato un riepilogo dell'elaborazione. Esso è diviso per tipologia di sistema di ventilazione e per ramo degli insoddisfatti.

	NV Caldo	NV Freddo	HVAC Caldo	HVAC Freddo
Numero di modelli ottenuti	9	7	4	4
Numero di modelli significativi (%)	7 (78% del totale)	1 (14 % del totale)	1 (25% del totale)	2 (50% del totale)
σ Media (\pm Dev.st)	0,89 (\pm 0,17)	0,95 (na)	0,92 (na)	1,02 (\pm 0,06)

Tabella 3.5 – Riepilogo radici della varianza

Dividendo l'analisi per sistema di ventilazione si può osservare come nei due casi ci sia una differenza per quanto riguarda l'attendibilità dei modelli rispetto alla coda degli insoddisfatti analizzata.

Per la ventilazione naturale, la percentuale di modelli attendibili nel ramo caldo degli insoddisfatti è molto maggiore rispetto a quella del ramo freddo. Ciò, come è stato precedentemente spiegato, è probabilmente dovuto al fatto che i campioni che contengono insoddisfatti che provano freddo sono più rari in edifici ventilati naturalmente durante la stagione estiva. In essi la maggior parte delle persone tende ad aver caldo piuttosto che freddo. Infatti solo un modello ha una rilevanza significativa. Risulta quindi che i modelli più attendibili per la stagione estiva in edifici ventilati naturalmente sono quelli ricavati dal ramo caldo degli insoddisfatti.

Nel caso di edifici ventilati naturalmente solo un modello è risultato attendibile per quanto riguarda il ramo caldo degli insoddisfatti. Gli R^2 hanno valori ragionevolmente alti, ma con così pochi punti non è scontato che la correlazione ottenuta non sia dovuta ad un caso fortuito. Non rispettando i canoni della tabella di Taylor (1986) tali modelli sono quindi considerati non statisticamente significativi. Al contrario per il ramo freddo degli insoddisfatti i modelli hanno degli R^2 maggiori a fronte anche di una regressione effettuata su un numero maggiore di punti.

Valutando le radici delle varianze delle due tipologie di sistema di ventilazione osserviamo come entrambe siano maggiori del valore 0,75 ricavato attraverso i dati di Fanger. A parità di voto medio previsto, questo porterebbe a previsioni più severe riguardo

alla percentuale degli insoddisfatti, essendo le code della distribuzione più ampie. Per valutare la compatibilità delle distribuzioni dei valori medi della varianza sarebbe stato necessario utilizzare una procedura di T-test, ma ciò è reso impossibile dal fatto che le quattro distribuzioni della tabella 3.5 contengono pochi valori. Essi non sono abbastanza per ipotizzare la normalità dei quattro gruppi e quindi poter effettuare un T-test.

3.2 Correlazione tra voto medio e scostamento dalla temperatura di comfort

La seconda parte del lavoro ha portato alla determinazione della sensibilità dei gruppi di campioni. Tale parametro è stato ottenuto attraverso correlazioni che legano il voto medio espresso dagli individui di un campione e la differenza di temperatura tra quella a cui erano sottoposti e quella che sarebbe dovuta essere ottimale per una situazione di comfort. Tale sensibilità è espressa dal coefficiente che lega le due grandezze e denota come si modifica il voto medio in base allo scostamento dal comfort. Un basso valore di questo coefficiente, rispetto ad uno più alto, fa in modo che gli scostamenti della temperatura operante da quella di comfort non produca un grande aumento del voto medio, e quindi degli insoddisfatti. Tale valore è stato poi utilizzato per ottenere la bande di accettabilità insieme alla varianza.

Al fine di procedere con l'elaborazione con la maggior parte dei casi significativi sulla parte delle deviazioni standard, sono stati presi come accettabili i modelli con un R^2 maggiore del 40 %, ma mantenendo il valore di PF al di sotto del 15%.

Per alcune zone geografiche non è stato ottenuto il valore di k perchè i punti erano pochi (3 per la zona di Merseyside) e la correlazione che ne derivava non aveva caratteri di validità.

La tabella 3.6 mostra i risultati dell'elaborazione effettuata, i grafici sono invece visionabili nell'allegato B.

Coefficiente del legame tra voto medio e ΔT dal comfort			
Località	k [1/K]	R ²	PF (n. punti)
Honolulu	0,31	87 %	<1 % (10)
Melbourne	0,32	82 %	5 % (6)
Peshawar	0,25	73 %	8 % (7)
Brisbane	0,32	60 %	4 % (16)
Singapore	0,26	57 %	13 % (9)
Atene	0,18	48 %	2 % (24)
Milano	0,28	45 %	59 % (4)
San Francisco Bay Area	0,20	39 %	55 % (5)
Merseyside Area	na	na	na

Tabella 3.6 – Coefficiente del legame tra voto medio e ΔT dal comfort

In tabella 3.7 è contenuto il riepilogo dove è mostrato il valore medio del coefficiente k per tutti i modelli considerati attendibili.

	NV
Numero di modelli ottenuti	8
Numero di modelli significativi (%)	6 (75% del totale)
k Medio (\pm Dev.st)	0,27 (\pm 0,06)

Tabella 3.7 – Riepilogo k

3.3 Confronto bande di accettabilità: Tesi VS ASHRAE 55

La sezione conclusiva di questo capitolo arriva a confrontare gli standard ASHRAE con i risultati precedentemente ottenuti. Nei grafici contenenti le bande di accettabilità, i punti che rappresentano i campioni si andranno a inserire in base ai valori di temperatura operante e mean running temperature. Essi avranno un colore dipendente dalla quantità di insoddisfatti contenuti in quel campione.

I grafici proposti sono divisi per zona geografica. Non è stata effettuata un'elaborazione raggruppata di tutte le zone geografiche. I valori medi contenuti nelle tabelle 3.5 e 3.6 non devono essere presi come rappresentativa del valore di varianza e sensibilità globale, ma semplicemente come strumento di confronto e riepilogo.

Le bande di insoddisfazione scelte sono del 10 % e del 20 %, come descritto in metodologia. Per certi valori di radice della varianza, parliamo di quelli sopra lo 0,91, non è stato possibile ottenere la bande del 10% perché il valore minimo degli insoddisfatti per tali distribuzioni è superiore al 10 %, anche nel caso in cui il voto medio sia nullo. Ciò è dovuto all'alto valore della varianza, in questo modo la curva si allarga e la code diventano più abbondanti. La tabella 3.8 contiene gli intervalli di accettabilità ottenuti durante l'elaborazione.

Come possiamo notare nella maggior parte dei casi, gli intervalli ottenuti sono più stretti rispetto a quelli dello standard ASHRAE. Ciò non avviene nel caso della Grecia, dove gli intervalli sono più larghi per via della bassa varianza.

Località	Soddisfatti > 90%	Soddisfatti > 80%
	°C	°C
Brisbane	±1,2	±2,5
Melbourne	±1,6	±2,7
Peshawar	na	±1,3
Atene	±3,9	±5,4
Singapore	±1,0	±2,9
Honolulu	na	±1,6
ASHRAE 55	±2,5	±3,5

Tabella 3.8 – Intervalli di accettabilità

3.3.1 Caso Brisbane

Il primo confronto è quello mostrato dai grafici nelle figure 3.1 e 3.2. Nel caso di Brisbane gli intervalli ottenuti in questo lavoro sono più stretti rispetto a quelli dello standard ASHRAE. Per via di questa differenza si può notare come i campioni contenenti il maggior numero di insoddisfatti rimangano fuori dalle fasce di accettabilità della tesi. Per lo standard ASHRAE, alcuni di quei campioni sono contenuti nella fascia di accettabilità del 80 %. I campioni con insoddisfatti tra il 10% e il 20% sono inclusi negli intervalli di accettabilità ricavati secondo il metodo adottato in questa tesi, mentre col lo standard ASHRAE ricadrebbero nella previsione di insoddisfatti minori del 10%. I campioni con insoddisfatti al di sotto del 10% rientrano completamente all'interno delle bande dello standard ASHRAE.

Come si può notare nelle Figure 3.1 e 3.2 vi sono campioni con percentuali di insoddisfatti in tutte e tre le fasce identificate (<10%, tra 10 e 20%, > 20%) per i quali la temperatura operante è maggiore di circa 1-1.5 K rispetto alla temperatura di Comfort prevista dalla ASHRAE 55. Ciò ha impatto nella stima del coefficiente k che mostra un R^2 del 60%. Comunque, complessivamente in Figura 3.1 12 dei 15 campioni si collocano correttamente nella fasce ricavate attraverso la metodologia proposta.

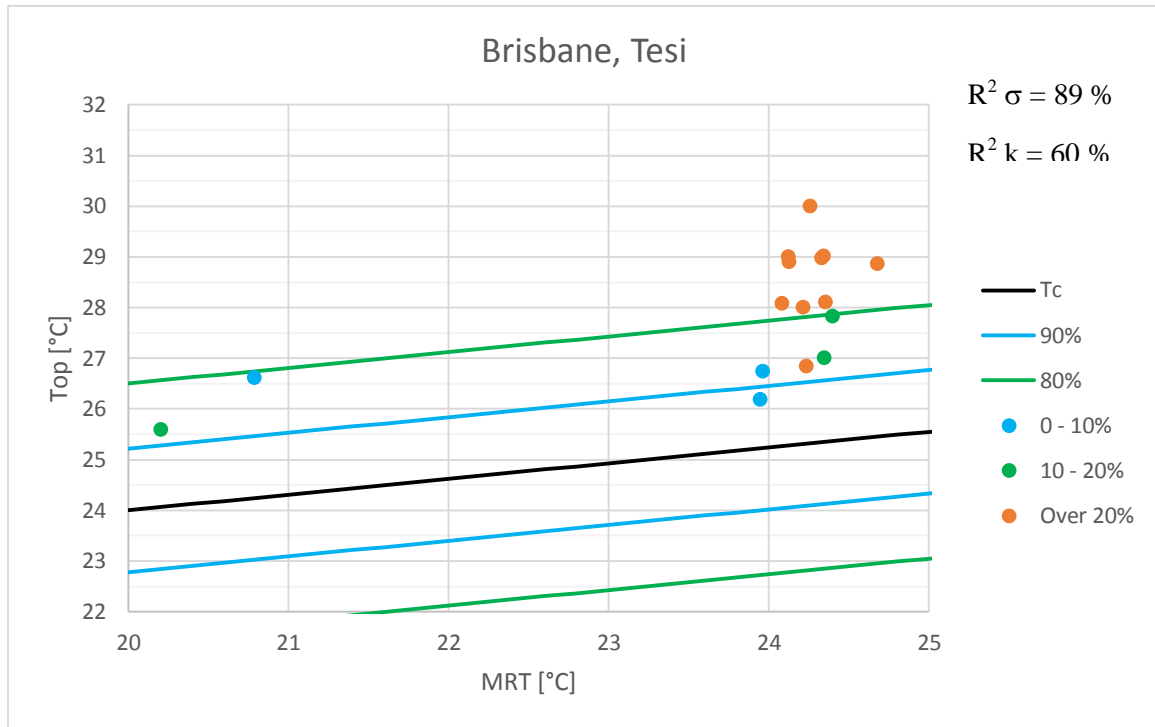


Figura 3.1 – Brisbane, intervalli accettabilità, tesi

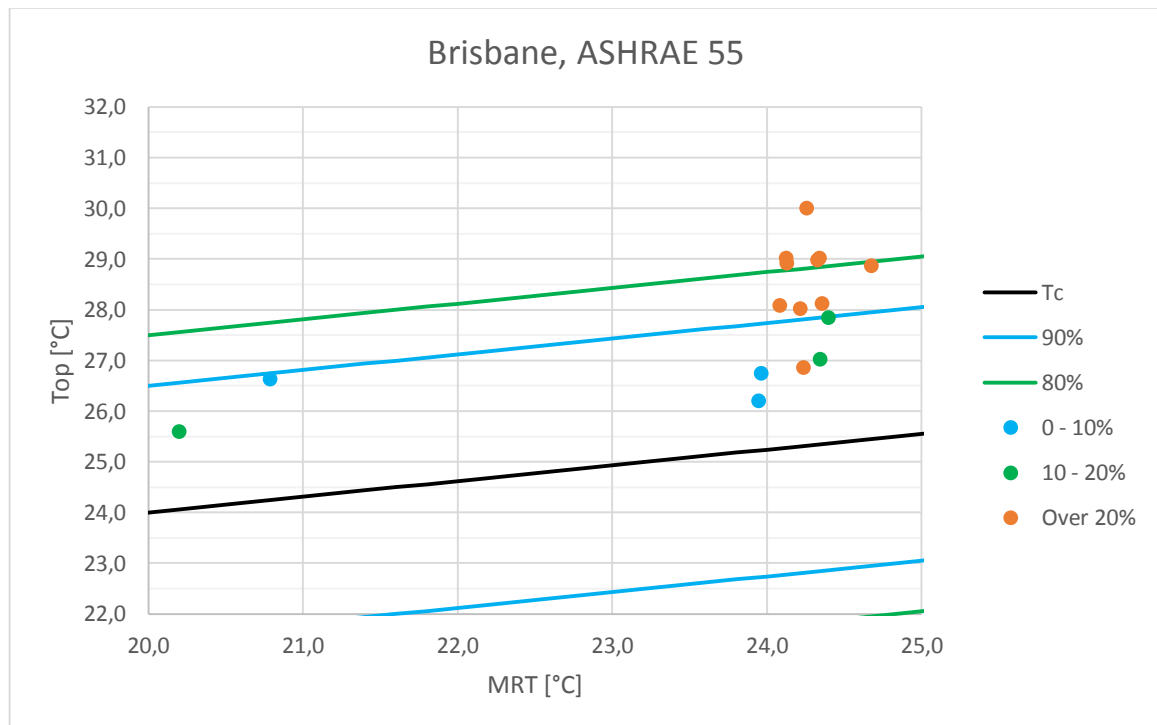


Figura 3.2 – Brisbane, intervalli accettabilità, ASHRAE 55

3.3.2 Caso Melbourne

Le figure 3.3 e 3.4 contengono i grafici relativi alla zona di Melbourne. In questo caso i campioni sono pochi e rappresentano tranne una situazione con meno del 10% di insoddisfatti. Questi ricadono abbastanza bene nel corretto intervallo sia rispetto allo standard ASHRAE sia rispetto all'analisi condotta in questa tesi. Lo stesso vale per l'unico campione con insoddisfatti al di sopra del 20%.

Si noti che la determinazione statistica di entrambi i parametri, σ e k , mostra valori di R^2 discretamente elevati.

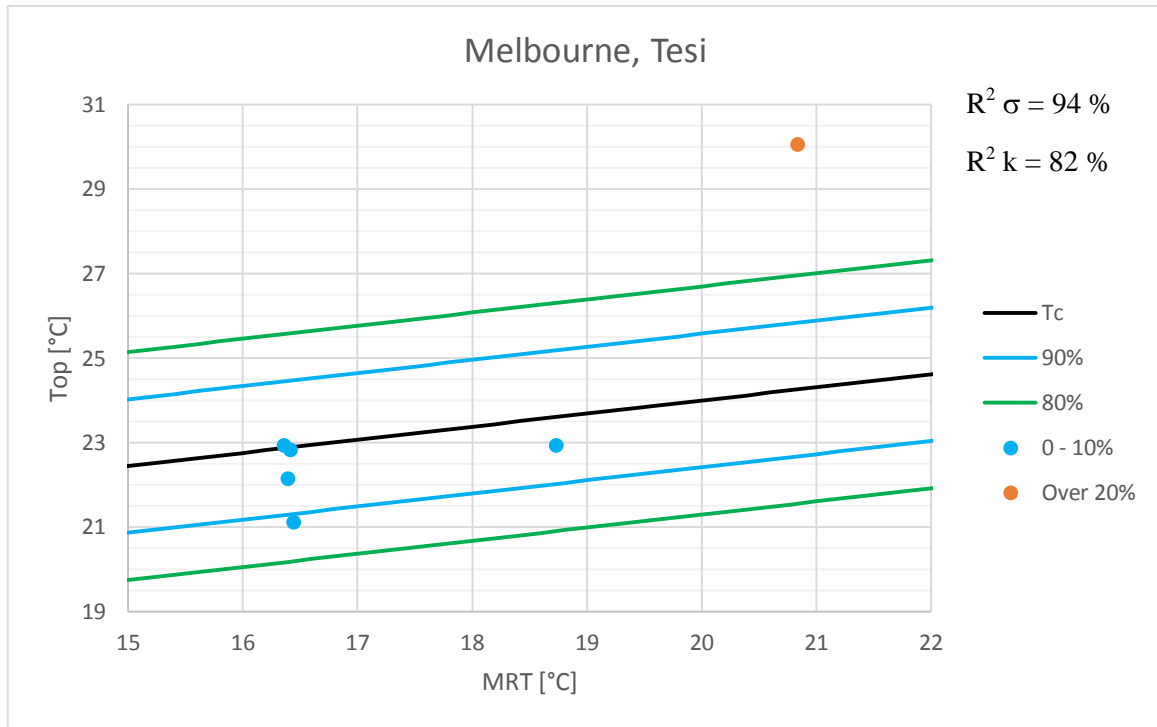


Figura 3.3 – Melbourne, intervalli accettabilità, tesi

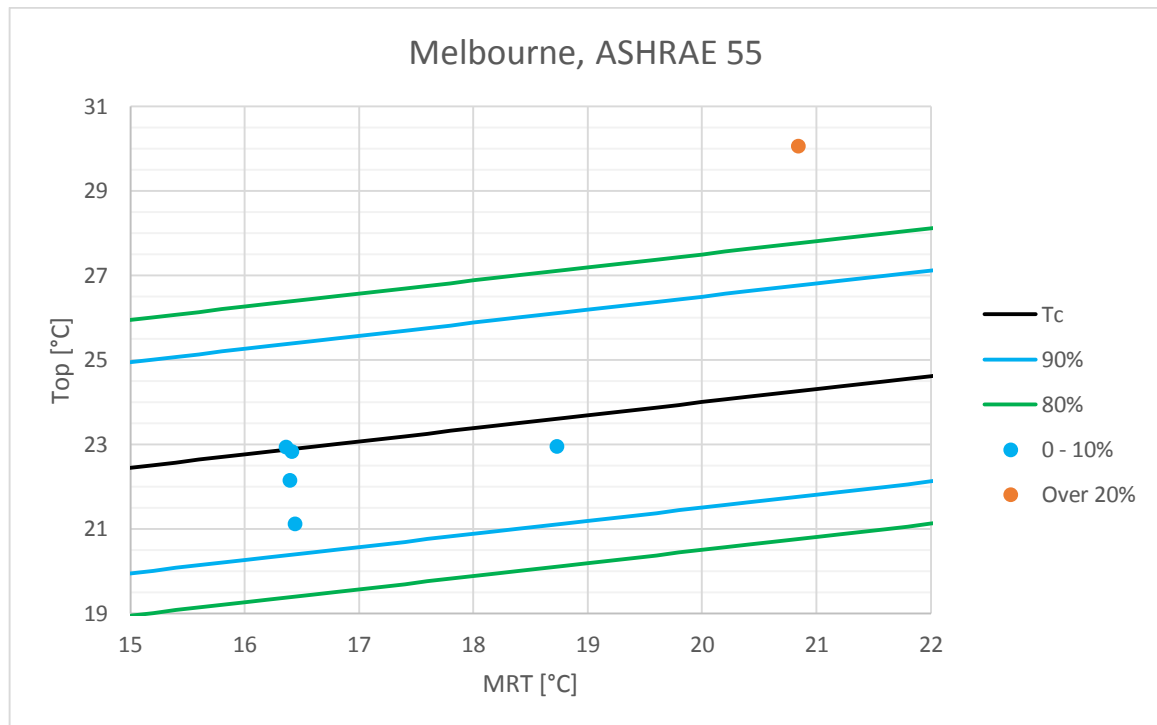


Figura 3.4 – Melbourne, intervalli accettabilità, ASHRAE 55

3.3.3 Caso Peshawar

Il caso di Peshawar è osservabile nelle figure 3.5 e 3.6. A causa dell'alta varianza, la banda di accettabilità al 90% nella Figura 3.5 non è presente, e quella al 80% è relativamente stretta rispetto a quelle dello standard ASHRAE. In effetti per questo caso non sono presenti campioni con meno del 10 % degli insoddisfatti. In Figura 3.5 i casi con meno del 20 % di insoddisfatti non rientrano nella corrispondente banda. Di contro in Figura 3.6 (bande ASHRAE) questi casi andrebbero ad inserirsi nella zona di accettabilità al 90%. Per quanto riguarda i campioni con insoddisfatti maggiori del 20%, si può notare che risultano quasi tutti ben classificati in Figura 3.5, mentre circa la metà di questi secondo le bande ASHRAE ricadrebbero nella zona di accettabilità (Figura 3.6).

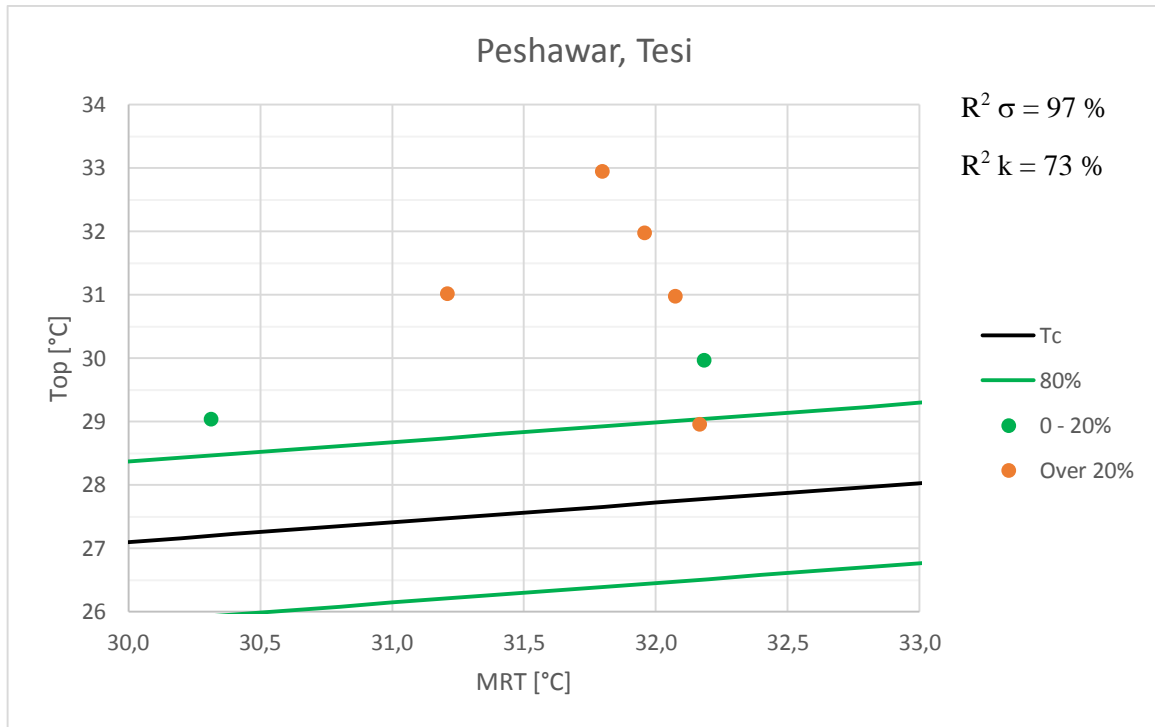


Figura 3.5 – Peshawar, intervalli accettabilità, tesi

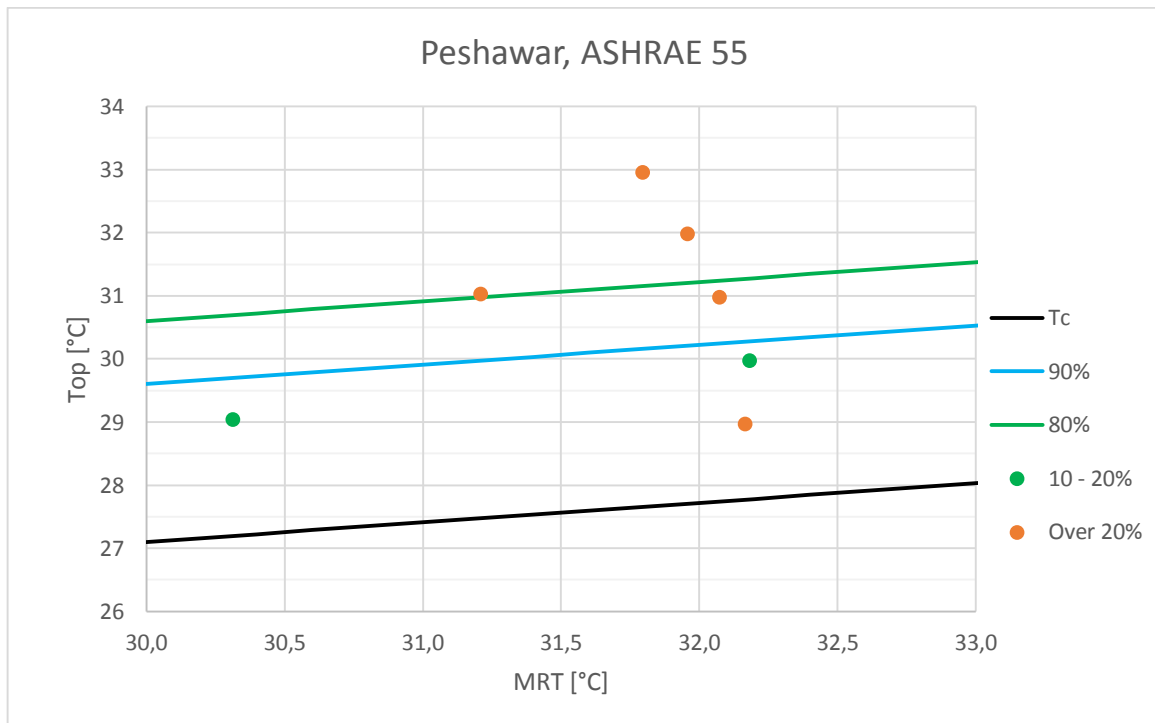


Figura 3.6 – Peshawar, intervalli accettabilità, ASHRAE 55

3.3.4 Caso Atene

Le figure 3.7 e 3.8 mostrano il confronto effettuato nella zona di Atene. In questo caso i campioni con diverse quantità di insoddisfatti tendono a mescolarsi nella zona centrale. Nonostante l'elevata numerosità dei campioni attraverso i quali sono stati dedotti i valori di σ e k , gli R^2 ottenuti sono modesti. Sia gli intervalli ricavati nell'ambito di questo lavoro che quelli dello standard ASHRAE non identificano correttamente i campioni di questa zona geografica. Ciò fa pensare che i parametri in grado di incidere nelle previsioni possano essere molteplici, ragion per cui sarebbe corretto prendere in considerazione anche altre variabili durante lo studio dei modelli predittivi del comfort adattivo. Nello specifico i campioni di questo caso sono il risultato di un accorpamento di dati che spaziano in un intervallo temporale di due anni, fatto che potrebbe aver portato ad una eccessiva dispersione dei punti utilizzati per l'ottenimento dei parametri sopracitati.

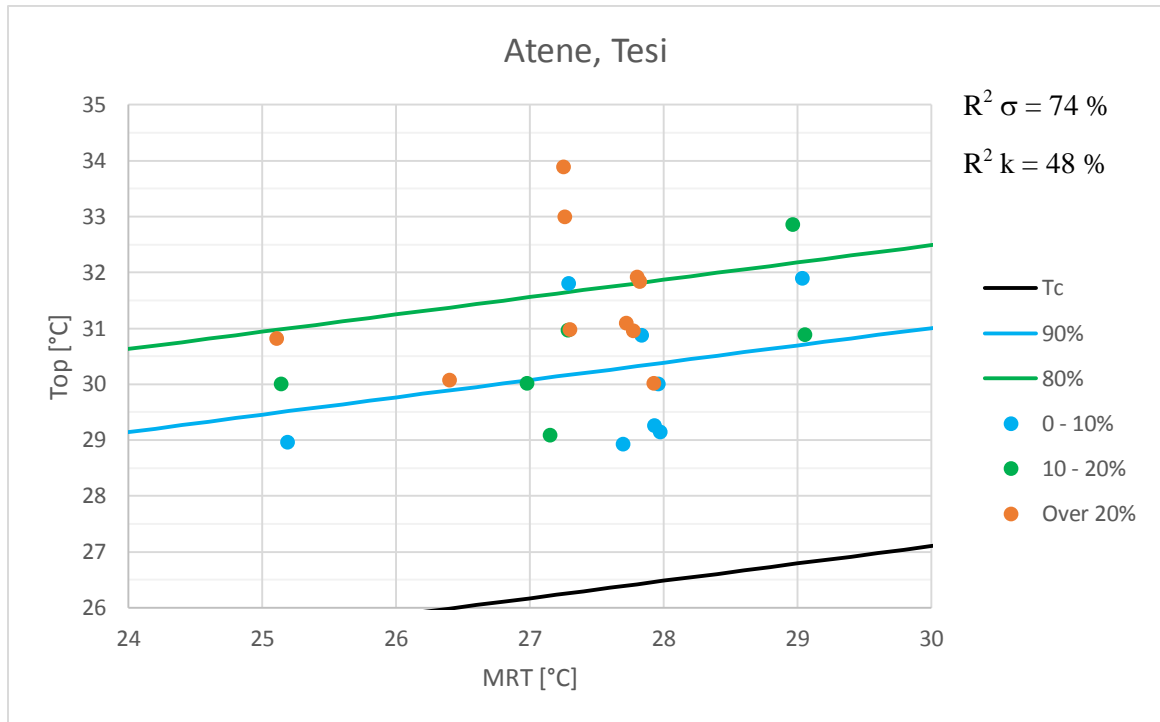


Figura 3.7 – Atene, intervalli accettabilità, tesi

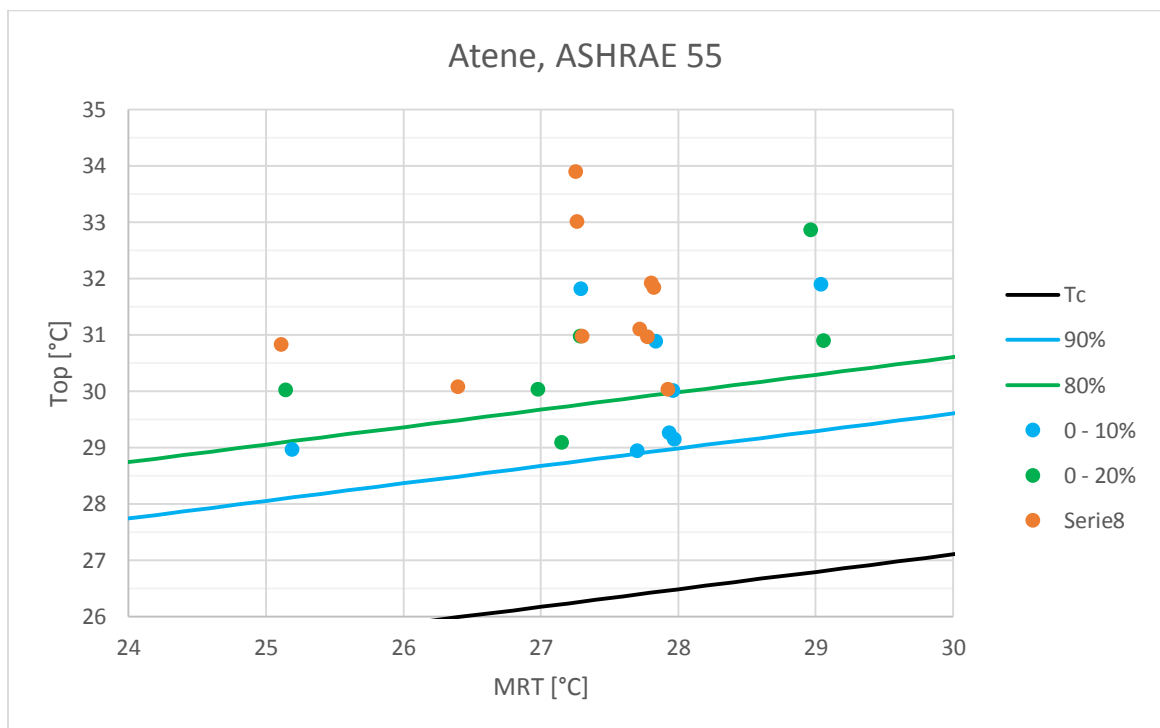


Figura 3.8 – Atene, intervalli accettabilità, ASHRAE 55

3.3.5 Caso Singapore

Il caso di Singapore è osservabile nelle figure 3.9 e 3.10. In questo caso entrambe le tipologie di intervallo identificano correttamente i campioni i cui insoddisfatti sono maggiori del 20 %. Per i campioni al di sotto di tale soglia, essendoci mescolamento tra i campioni con insoddisfatti sotto al 10% e insoddisfatti compresi tra il 10 e il 20%, entrambe le tipologie di intervallo li identificano sotto la soglia del 20 %, ma non sempre nella corretta fascia di accettabilità. Per quanto riguarda la quantità assoluta di punti ben identificati entrambe le tipologie di intervalli ottengono 6 punti su 9.

Le due tipologie di intervalli risultano quasi simile per quanto riguarda la fascia di accettabilità del 20%, ragion per cui entrambe le tipologie di intervalli identificano bene i campioni con alto numero di insoddisfatti.

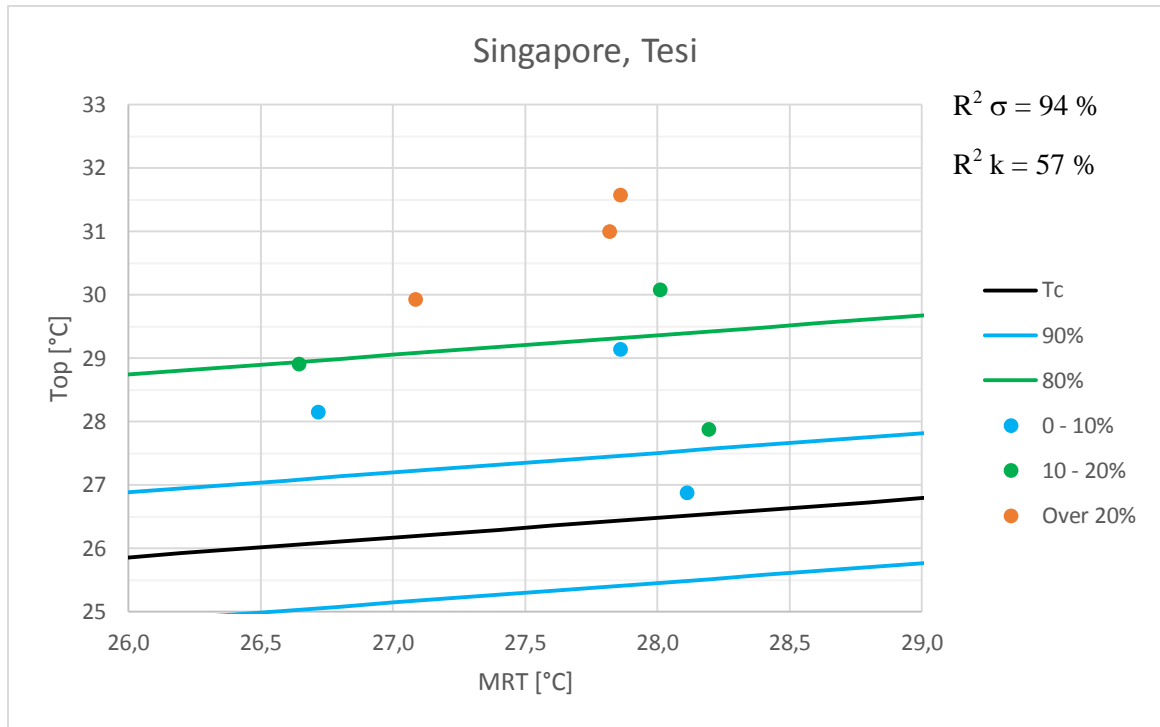


Figura 3.9 – Singapore, intervalli accettabilità, tesi

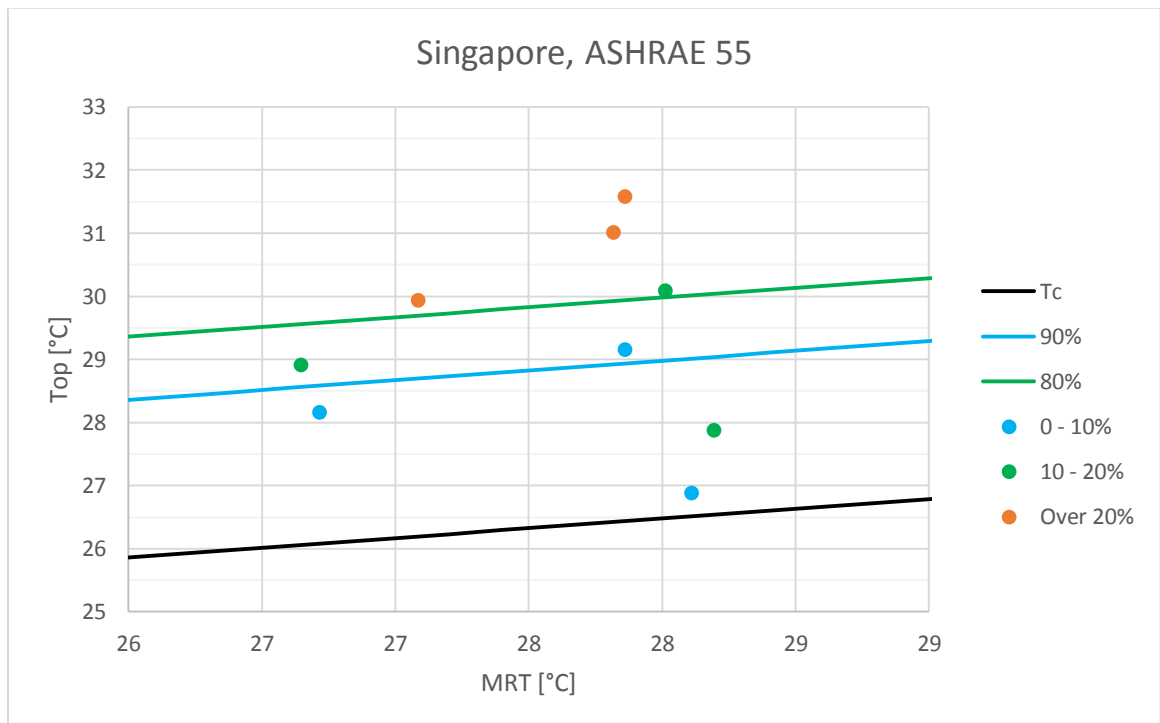


Figura 3.10 – Singapore, intervalli accettabilità, ASHRAE 55

3.3.6 Caso Honolulu

L'ultimo caso esaminato, mostrato in figure 3.11 e 3.12, è quello della zona di Honolulu. Come nel Pakistan, non è stato possibile ottenere una banda di accettazione al 90% per via dell'alta varianza di questa zona geografica. Nella Figura 3.11 possiamo osservare come i campioni con insoddisfatti maggiori del 20 % ricadano nella fascia corretta, cosa che non succede negli intervalli ASHRAE mostrati in Figura 3.12.

In questo caso è importante citare come i campioni utilizzati non siano frutto di un accorpamento ad hoc dei dati utilizzati, ma siano stati raccolti in gruppo raccolti già sul campo attraverso campagne comunitarie. Ciò ha portato a campioni molto uniformi, che hanno restituito a fine elaborazione dei valori di R^2 discretamente alti sia per la σ che per k . Risulta quindi importante al fine di ottenere dei buoni risultati per la metodologia proposta l'utilizzo di campioni il più omogenei possibile. L'esempio opposto può essere quello della Grecia, dove la dispersione ha fatto in modo che gli R^2 prodotti fossero piuttosto modesti.

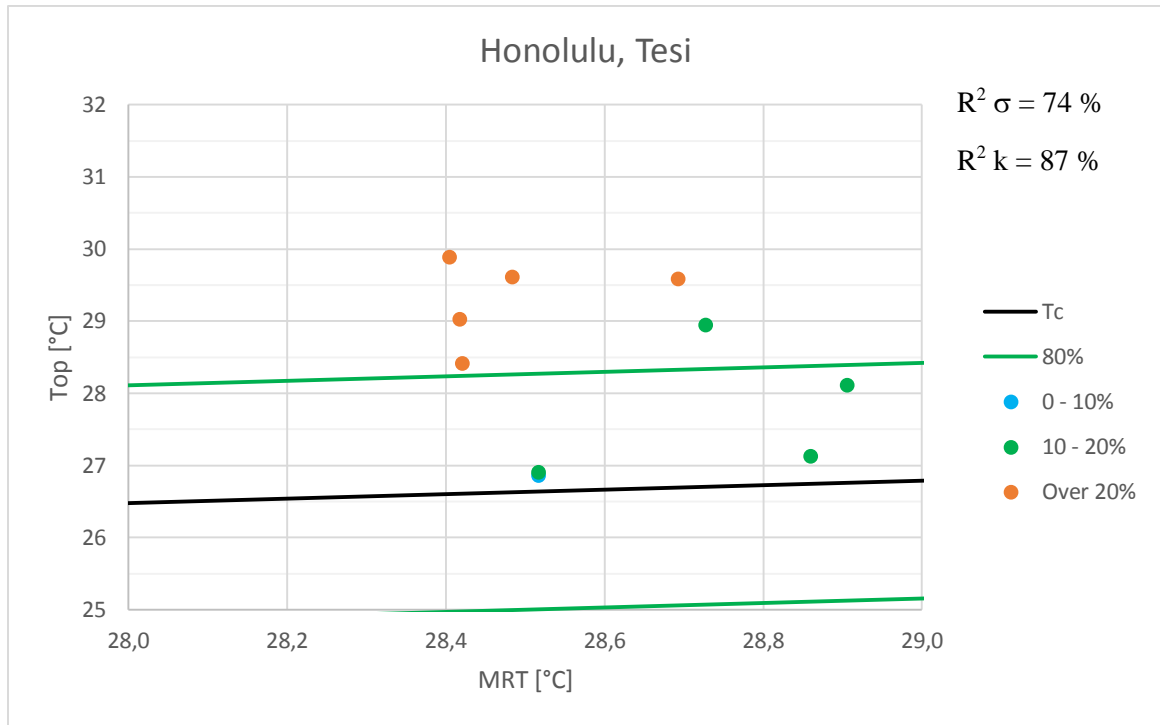


Figura 3.11 – Honolulu, intervalli accettabilità, tesi

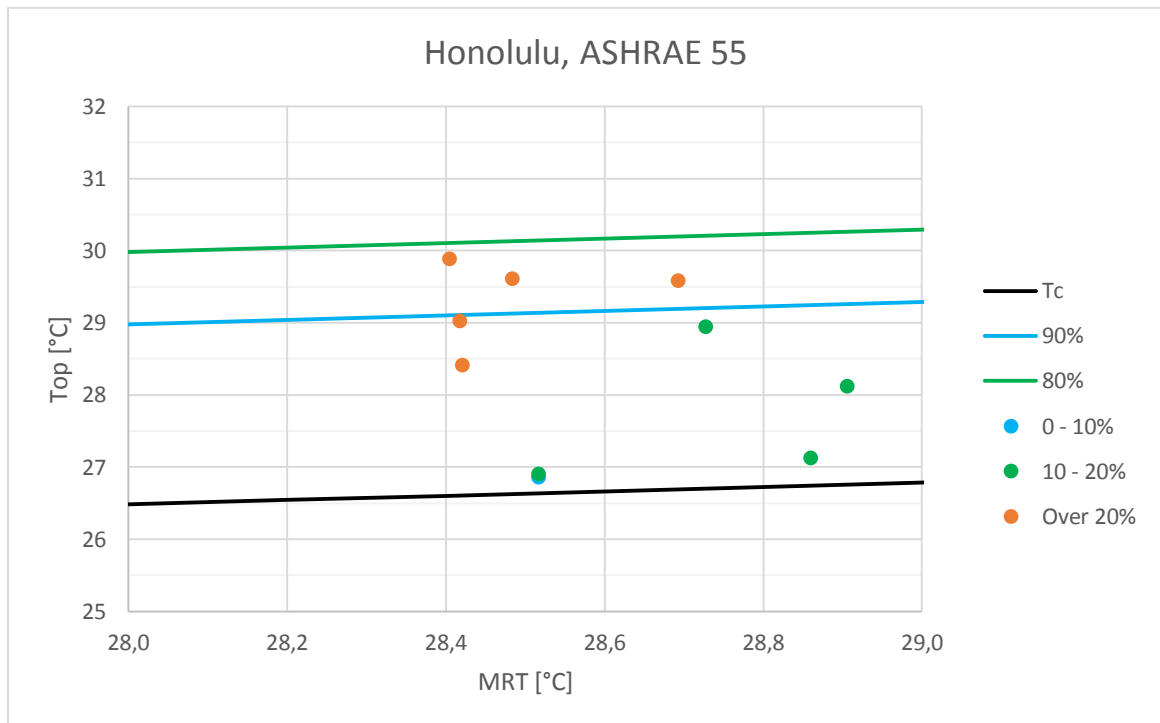


Figura 3.12 – Honolulu, intervalli accettabilità, ASHRAE 55

3.4 Confronto grafici: SCATs vs Tesi

Attraverso i valori di σ e k è possibile riprodurre un grafico simile a quello di Figura 1.12 contenuto all'interno dei risultati del progetto SCATs. Nel nostro caso i punti sperimentali presenti si limitano alle differenze di temperatura positive. Ciò è dovuto al fatto che i dati sono stati raccolti nella stagione estiva, dove in edifici ventilati naturalmente è più probabile che l'ambiente sia più caldo della condizione di comfort prescritta. Osservando le Figure 3.14 e 3.15 possiamo notare nel caso di Brisbane e Honolulu, dove gli R^2 sono più alti rispetto alla Grecia, come i punti siano meno dispersi nell'intorno della curva che descrive un gruppo che esprime voti che indicano una situazione di comfort. Osservando invece la Figura 3.13 si vede come i valori tendano a disperdersi mano a mano che ci si allontana dalla linea di comfort. Per via dei valori di σ più alti, i casi di Brisbane e Honolulu, in caso di differenza di temperatura nulla otterranno una percentuale massima di soddisfatti minore rispetto al caso della Grecia.

Attraverso questi grafici è possibile determinare gli stessi intervalli di accettabilità ottenuti attraverso il procedimento descritto nel capitolo precedente.

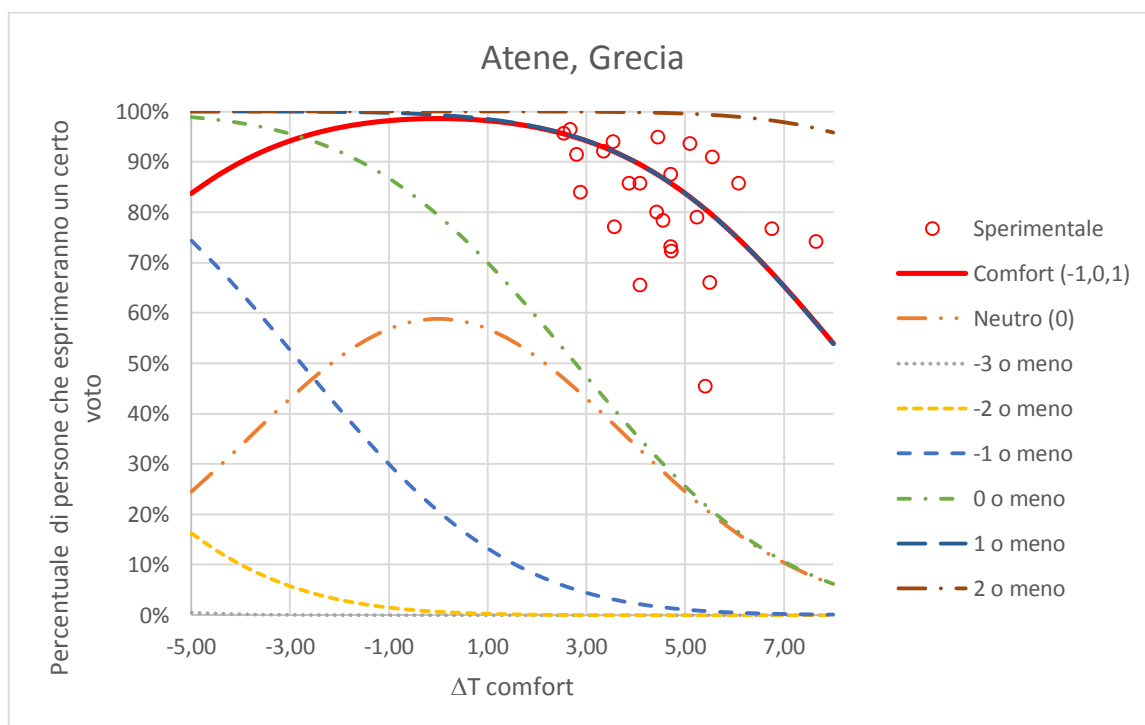


Figura 3.13 – Atene, Probit Lines per la percentuale di individui che esprimeranno un intervallo di voti.

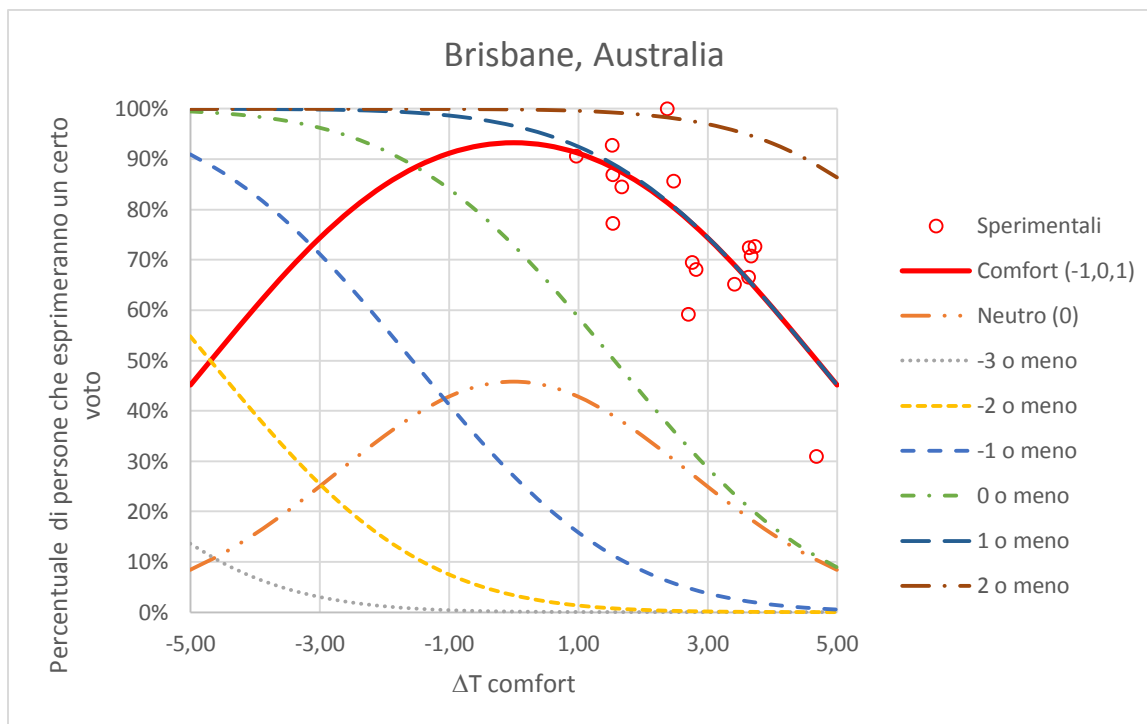


Figura 3.14 – Brisbane, Probit Lines per la percentuale di individui che esprimerebbero un intervallo di voti.

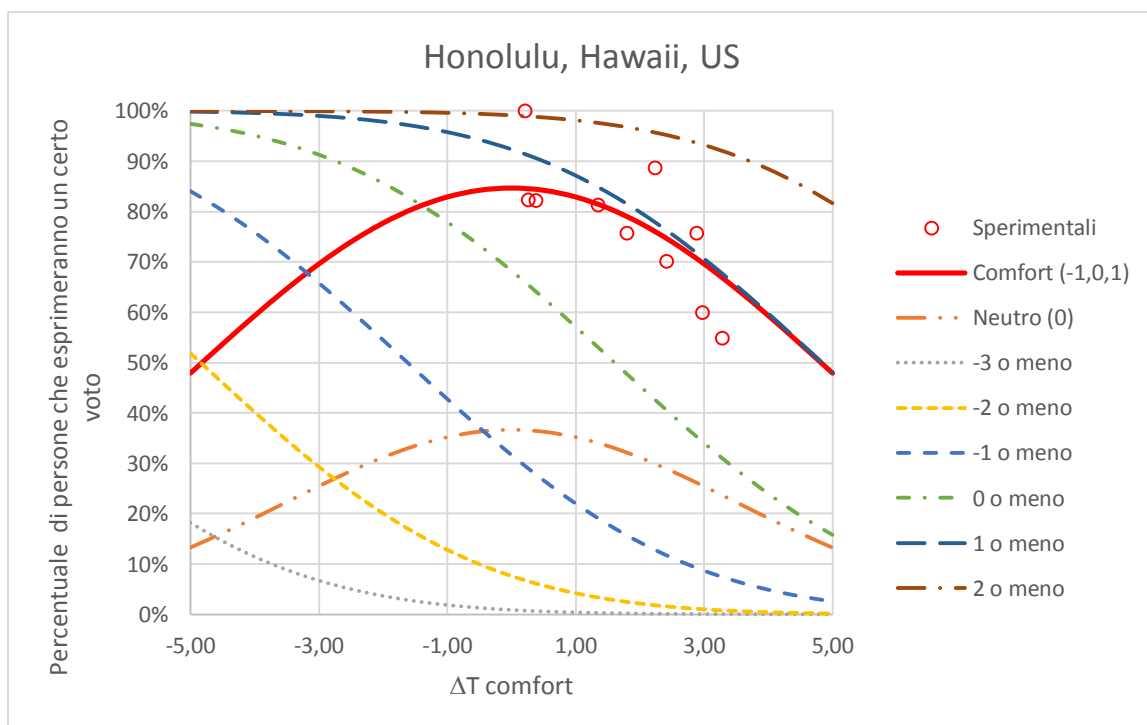


Figura 3.15 – Honolulu, Probit Lines per la percentuale di individui che esprimerebbero un intervallo di voti.

CAPITOLO 4 – CONCLUSIONI

Questo lavoro si è basato su database internazionali disponibili online. I risultati ottenuti in questo lavoro derivano dall'importante lavoro effettuato nell'ambito del progetto ASHRAE RP-884.

Sono stati elaborati un numero consistente, seppur limitato, di campioni ottenendo in alcuni casi dei dati con una discreta rilevanza statistica. Un limite riscontrato nell'ambito del lavoro è la necessità di avere campioni grandi e numerosi, dove gli individui condividano una condizione climatica il più simile possibile, riferiti a un ampio spettro di condizioni climatiche durante l'anno.

Il lavoro ha preso spunto da una rianalisi dell'esperienza di Fanger del 1970 attraverso la quale veniva determinata nella percezione del benessere termico la correlazione tra il voto medio previsto (PMV) e la percentuale di insoddisfazione prevista (PPD) tra gli occupanti.

La metodologia adottata in questa rianalisi permette di determinare la varianza della distribuzione (assunta normale) dei voti e tramite di essa la correlazione tra gli indici PMV e PPD.

L'obiettivo di questa tesi è stato: verificare quanto la metodologia di analisi proposta possa essere estesa ed applicata anche ad edifici ventilati naturalmente, dedurre i valori di σ (radice della varianza) e k (fattore di correlazione tra voto medio e scostamento dalla temperatura di comfort) e studiare l'impatto che tali valori hanno nella determinazione degli intervalli di accettabilità nell'intorno della temperatura di comfort.

I valori della radice della varianza ottenuti nell'ambito di questo lavoro differiscono da quello ottenuto a partire dai dati dell'esperienza di Fanger, valore attraverso cui è possibile ricostruire la correlazione tra PPD e PMV proposta da Fanger. Nello specifico, la gran parte dei valori di σ tende ad essere maggiore del valore 0,75 ottenuto dai dati di Fanger. Anche tra le diverse zone geografiche ci sono delle differenze tra i valori di σ .

Vista la discreta rilevanza statistica di alcuni modelli, si può affermare che non sembra quindi esistere un'univoca distribuzione dei voti nell'intorno del voto medio, ma questa può variare come visto nei casi selezionati, dove la zona geografica è differente. Ragion per cui uno studio più mirato potrebbe indagare quali siano i parametri che incidono nella determinazione di tale valore.

Anche per quanto riguarda il valore di k , tra i casi di edifici a ventilazione naturale studiati, si è osservata una certa variabilità.

Gli intervalli di accettabilità così ottenuti per le varie zone geografiche risultano tra loro significativamente diversi e sono stati confrontati con quelli previsti dalla norma ASHRAE 55. A livello quantitativo, facendo riferimento alle tre fasce di accettabilità/non-accettabilità (percentuale prevista di insoddisfatti < 10%, compresa tra 10% e 20%, > 20%) possiamo osservare come gli intervalli ASHRAE arrivino a collocare correttamente il 51 % di campioni studiati (37 su 72) mentre per gli intervalli ottenuti nell'ambito di questa analisi la corrispondenza sale al 68 % (49 su 72). Analogamente accorpando le fasce di accettabilità (PPD < 20%) il 71% dei casi (51 su 72) risulta ben collocato attraverso la previsione ASHRAE, percentuale che sale al 81 % dei campioni (58 su 72) adottando l'analisi proposta.

Si dimostra pertanto l'utilità dell'identificazione dei parametri σ e k nel dedurre le fasce di accettabilità e l'importanza di indagare i fattori che incidono nella loro variabilità, al fine di migliorare la previsione del livello di soddisfazione degli occupanti.

ALLEGATO A – DATABASE TRATTATI

I dati utilizzati in questa elaborazione provengono dal database internazionale utilizzato per il progetto ASHRAE RP-884. Il progetto è stato commissionato dalla ASHRAE al professor Richard de Dear dell'università di Sydney, al fine di ottenere dei modelli da includere negli standard progettuali.

Il professor Richard de Dear (1998) si è occupato di assemblare, ordinare e standardizzare i dati provenienti da altri studi effettuati in tutto il globo, per poi elaborarli e racchiudere i risultati nel report finale del progetto.

Per ogni database sono elencate le principali caratteristiche mostrate nel report del professor de Dear (1998) e sul sito dell'università di Sydney, dove il database è scaricabile gratuitamente.

Le informazioni di seguito riportate sono ottenute dal report del professor de Dear sullo studio del database RP-884 (1998) e dalle misurazioni effettuate al Politecnico di Milano nell'ambito del lavoro di tesi di Mercandelli e Provezza.

A.1 Database Milano, Italia

Ricercatori e classe di indagine

Adriana Angelotti, Nicholas Mercandelli e Daniel Provezza (Politecnico di Milano).

Questo è un esperimento di classe 2.

Pubblicazioni correlate

- Adriana Angelotti. 2010. “Subjective versus objective assessment of thermal comfort: preliminary considerations on an experimental campaign in university classrooms.” Proceedings of CLIMA 2010 10th REHVA world congress, 9-12/05/2010, Antalya, Turkey.
- Nicholas Mercandelli, Daniel Provezza, Rel. Adriana Angelotti, 2008. “Indagine sul benessere termoigrometrico estivo nelle aule del politecnico.” Tesi di laurea di I livello.

Località del progetto, clima e stagione

Milano è situata a ovest del bacino della Val Padana ed è caratterizzata da un clima temperato umido con estate calda. (Wikipedia, 2015). Le aule oggetto di studio si trovano nel Polo universitario del Politecnico di Milano (Sede Leonardo) sito in zona città studi.

Edifici del campione

Codice Edificio	Stagione e dimensione campione	Impianto	Tipologia
12 – V1	77	NV	Classi scolastiche
13 – T13	81	NV	Classi scolastiche
13 – T12	60	NV	Classi scolastiche
4 – I01	44	NV	Classi scolastiche
1 – B	41	HVAC	Classi scolastiche
11 – R1	21	HVAC	Classi scolastiche
11 – G1	28	HVAC	Classi scolastiche
11 – Q1	46	HVAC	Classi scolastiche
11 – U1	31	HVAC	Classi scolastiche

Strumentazione

I rilievi delle grandezze fisiche sono state effettuate con un analizzatore climatico di interni. Esso è provvisto di trasduttore con resistenza al platino per la temperatura dell'aria, anemometro a filo caldo per la velocità dell'aria, trasduttore di umidità e traduttore di asimmetria radiante.

Questionario

Il questionario conteneva domande riguardanti il sesso l'età e la posizione nell'aula. La sensazione termica era valutata attraverso una scala semantica a sette punti, allo stesso modo la preferenza termica. Il vestiario veniva valutato con un menù a scelta multipla e il metabolismo attraverso una domanda sul livello di concentrazione al momento del questionario.

A.2 Database Brisbane e Melbourne, Australia

Ricercatori e classe di indagine

Dr. Richard de Dear e Andris Auliciems (University of Queensland).

Questo è un esperimento di classe 2.

Pubblicazioni correlate

- de Dear, R. J. and A. Auliciems (1985) "Validation of the Predicted Mean Vote model of thermal comfort in six Australian field studies." ASHRAE Trans., V. 91(2), pp. 452- 468.
- de Dear, R. J. and A. Auliciems (1985). Thermal neutrality and acceptability in six Australian field studies, Clima 2000, Indoor Climate (P.O. Fanger, editor), Vol. 4:103-108. VVS Kongress-VVS Messe, Copenhagen.
- de Dear, R. J. (1985) Perceptual and adaptational bases for the management of indoor climate. (St Lucia Queensland: University of Queensland PhD thesis).
- de Dear, R.J. and A. Auliciems (1986). Air conditioning in Australia II: User attitudes. Arch. Science Review, vol. 31, pp. 19-27.

Località del progetto, clima

Il progetto è stato condotto in tre grandi città, poste in diverse zone climatiche dell'Australia, Darwin, Melbourne e Brisbane. Di queste tre città, solo due sono state studiate ai fini del lavoro di tesi, Melbourne (clima temperato fresco) e Brisbane (clima umido subtropicale).

Edifici del campione

Codice Edificio	Città	Dimensione campione	Impianto	Tipologia
1	Brisbane	157	NV	Uffici
2	Brisbane	124	NV	Uffici
3	Brisbane	69	NV	Uffici
4	Brisbane	211	NV	Uffici
5	Brisbane	49	NV	Uffici
1	Brisbane	195	HVAC	Uffici
2	Brisbane	102	HVAC	Uffici
3	Brisbane	69	HVAC	Uffici
4	Brisbane	114	HVAC	Uffici
5	Brisbane	84	HVAC	Uffici
1	Melbourne	126	NV	Uffici
2	Melbourne	411	NV	Uffici
3	Melbourne	16	NV	Uffici

Strumentazione

Le temperature di bulbo secco e umido sono state misurate con un psicrometro ad aspirazione Assman. La globo temperatura è stata registrata utilizzando un termometro a mercurio Zeal inserito al centro di una pallina da ping pong da 40mm pitturata di nero. La velocità dell'aria era misurata a tre altezze, ma veniva registrata solo la media. L'anemometro era Kurz 441M con accuratezza 0.03 m s⁻¹.

Questionario

La sensazione termica era valutata attraverso la scala ASHRAE a sette punti. La preferenza termica era anch'essa valutata attraverso una scala simmetrica a 7 punti. L'attività metabolica era stimata attraverso una media dell'attività compiuta nell'ultima ora, ottenuta attraverso un menù a crocette.

A.3 Database Peshawar, Pakistan

Ricercatori e classe di indagine

Nicol J. F., G. N. Jami, O. Sykes, S. Roaf, M. Humpherys e M. Hancock (Scuola di architettura, Oxford Brooks University).

Questo è un esperimento di classe 3.

Pubblicazioni correlate

- Nicol, J. F., G. N. Jami, O. Sykes, M. Humpherys, S. Roaf e M. Hancock. (1994) Thermal Comfort in Pakistan. Oxford Brookes University.

Località del progetto, clima

Peshawar è la capitale della provincia nord occidentale e si trova a 359m dal mare. Le temperature variano mediamente tra 17°C e 4°C a gennaio e tra i 41°C e 25°C a giugno. La zona climatica per Peshawar è semidesertica.

Edifici del campione

Codice Edificio	Città	Dimensione campione	Impianto	Tipologia
3	Peshawar	556	NV	Residenziale e uffici

Strumentazione

L'umidità relativa e la temperatura dell'aria sono state misurate con una sonda Hanna instrument. Essa consisteva in una guaina in alluminio lucidato di 19mm di diametro, contenente all'interno della punta ventilata un sensore di umidità e un termistore. La globo temperatura era misurata attraverso una pallina da ping pong con appropriata emissività collegata ad un sensore. Tutte le variabili erano misurate all'altezza della cintola.

Questionario

Il questionario valutava le condizioni al momento delle misurazioni fisiche. La distanza tra le misurazioni e il questionario non era mai più lungo di 10 minuti. Il comfort era valutato attraverso la scala semantica di Bredford a sette punti. Altri parametri ambientali inclusi erano il movimento dell'aria e l'umidità della pelle. L'attività metabolica era acquisita al momento del questionario. Il vestiario era stimato secondo le linee guida della ISO 7730, utilizzando un elenco a scelta multipla.

A.4 Database Atene, Grecia

Ricercatori e classe di indagine

N. Baker e M. Standeven, The Martin Centre for Architecture and Urban Studies, University of Cambridge, UK.

Questo è un esperimento di classe 2.

Pubblicazioni correlate

- Baker, N and M. Standeven. (1995) "A Behavioural Approach to Thermal Comfort Assessment in Naturally Ventilated Buildings". Proceedings from CIBSE National Conference, Ch 76-84.
- Baker, N. and M. Standeven. (1994) Comfort criteria for passively cooled buildings. A PASCOOL task. Renewable Energy. V 5. n 5-8 Aug 1994. p 977-984.

Località del progetto, clima

L'esperimento è stato fatto ad Atene, in Grecia durante la stagione estiva. Atene possiede un clima mediterraneo.

Edifici del campione

Codice Edificio	Città	Dimensione campione	Impianto	Tipologia
1	Atene	409	NV	Residenziale
2	Atene	276	NV	Residenziale
3	Atene	443	NV	Residenziale
4	Atene	176	NV	Residenziale
5	Atene	187	NV	Residenziale
6	Atene	135	NV	Residenziale

Strumentazione

Gli strumenti per le misurazioni interne includevano: un termistore per la temperatura dell'aria, un anemometro a filo caldo multidirezionale, un igrometro a stato solido per l'umidità e un globo termometro con una pallina da ping pong da 38mm di diametro per la globo temperatura. Le misurazioni locali erano effettuate attraverso l'uso di cuffie, simili a quelle di un Walkman. Un sistema di acquisizione dati registrava le misurazioni, anche nel caso in cui il soggetto fosse uscito dalla stanza.

Questionario

Il questionario veniva compilato nel momento in cui venivano registrate le misurazioni fisiche. La sensazione termica veniva valutata con la scala ASHRAE a sette punti. Venivano richieste anche la preferenza termica, l'accettabilità dell'ambiente e l'attività metabolica. Il vestiario era valutato attraverso la lista a scelta multipla della ISO 7730. Erano registrate risposte sulle possibilità adattive fornite dall'ambiente.

A.5 Database San Francisco Bay Area, Stati Uniti

Ricercatori e classe di indagine

Gail Schiller, Edward Arens, Fred Bauman, Charles Benton, Marc Fountain e Tammy Doherty (CEDR at University of California, Berkeley).

Questo è un esperimento di classe 1.

Pubblicazioni correlate

- Schiller, G. E., E. Arens, F. Bauman, C. Benton, M Fountain and T. Doherty. (1988) A Field Study of Thermal Environments and Comfort in Office Buildings: Final Report–ASHRAE 462. (CEDR:UC Berkeley).
- Schiller, G. E. (1990) A comparison of measured and predicted comfort in office buildings. ASHRAE Transactions, 96(1)

Località del progetto, clima e stagione

RP-462 è stato condotto in cinque località attorno alla baia di San Francisco. Tra queste ci sono Berkely, San Ramon, Palo Alto, San Francisco e Walnut Creek. Tutte e cinque le località sono in una zona a clima mediterraneo, ma ognuna ha un clima locale differente, per via delle loro posizioni all'interno della baia. L'esperimento è stato svolto sia nella stagione estiva che in quella invernale. Ai fini della nostra elaborazione sono stati selezionati solo gli edifici ventilati naturalmente durante la stagione estiva.

Edifici del campione

Codice Edificio	Città	Dimensione campione	Impianto	Tipologia
1	Berkeley	122	NV	Uffici
5	San Francisco	115	NV	Industriale
6	San Francisco	123	NV	Uffici

Strumentazione

La temperature dell'aria, velocità dell'aria, umidità, e globo temperature erano misurate a diverse altezze attraverso un carrello mobile. La temperatura dell'aria erano misurate attraverso una termocoppia in platino schermata. La velocità dell'aria era misurata con un anemometro multidirezionale. La globo temperatura era misurata attraverso una termocoppia a T inserita in una pallina da ping pong da 38mm di diametro dipinta di grigio.

Questionario

Il questionario era effettuato nel momento in cui venivano registrate le misurazione fisiche.

Per la sensazione termica è stata usata la scala ASHRAE a sette punti. Per la preferenza termica è stata usata la scal di McIntyre. L'attività metabolica e il vestiario sono stati stimati attraverso lo standard ASHRAE 55-81 (1981). Era presente anche una parte facoltativa dove venivano richieste informazioni sull'utente e sulla tipologia dell'ambiente in cui lavorava.

A.6 Database Regno unito, Merseyside, Zona di Liverpool.

Ricercatori e classe di indagine

Ruth N. Williams (The Building Services Research and Information Association, Berkshire, UK).

Questo è un esperimento di classe 2.

Pubblicazioni correlate

- Williams, R. N. (1995). A field investigation of thermal comfort environmental satisfaction and perceived control levels in UK office buildings. *Healthy Buildings*. Vol. 3 pp. 1181-1186.
- Williams, R. (1996) "Predicting environmental dissatisfaction in UK offices, "CIBSE/ASHRAE Joint National Conference, Harrogate UK, V.II, pp.167-178.

Località del progetto, clima

Il progetto è condotto attraverso tre città del regno unito, Liverpool, St Helens e Chester. Tutte e tre nel raggio di 15 km e con clima temperato fresco. Lo studio si è svolto nei mesi estivi e invernali.

Edifici del campione

Codice Edificio	Località	Dimensione campione	Impianto	Tipologia
1	Liverpool	19	NV	Uffici
2	St Helens	8	NV	Uffici
3	St Helens	140	NV	Uffici

Strumentazione

La temperatura dell'aria era misurata con termistori, la velocità dell'aria con anemometri a filo caldo multidirezionali. Attraverso una pallina da ping pong da 38 mm di diametro e un sensore di umidità sono state misurate la temperatura media radiante e l'umidità relativa. La

velocità dell'aria e l'umidità erano misurate all'altezza della cintola. La temperatura dell'aria e quella media radiante erano misurate a tre altezze: caviglie, fianchi e testa.

Questionario

Il questionario era basato su condizioni al momento della misura e altre tipiche dell'edificio. La sensazione termica era valutata con la scala a sette punti ASHRAE. Il comfort termico era valutato con la scala a sette punti di Bedford. Era chiesta l'accettabilità termica, ma non la preferenza termica. L'attività metabolica era stimata con domande riguardo alla postura tenuta durante il lavoro. Il vestiario era annotato attraverso un elenco con caselle spuntabili. Le possibilità adattive e il controllo percepito dell'ambiente erano annotati anch'essi.

A.7 Database Singapore, Repubblica di Singapore

Ricercatori e classe di indagine

R. J. de Dear, K. G. Leow e S. C. Foo (National University of Singapore).

Questo è un esperimento di classe 2.

Pubblicazioni correlate

- de Dear, R. J., Leow, K. G. and S. C. Foo (1991) "Thermal comfort in the humid tropics: Field experiments in air conditioned and naturally ventilated buildings in Singapore". International Journal of Biometeorology, Vol. 34, pp. 259-265.
- de Dear, R.J., Leow, K. G. and A. Ameen (1991) "Thermal comfort in the equatorial climatic zone – Part II: Climate chamber experiments on thermal acceptability in Singapore". ASHRAE Transactions, Vol. 97(1), pp. 880-886.

Località del progetto, clima e stagione

L'esperimento è stato condotto nella stagione estiva e invernale a Singapore dove il clima è equatoriale umido.

Edifici del campione

Codice Edificio	Città	Dimensione campione	Impianto	Tipologia
1	Singapore	333	HVAC	Uffici
2	Singapore	583	NV	Residenziale

Strumentazione

Un anemometro a filo caldo è stato utilizzato per la velocità dell'aria. L'umidità relativa è stata misurata con uno psicrometro ad aspirazione e la temperatura dell'aria con un termometro a mercurio. Per la globo temperatura è stata usata una sfera di 15cm di rame.

Questionario

La sensazione termica è stata valutata con la scala ASHRAE a 7 punti. Venivano registrate l'attività metabolica e il vestiario, quest'ultimo attraverso lo standard ISO 7730 del 1984.

A.8 Database Hawaii, Honolulu

Ricercatori e classe di indagine

Alison G. Kwok (University of California, Berkeley. Berkeley California, USA).

Questo è un esperimento di classe 2.

Pubblicazioni correlate

- Kwok, A.G. "Thermal Comfort in Tropical Classrooms." ASHRAE Trans., V. 104 (1), 1998.
- Kwok, Alison G. (1997) Thermal Comfort in Naturally Ventilated and Air-conditioned Classrooms in the Tropics. (UC Berkeley Ph.D. Thesis).
- Kwok, Alison G., "Air movement and thermal comfort in tropical schools," Proceedings of 22nd National Passive Solar Conference, Washington, DC, April 25-30, 1997, p. 25-31.

Località del progetto, clima

Il progetto è localizzato ad Honolulu, nelle Hawaii. Le Hawaii giacciono in una zona tropicale, e grazie alla loro geografia, come altri gruppi di isole del pacifico, sono sottoposte a diverse condizioni climatiche. Esistono due stagioni: “estate, compresa tra Maggio ed Ottobre, dove il clima è secco con persistenti venti alisei; e “inverno”, compreso tra novembre e Aprile. Le Hawaii sono classificate da un clima caldo e umido. Il progetto si è svolto nella calda stagione estiva e in quella fresca invernale.

Edifici del campione

Codice Edificio	Città	Dimensione campione	Impianto	Tipologia
A	Honolulu	34	NV	Classi scolastiche
C	Honolulu	20	NV	Classi scolastiche
D	Honolulu	540	NV	Classi scolastiche
E1	Honolulu	540	NV	Classi scolastiche
E2	Honolulu	95	HVAC	Classi scolastiche
F	Honolulu	608	HVAC	Classi scolastiche

Strumentazione

La strumentazione era posta su un carrello da laboratorio che veniva trasportato tra le varie classi e posto nel mezzo di ognuna di esse. Gli strumenti distavano 1,1 m dal suolo, nella zona dove erano seduti gli occupanti della classe. La temperatura dell'aria, quella radiante e l'umidità relativa erano misurate con termistori calibrati. La misura della temperatura radiante era basata su una pallina da ping pong da 38 mm. Il sistema usava una sonda Campbell Scientific per misurare temperatura e umidità. La velocità dell'aria era misurata con anemometro omnidirezionale della TSI. Tutti i sensori erano collegati ad un sistema di acquisizione dati Campbell Scientific 21X. I dati venivano giornalmente trasferiti su un laptop.

Questionario

Tutti i soggetti, prima di rispondere al questionario, rimanevano seduti nelle classi per un minimo di 15 minuti. Il questionario copriva sette sezioni: Comfort personale, qualità dell'aria interna, condizioni acustiche, vestiario, informazioni generali e demografiche. L'attività metabolica media è stata stimata uguale per tutti.

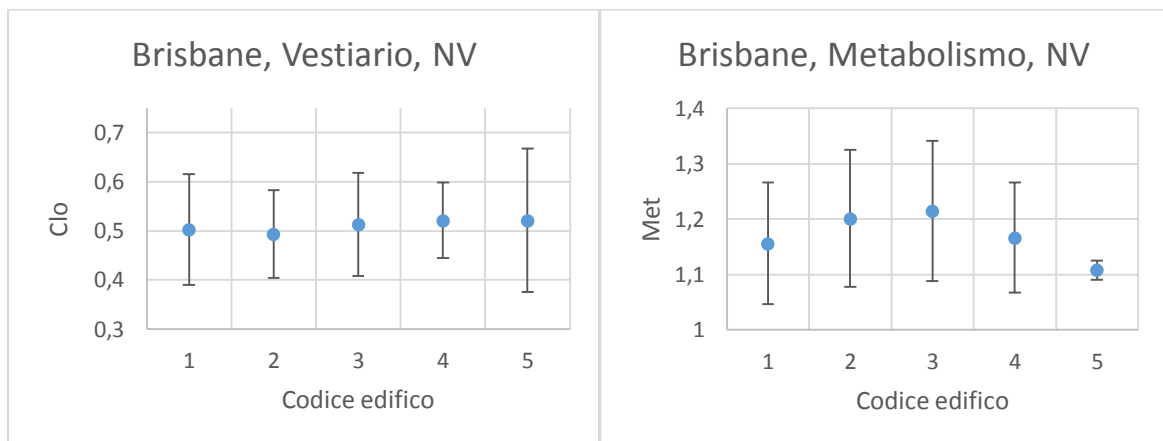
ALLEGATO B – GRAFICI

Il seguente allegato contiene i grafici ottenuti nell'ambito dell'elaborazione dei database.

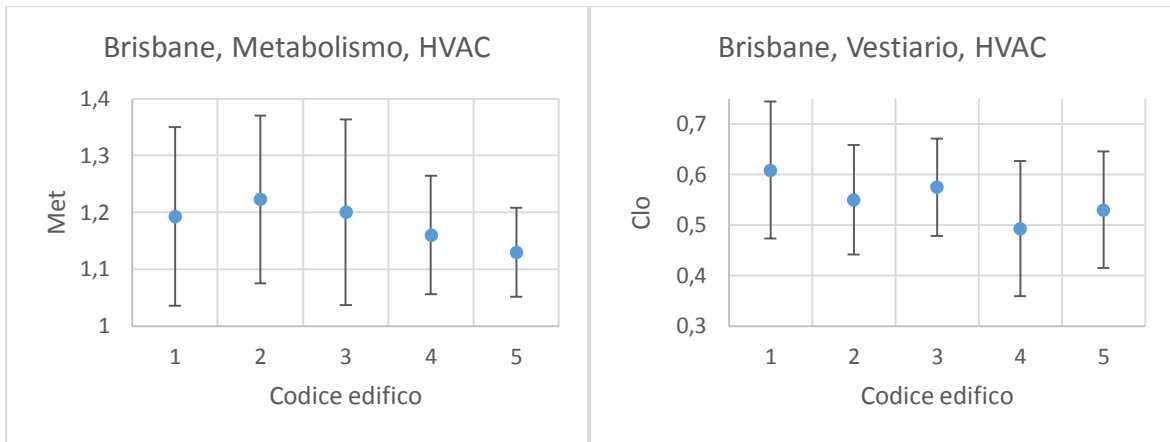
B.1 Compatibilità di metabolismo e vestiario in edifici della stessa zona geografica.

I seguenti grafici mostrano il valore medio di MET o CLO e la loro deviazione standard. Per ogni grafico sono contenuti i dati degli edifici di una zona geografica. Non sempre è stato necessario effettuare l'analisi del metabolismo e del vestiario. Quando l'edificio per una zona geografica era solo uno, oppure era assegnato un valore per tutti i questionati l'elaborazione non era effettuata.

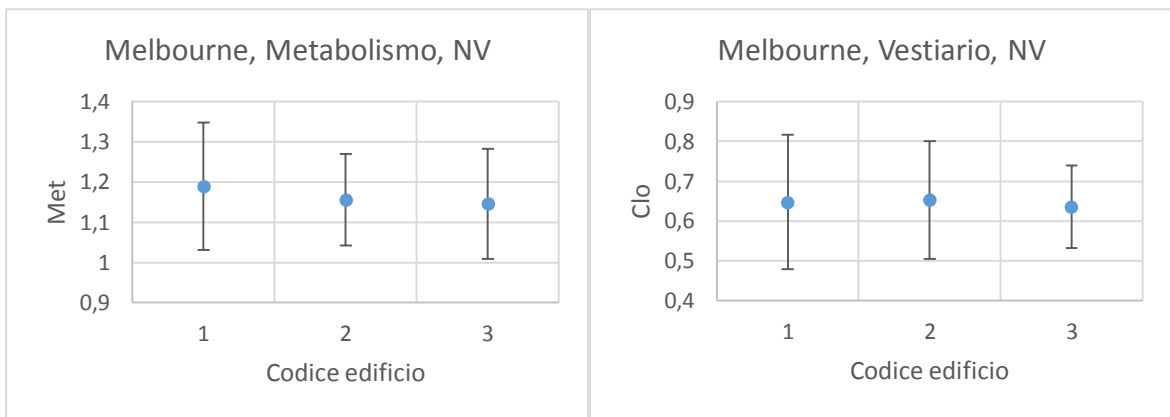
Brisbane, Australia NV



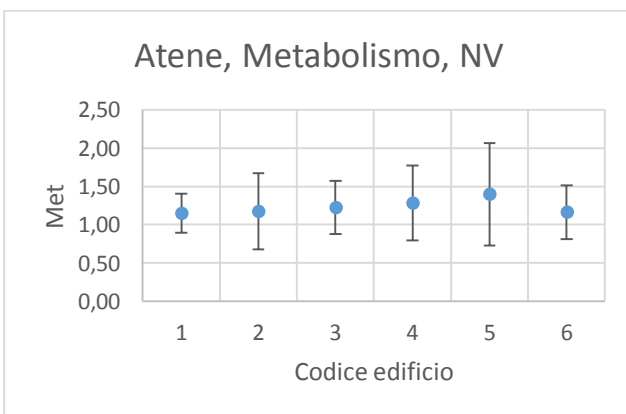
Brisbane, Australia HVAC



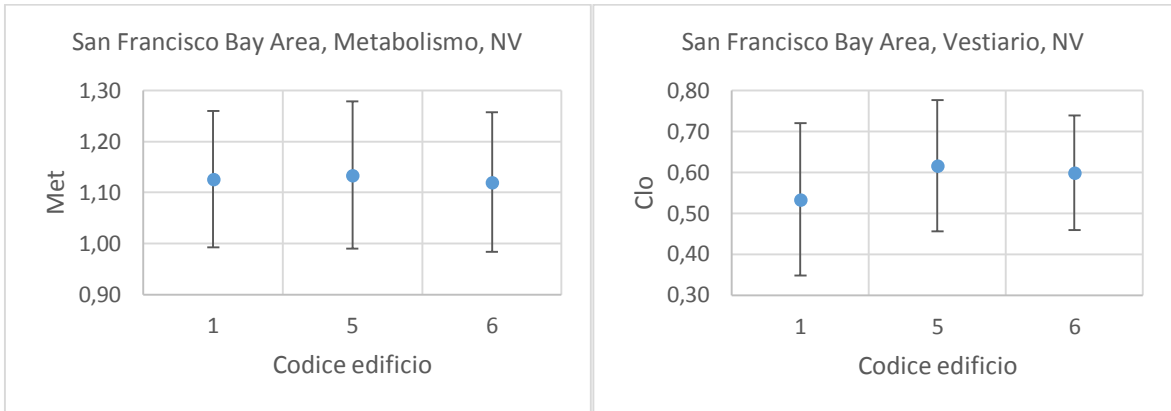
Melbourne, Australia NV



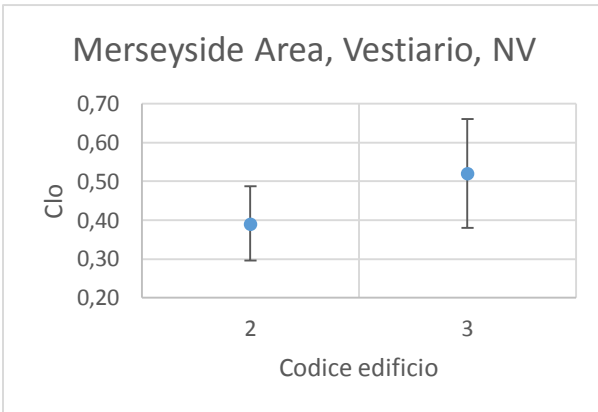
Atene, Grecia NV



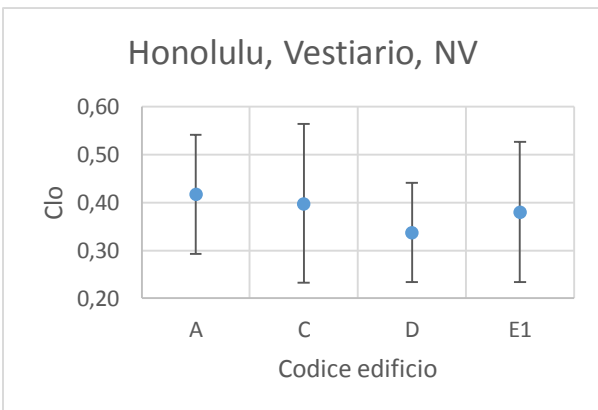
San Francisco Bay Area, Stati Uniti NV



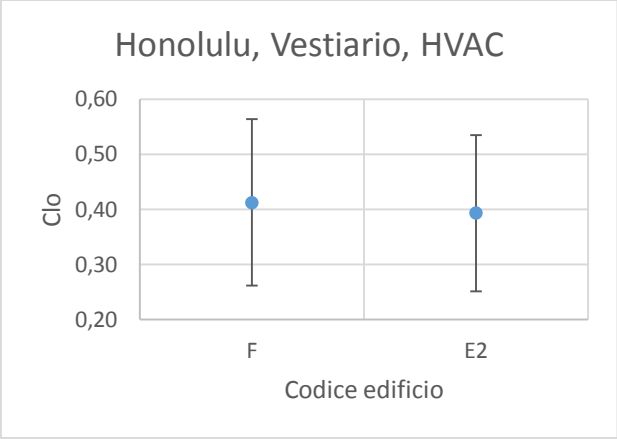
Merseyside Area, Regno Unito NV



Honolulu, Stati Uniti NV



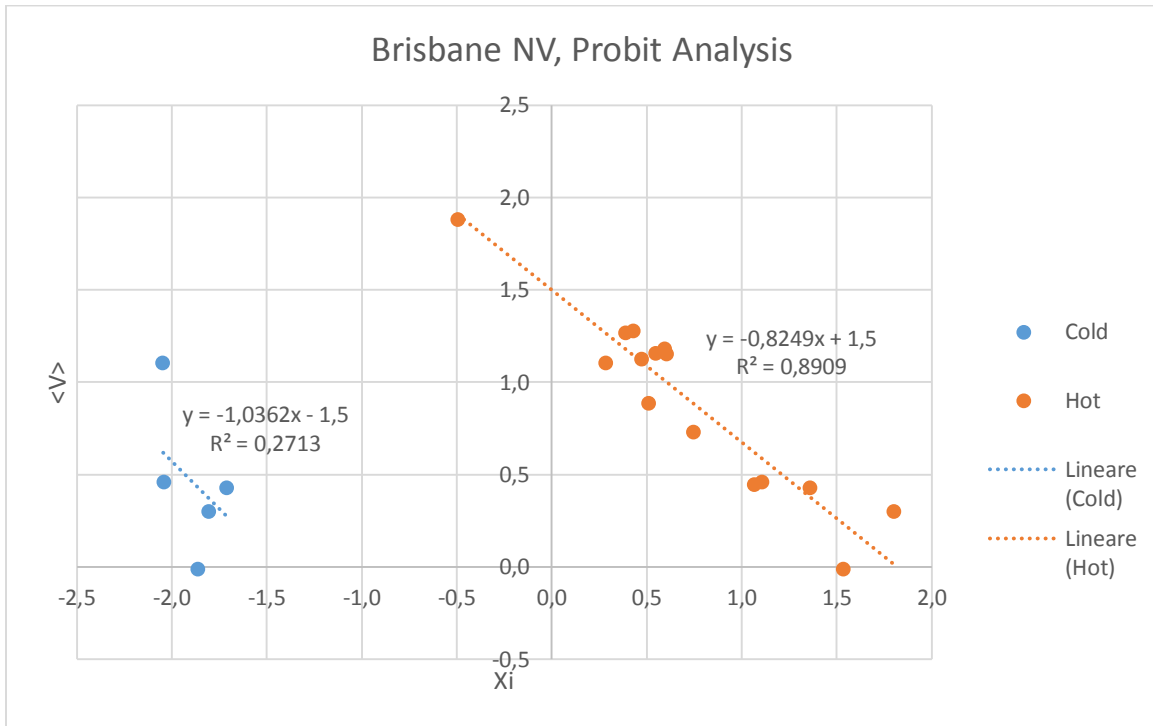
Honolulu, Stati Uniti HVAC



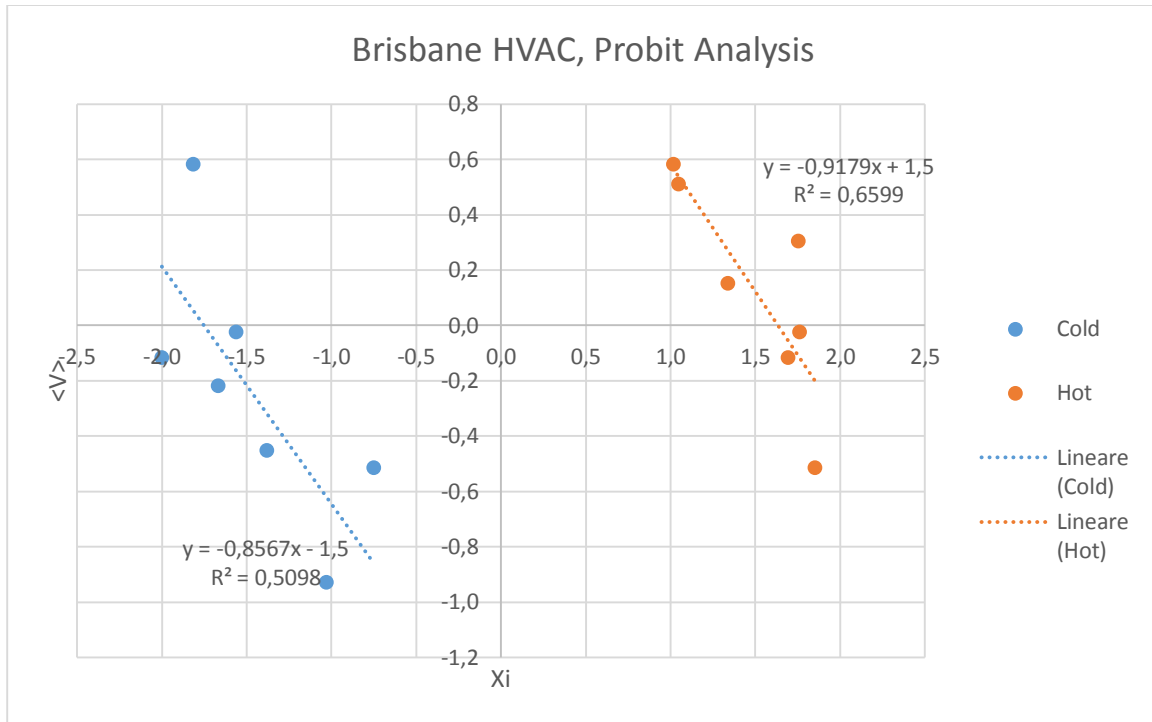
B.2 Grafici Probit Analysis

I seguenti grafici mostrano il risultato grafico della probit analysis.

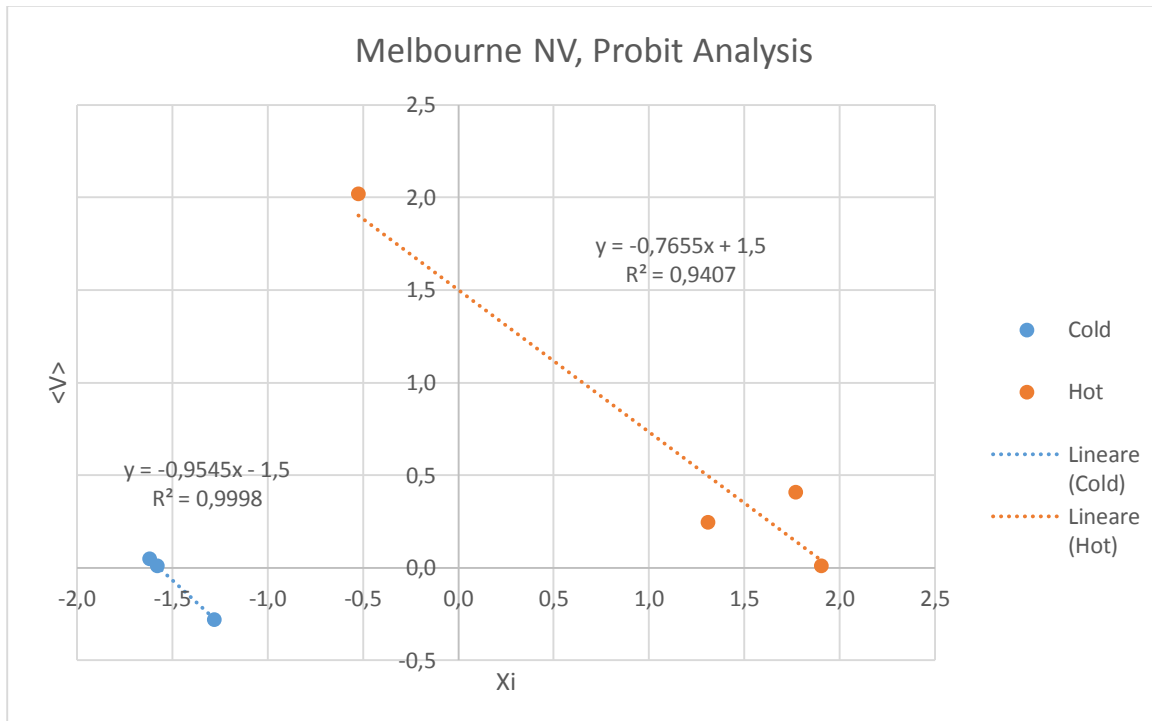
Brisbane NV, Australia



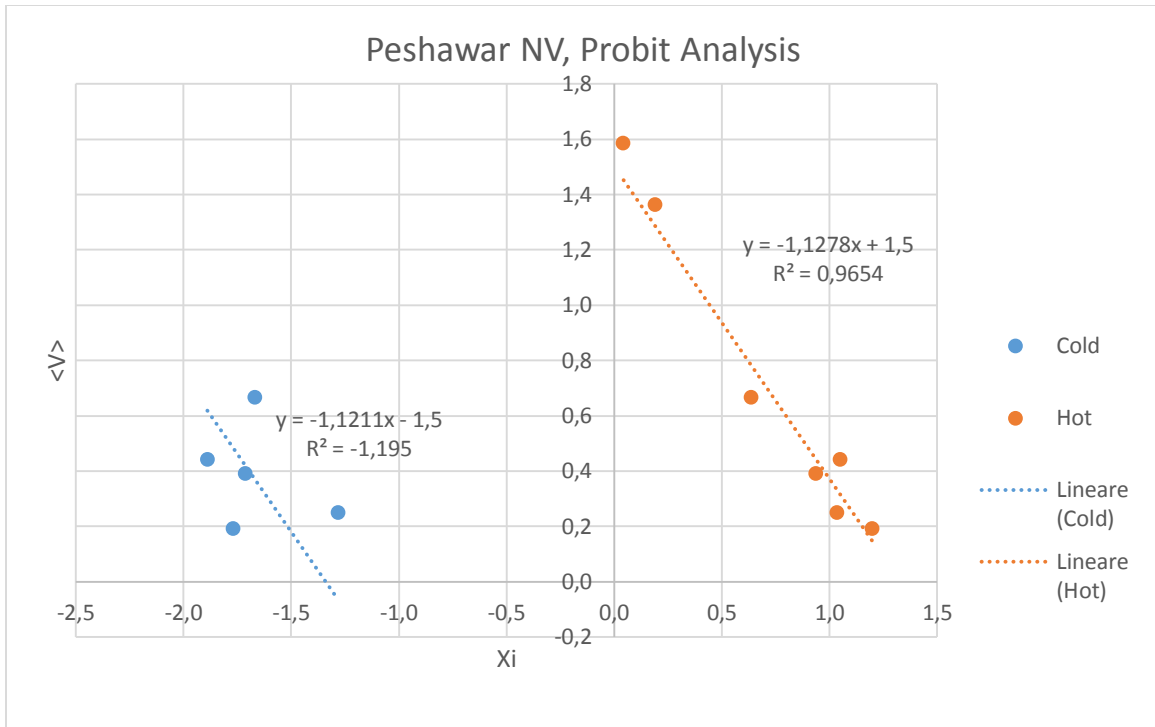
Brisbane HVAC, Australia



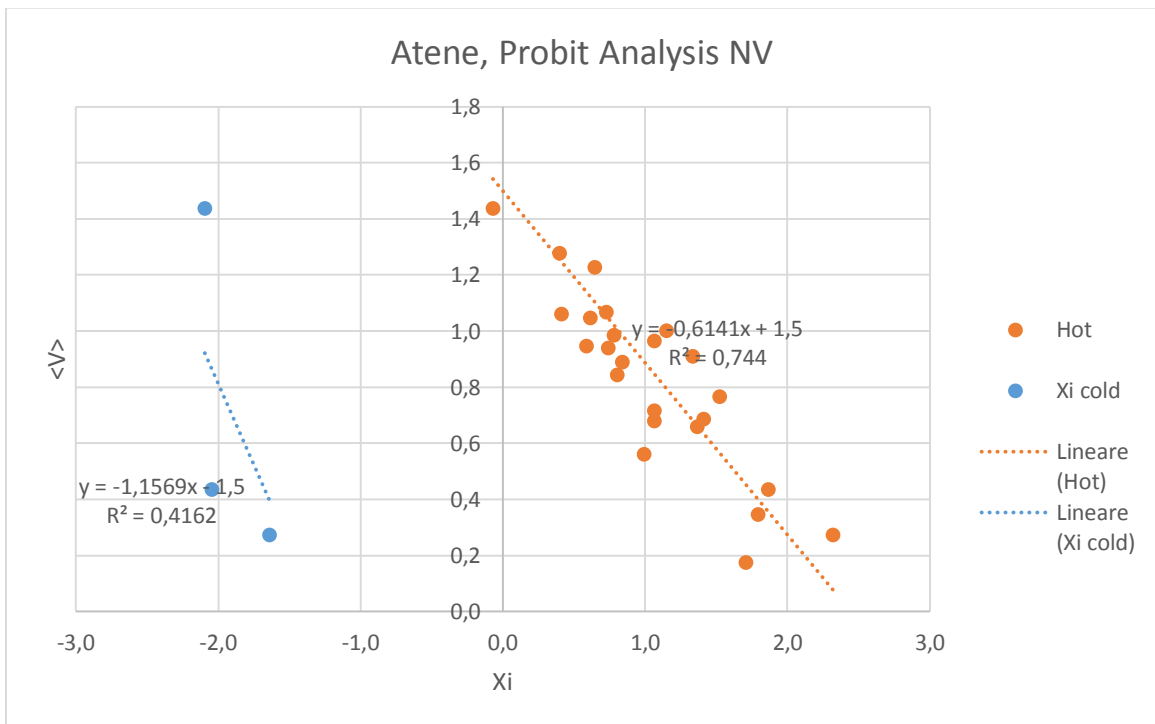
Melbourne NV, Australia



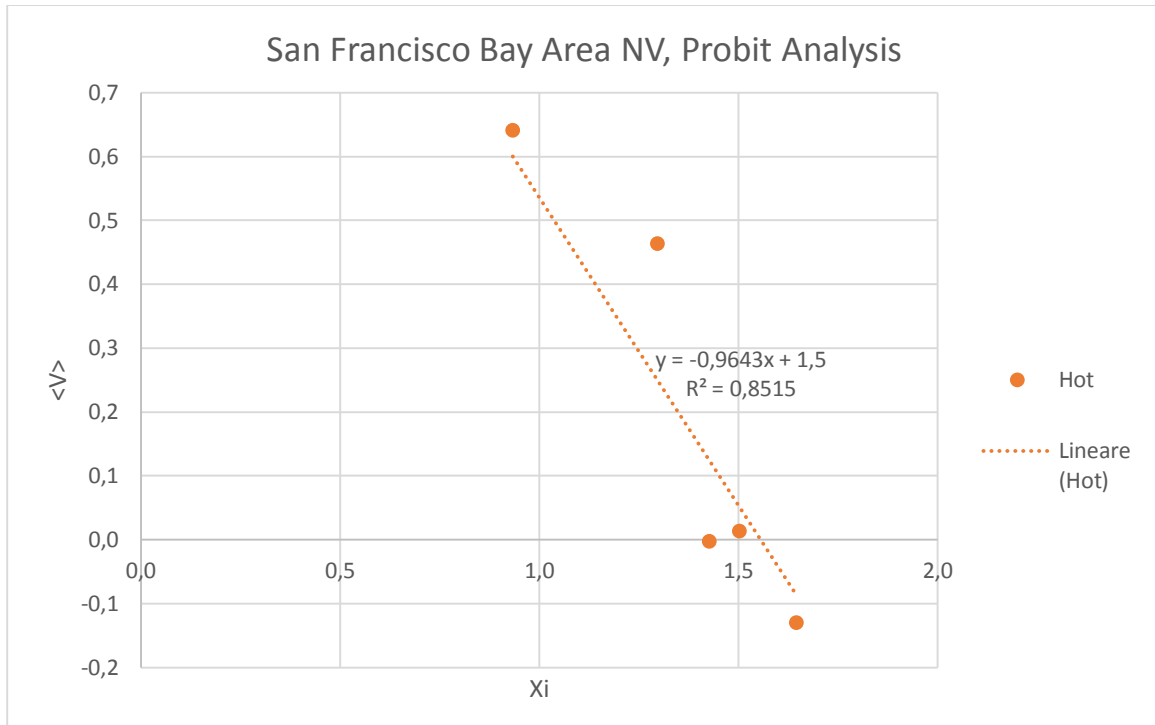
Peshawar NV, Pakistan



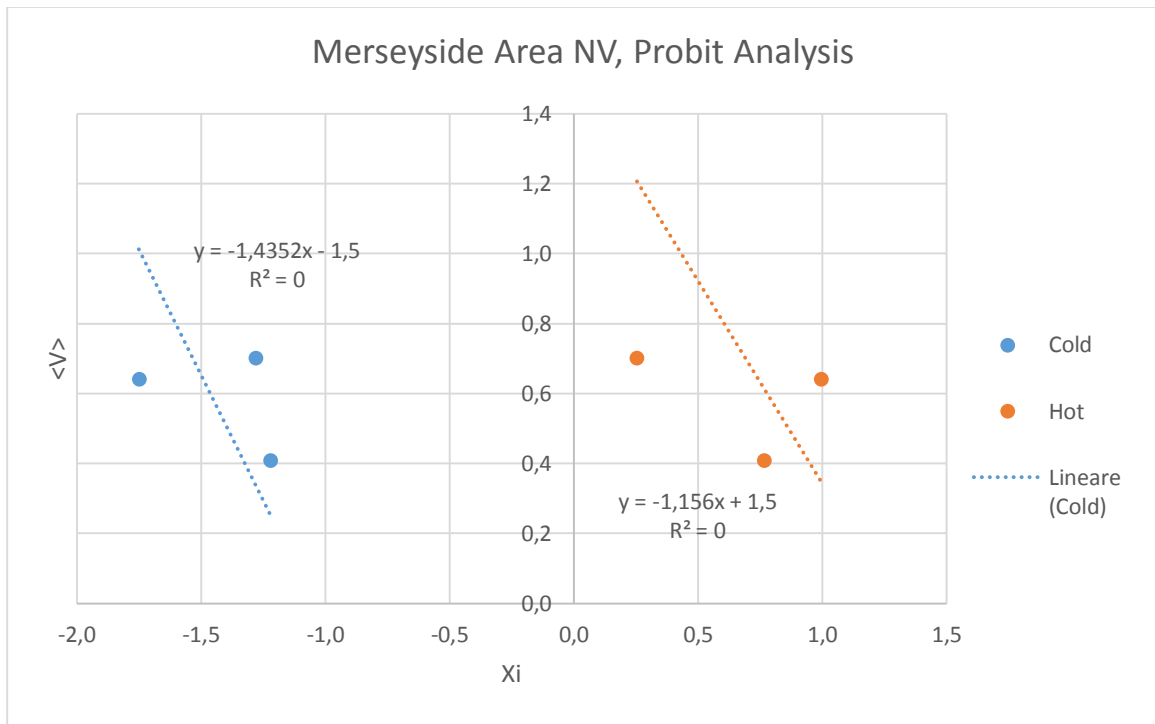
Atene NV, Grecia



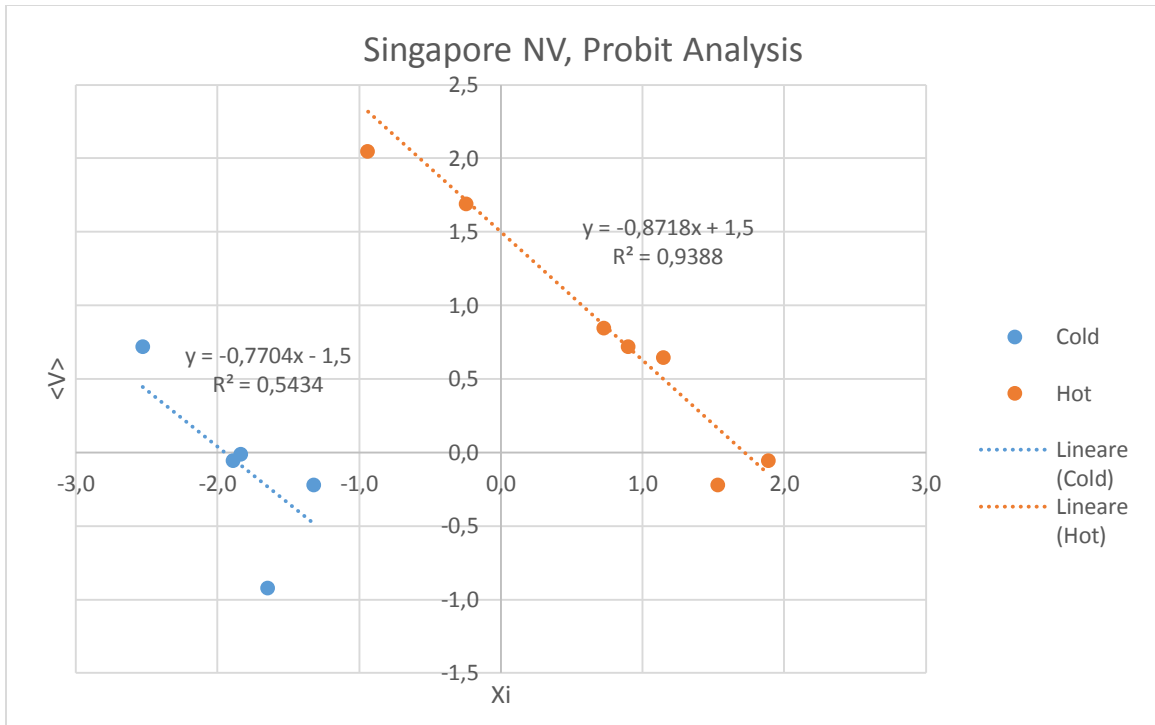
San Francisco Bay Area NV, Stati Uniti



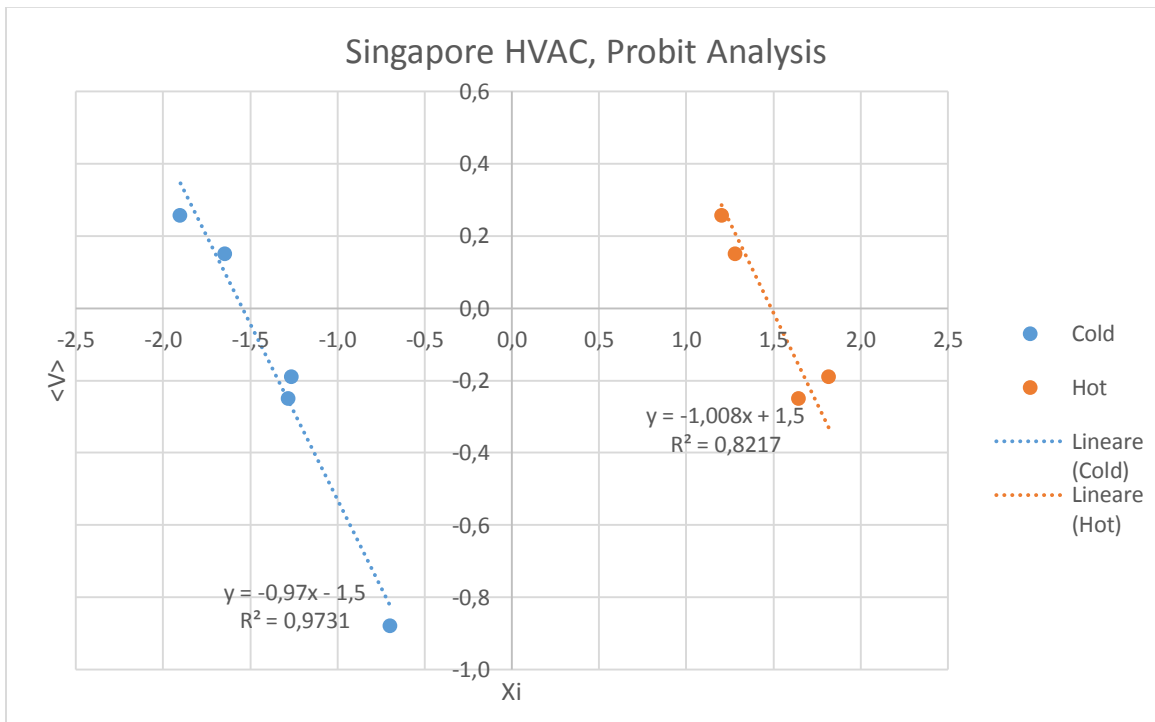
Merseyside Area NV, Regno Unito



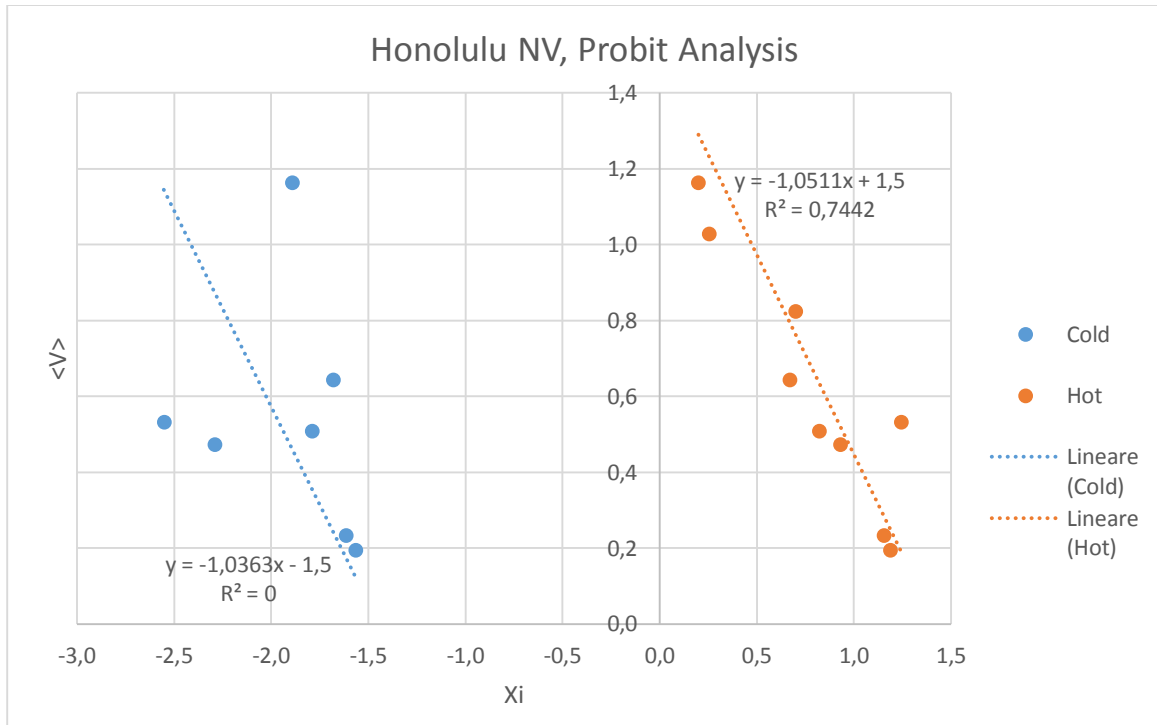
Singapore NV, Repubblica di Singapore



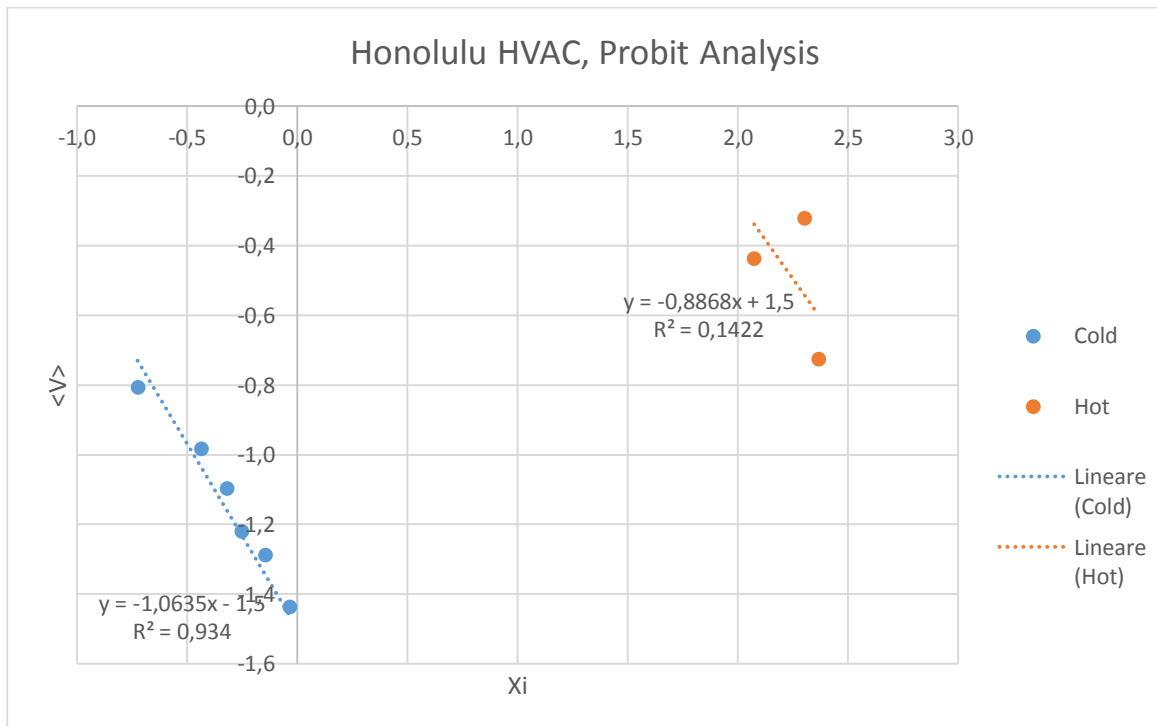
Singapore HVAC, Repubblica di Singapore



Honolulu NV, Stati Uniti



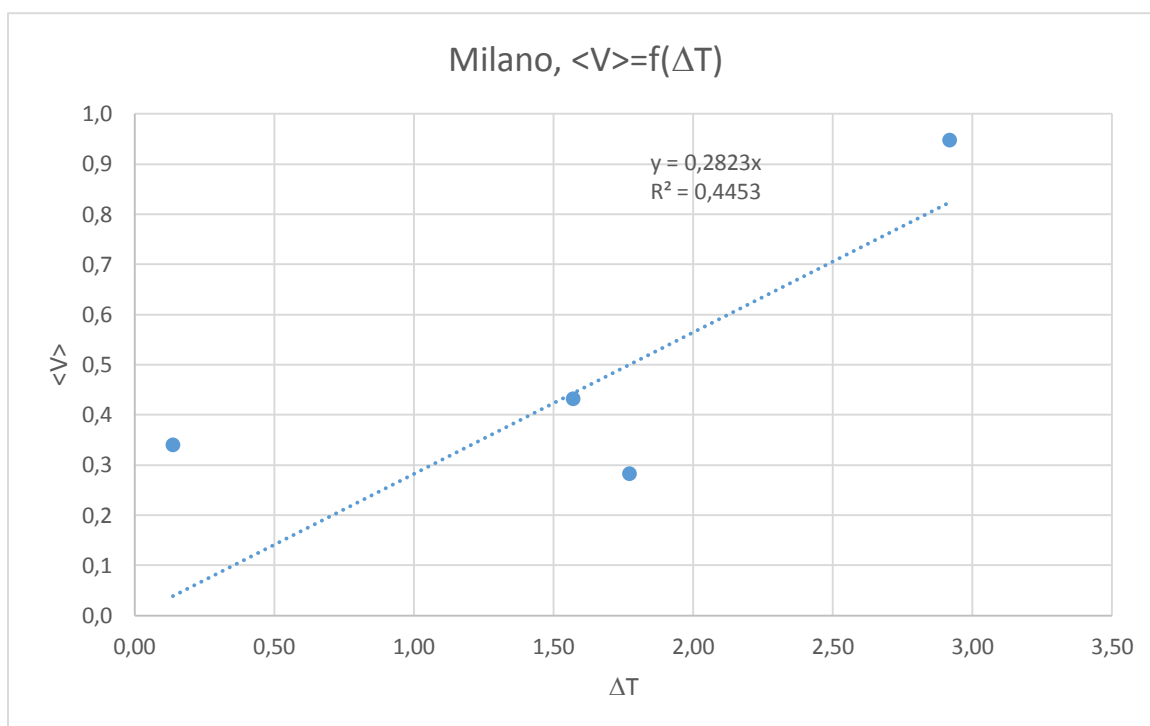
Honolulu HVAC, Stati Uniti



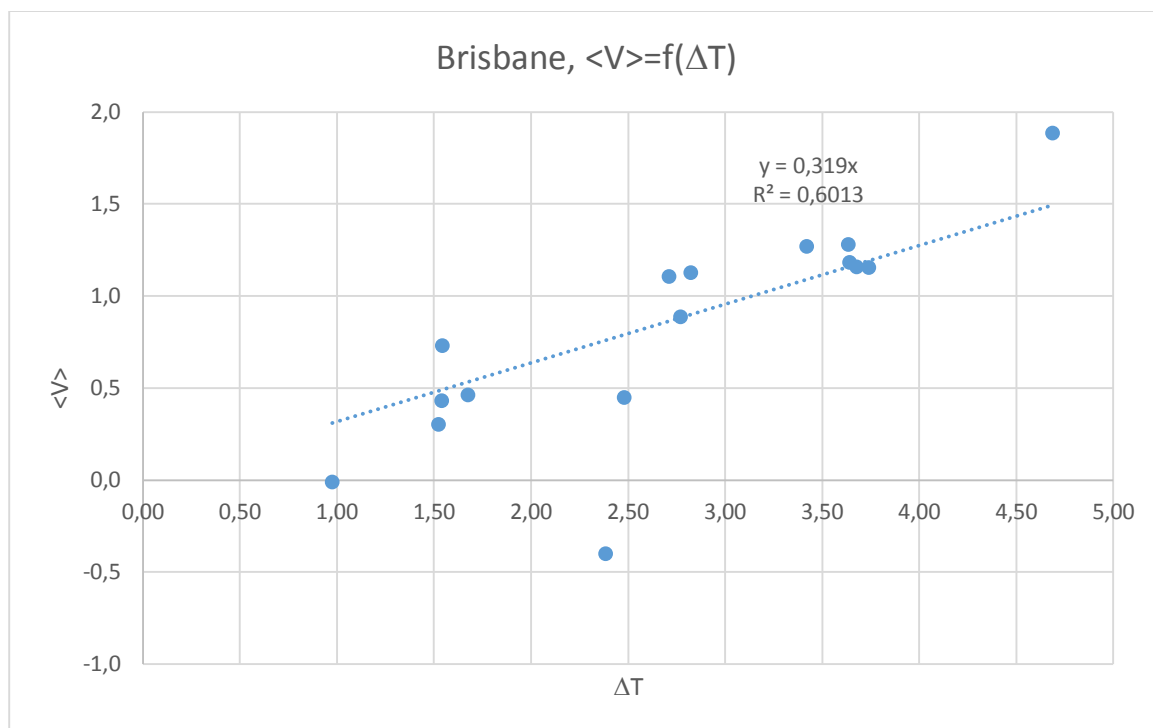
B.3 Grafici per correlazione tra voto medio e scostamento tra temperatura operante e temperatura di comfort.

I seguenti grafici legano il voto medio allo scostamento tra temperatura operante e temperatura di comfort.

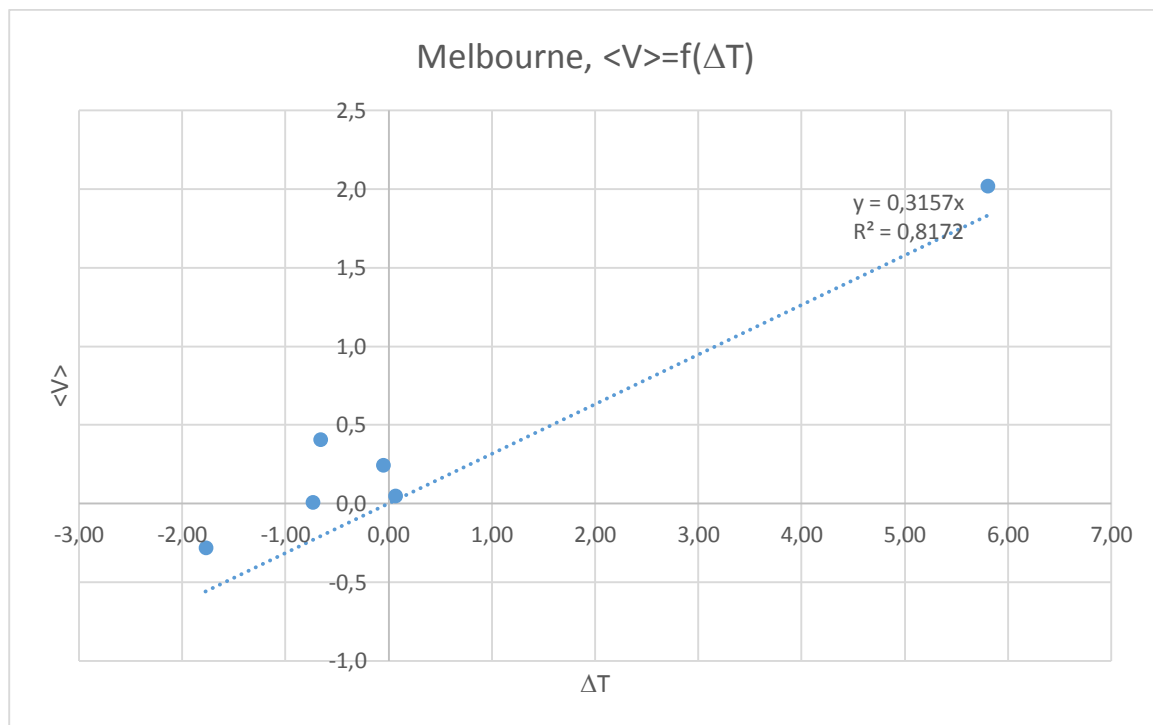
Milano, Italia



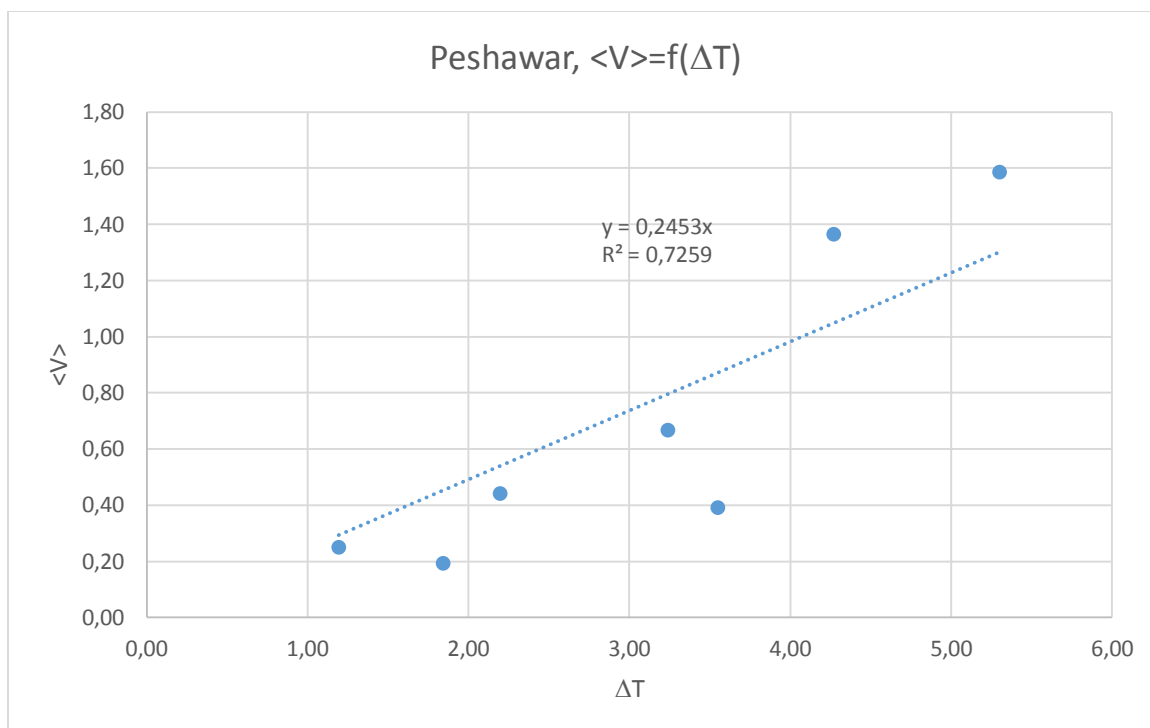
Brisbane, Australia



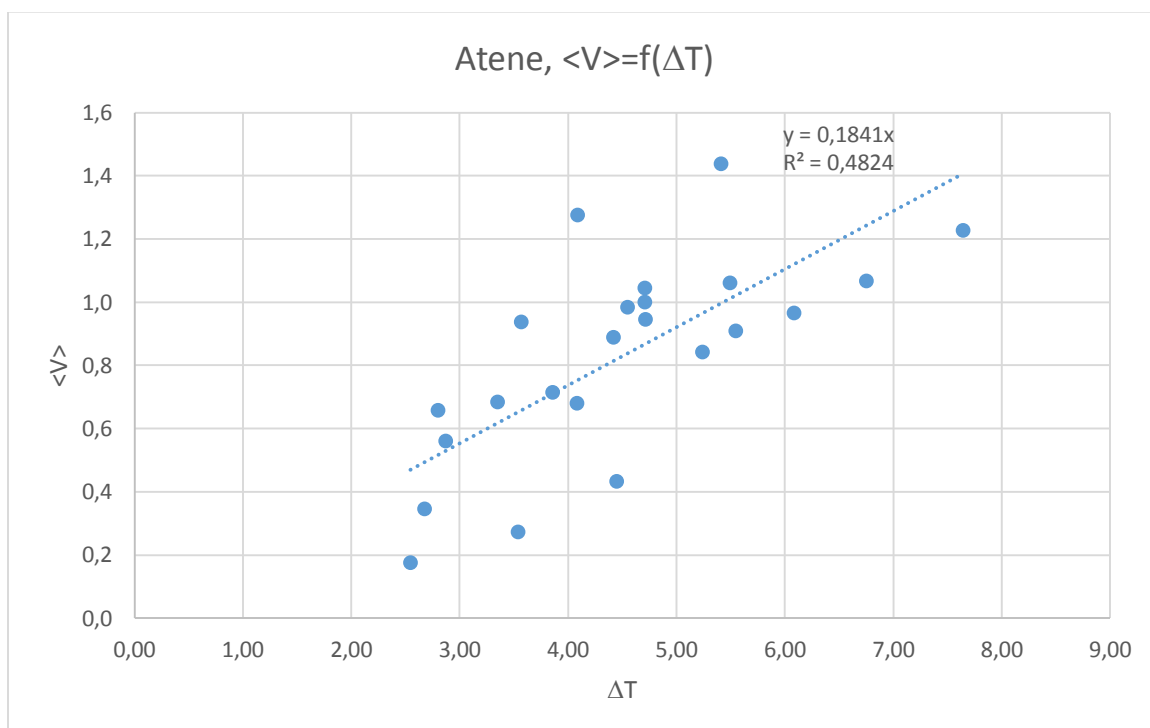
Melbourne, Australia



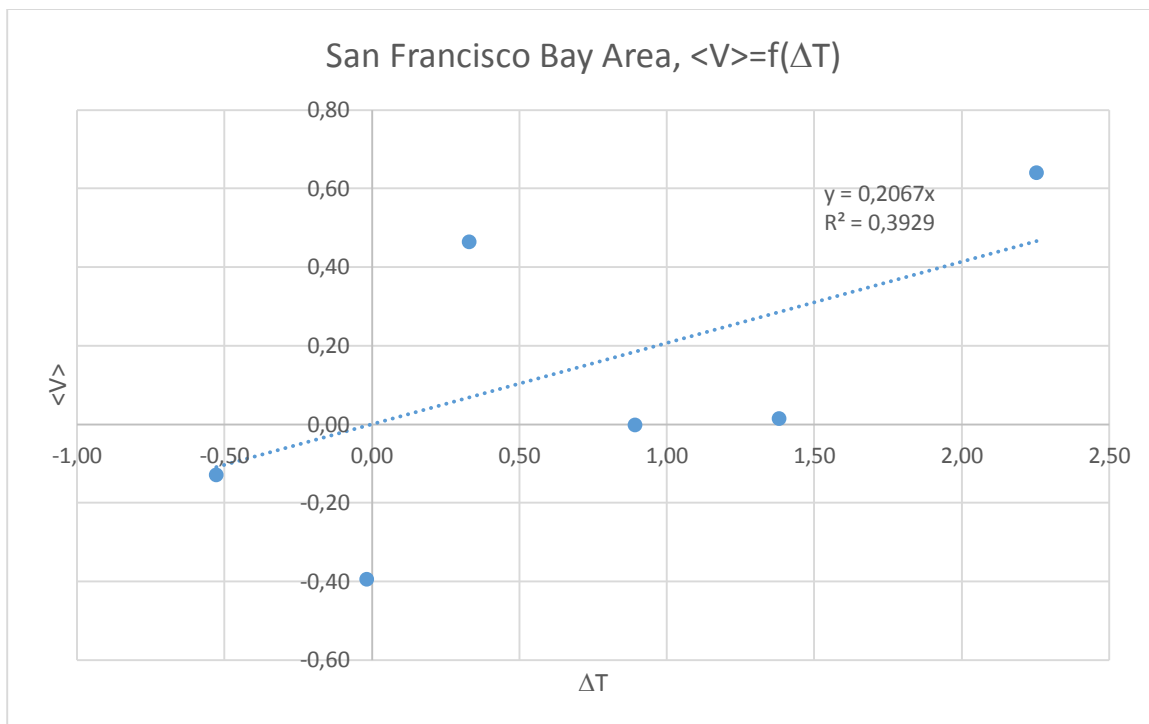
Peshawar, Pakistan



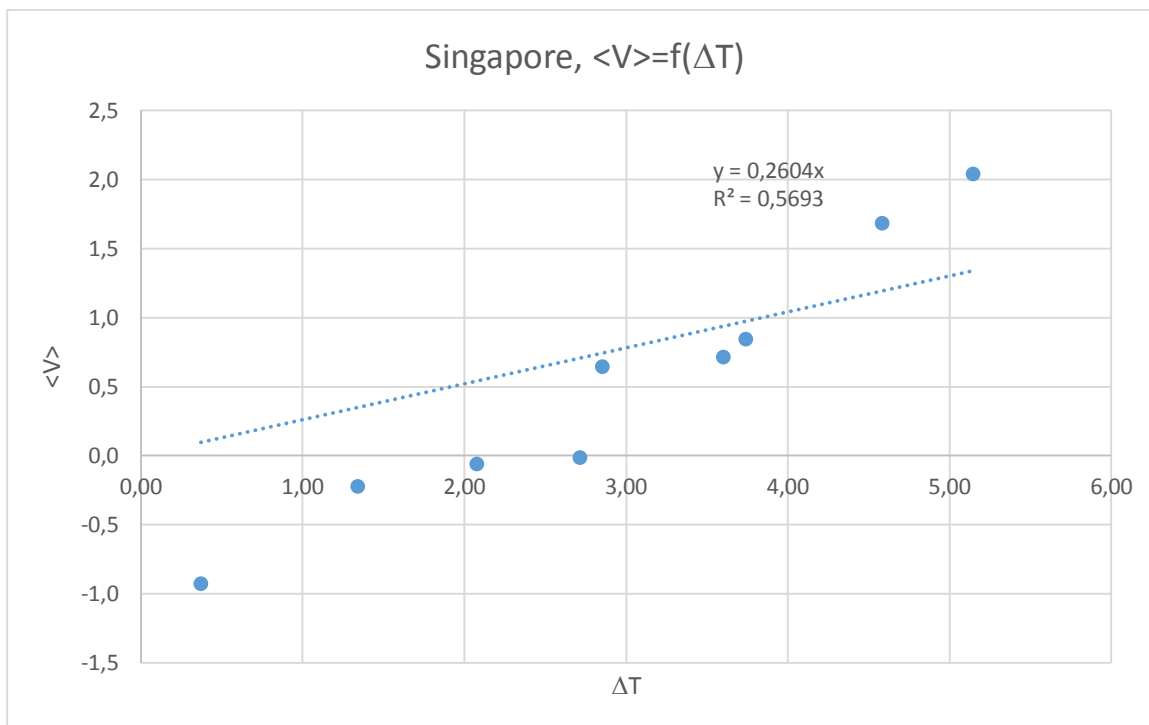
Atene, Grecia



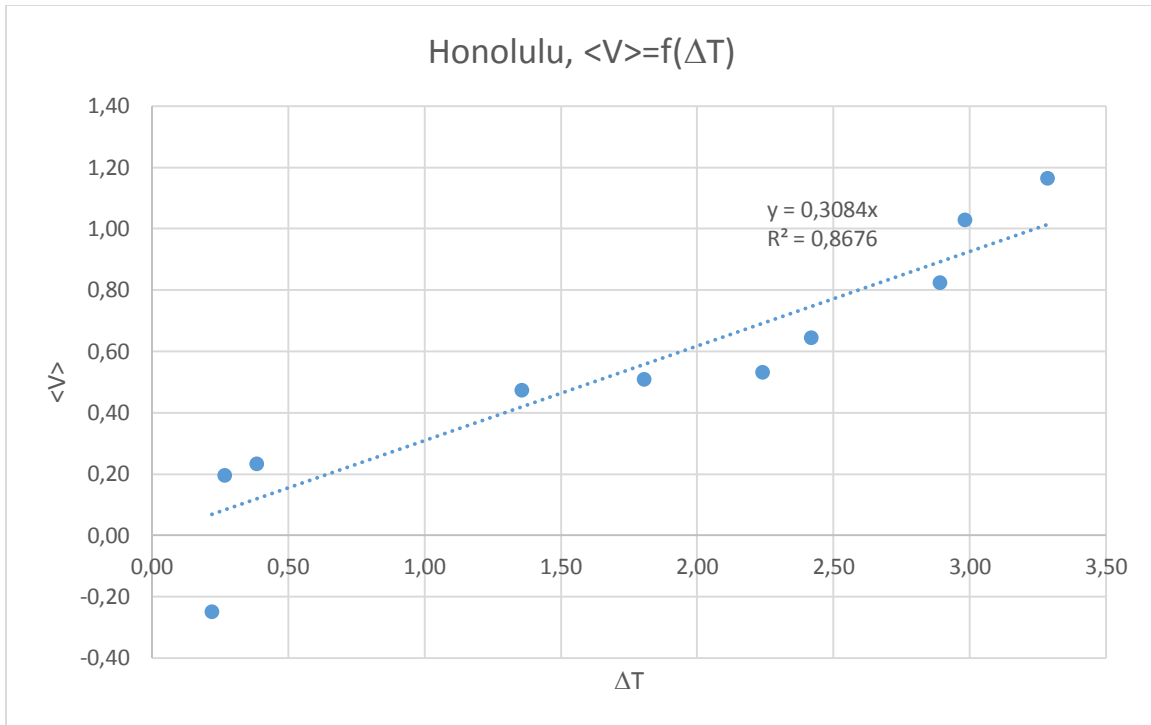
San Francisco Bay Area, Stati Uniti



Singapore



Honolulu, Stati Uniti



ALLEGATO C – CAMPIONI STUDIATI

Milano

Ventilazione naturale

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-		-	-	%
77	27,1	20,4	1	53	23	0,95	31,2
81	25,5	19,9	1	71	9	0,43	12,3
60	25,7	19,9	2	56	2	0,28	6,7
44	23,4	17,7	1	42	1	0,34	4,5

Ventilazione meccanica

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-		-	-	%
21	20,9	18,5	11	10	0	-1,48	52,4
41	26,1	20,4	1	38	2	-0,05	7,3
28	24,4	20,9	1	24	3	0,14	14,3
46	25,4	21,0	4	35	7	0,15	23,9
31	26,0	21,0	0	24	7	0,94	22,6

Merseyside Area

Ventilazione naturale

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-	-	-	-	%
25	23,0	12,0	1	20	4	0,64	20,0
27	22,2	11,4	3	18	6	0,41	33,3
30	22,2	12,0	3	15	12	0,70	50,0

Melbourne

Ventilazione naturale

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-		-	-	%
20	21,1	16,4	2	18	0	-0,28	10,0
20	30,1	20,8	0	6	14	2,02	70,0
26	22,9	18,7	0	25	1	0,41	3,8
35	22,1	16,4	2	32	1	0,01	8,6
38	22,9	16,4	2	36	0	0,05	5,3
21	22,8	16,4	0	19	2	0,24	9,5

Peshawar

Ventilazione naturale

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-		-	-	%
20	29,0	32,2	2	15	1	0,25	25,0
23	31,0	31,2	1	18	1	0,39	21,7
26	29,0	30,3	1	22	1	0,19	15,4
29	33,0	31,8	0	15	0	1,59	48,3
33	32,0	32,0	0	19	0	1,36	42,4
34	30,0	32,2	1	28	1	0,44	17,6
42	31,0	32,1	2	29	1	0,67	31,0

Brisbane

Ventilazione naturale

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-	-	-	-	%
22	28,1	24,1	0	15	7	1,13	31,8
22	29,0	24,1	0	16	6	1,15	27,3
23	28,9	24,7	0	15	8	1,27	34,8
28	26,7	24,0	1	26	1	0,30	7,1
32	26,2	23,9	1	29	2	-0,01	9,4
21	27,8	24,4	0	18	3	0,45	14,3
24	29,0	24,3	0	17	7	1,16	29,2
29	30,0	24,3	0	9	20	1,88	69,0
44	26,9	24,2	0	34	10	0,73	22,7
23	28,1	24,4	0	16	7	0,89	30,4
29	29,0	24,3	0	21	8	1,18	27,6
42	28,9	24,1	0	28	14	1,28	33,3
49	28,0	24,2	1	29	19	1,11	40,8
97	27,0	24,3	2	82	13	0,46	15,5
23	25,6	20,2	1	20	2	0,43	13,0
23	26,6	20,8	0	23	0	-0,40	0

Ventilazione meccanica

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-	-	-	-	%
21	24,1	22,1	1	20	0	-0,22	4,8
36	23,1	23,9	3	33	0	-0,45	8,3
33	21,7	24,1	5	28	0	-0,93	15,2
51	24,1	23,0	3	46	2	-0,02	9,8
58	25,0	22,9	2	47	9	0,58	19,0
31	23,2	23,8	7	23	1	-0,52	25,8
44	23,9	24,0	1	41	2	-0,12	6,8
27	24,9	23,9	0	23	4	0,51	14,8
33	24,0	23,2	0	30	3	0,15	9,1
25	23,8	23,8	0	24	1	0,30	4,0

Singapore

Ventilazione naturale

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-		-	-	%
20	26,9	28,1	1	19	0	-0,93	5,0
23	31,6	27,9	0	4	19	2,04	82,6
31	27,9	28,2	3	27	2	-0,22	15,6
40	28,9	26,6	0	35	5	0,65	12,5
43	29,9	27,1	0	33	10	0,84	23,3
60	29,1	27,9	2	58	0	-0,01	3,3
68	28,2	26,7	2	64	2	-0,06	5,9
99	31,0	27,8	0	40	59	1,69	59,6
174	30,1	28,0	1	141	32	0,72	19,0

Ventilazione meccanica

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-		-	-	%
20	22,9	27,1	2	17	1	-0,25	15,0
58	23,0	28,1	6	50	2	-0,19	13,8
35	24,0	28,0	1	30	4	0,26	14,3
20	24,7	27,9	1	17	2	0,15	15,0
0	23,2	28,6	8	25	0	-0,88	24,2

San Francisco Bay Area

Ventilazione naturale

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-		-	-	%
21	23,1	17,0	0	21	0	-0,40	0,0
39	23,9	16,9	1	35	3	0,00	10,3
20	22,1	15,4	0	19	1	-0,13	5,0
41	22,9	15,3	0	37	4	0,46	9,8
30	24,1	16,0	0	28	2	0,01	6,7
57	25,0	16,0	0	47	10	0,64	17,5

Atene

Ventilazione naturale

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-	-	-	-	%
25	29,1	27,2	0	21	4	0,56	16,0
29	30,1	26,4	0	19	10	1,28	34,5
35	29,3	27,9	0	32	3	0,66	8,6
36	31,0	27,3	0	26	10	0,94	27,8
48	30,0	27,9	0	37	11	0,94	22,9
50	31,9	27,8	0	33	17	1,06	34,0
60	31,0	27,8	0	47	13	0,98	21,7
55	29,1	28,0	0	53	2	0,35	3,6
97	30,9	27,8	2	92	3	0,43	5,2
99	30,0	28,0	5	93	1	0,27	6,1
55	31,8	27,8	1	25	29	1,44	54,5
23	28,9	27,7	0	22	1	0,17	4,3
38	29,0	25,2	0	35	3	0,68	7,9
38	30,8	25,1	0	30	8	0,84	21,1
45	30,0	25,1	0	36	9	0,89	20,0
67	31,1	27,7	0	49	18	1,04	26,9
32	31,0	27,3	0	28	4	1,00	12,5
33	31,8	27,3	0	30	3	0,91	9,1
30	33,0	27,3	0	23	7	1,07	23,3
31	33,9	27,3	0	23	8	1,23	25,8
21	30,0	27,0	0	18	3	0,71	14,3
28	30,9	29,1	0	24	4	0,68	14,3
28	32,9	29,0	0	24	4	0,96	14,3
47	31,9	29,0	0	44	3	0,77	6,4

Honolulu

Ventilazione naturale

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-		-	-	%
20	26,9	28,5	0	20	0	-0,25	0,0
33	29,6	28,7	0	25	8	0,82	24,2
25	29,6	28,5	0	15	10	1,03	40,0
34	26,9	28,5	2	28	4	0,19	17,6
113	27,1	28,9	6	93	14	0,23	17,7
182	28,1	28,9	2	148	32	0,47	18,7
187	28,9	28,7	1	166	20	0,53	11,2
136	28,4	28,4	5	103	28	0,51	24,3
151	29,0	28,4	7	106	38	0,64	29,8
171	29,9	28,4	5	94	72	1,16	45,0

Ventilazione meccanica

N, questionari	Top	MRT	N Cold	N comfort	N Hot	<V>	PD
-	°C	°C	-		-	-	%
30	19,7	28,4	12	18	0	-1,22	40,0
74	22,1	29,1	36	38	0	-1,44	48,6
95	24,0	28,6	42	53	0	-1,29	44,2
187	23,0	29,0	70	115	2	-1,10	38,5
111	23,6	29,0	26	84	1	-0,81	24,3
157	24,1	28,4	52	102	3	-0,98	35,0

Indice delle tabelle e delle figure

Capitolo 1 – Tabelle:

Tabella 1.1 – Variabili che incidono sul comfort termico, **pag.4**

Tabella 1.2 – Dati esperienza di Fanger. “Thermal Comfort”, Danish Technical Press (1970),
pag.6

Tabella 1.3 – Risultati della probit function, **pag.7**

Tabella 1.4 – $\langle V \rangle$ in funzione di T_{op} [°C], Final report ASHRAE RP-884 (1997), **pag.10**

Tabella 1.5 – $\langle V \rangle$ in funzione di PMV, Final report ASHRAE RP-884 (1997), **pag.10**

Tabella 1.6 – Temperatura Neutra [°C], Final report ASHRAE RP-884 (1997), **pag.11**

Tabella 1.7 – PMV neutro, Final report ASHRAE RP-884 (1997), **pag.12**

Tabella 1.8 – PMV per determinate quantità di insoddisfatti secondo modello Fanger (1970)
pag.15

Tabella 1.9 – Range di accettabilità, Final report ASHRAE RP-884 (1997) **pag.19**

Tabella 1.10 – classi di accettabilità secondo lo standard ASHRAE 55-2013 **pag.24**

Capitolo 1 – Figure:

Figura 1.1 – Risultati probit function effettuata da Fanger. “Thermal Comfort”, Danish Technical Press (1970) **pag.7**

Figura 1.2 Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) correlata al voto medio previsto (PMV). Fanger, “Thermal Comfort”, Danish Technical Press (1970). **pag.8**

Figura 1.3 – T_{op} neutra in funzione di T_{op} media, Final report ASHRAE RP-884 (1997),
pag.12

Figura 1.4 – T_{PMV} neutra in funzione di T_{op} media, Final report ASHRAE RP-884 (1997)
pag.13

- Figura 1.5 – PXTSA VS TSA, Final report ASHRAE RP-884 (1997) **pag.14**
- Figura 1.6 – TSA in funzione di Top e PMV, Final report ASHRAE RP-884 (1997) **pag.14**
- Figura 1.7 – PXTSA in funzione di Top e PMV, Final report ASHRAE RP-884 (1997) **pag.15**
- Figura 1.8 – Top neutra in relazione a OET, Final report ASHRAE RP-884 (1997) **pag.17**
- Figura 1.9 – Temperatura neutra prevista in relazione a OET, Final report ASHRAE RP-884 (1997) **pag.17**
- Figura 1.10 – Range di accettabilità in relazione a OET, Final report ASHRAE RP-884 (1997) **pag.18**
- Figura 1.11 – Modelli per la temperatura di comfort degli uffici europei per ambienti ventilati naturalmente e meccanicamente. Nicol, Adaptive comfort in Europe, results from the SCATs surveys with special reference to free-running buildings (2005). **pag.20**
- Figura 1.12 – Probit Lines per i dati SCATs. Percentuale dei voti in funzione dello scostamento dalla temperatura di comfort. Nicol, Adaptive comfort in Europe, results from the SCATs surveys with special reference to free-running buildings (2005). **pag.21**
- Figura 1.13 – Polinomiali riferite ad un singolo edificio. Percentuale dei voti in funzione dello scostamento dalla temperatura di comfort. Nicol, Adaptive comfort in Europe, results from the SCATs surveys with special reference to free-running buildings (2005). **pag.22**
- Figura 1.14 – Zone di comfort 80% ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) per edifici ventilati naturalmente e ventilati meccanicamente. Nicol, Adaptive comfort in Europe, results from the SCATs surveys with special reference to free-running buildings (2005). **pag.22**
- Figura 1.15 - PPD ottenuto dal modello di Fanger confrontato con l'attuale livello di discomfort (APD). Nella prima immagine si fa riferimento ai dati del database ASHRAE RP-884, nella seconda ai dati del progetto SCATs. Nicol, Adaptive comfort in Europe, results from the SCATs surveys with special reference to free-running buildings (2005). **pag.23**

Capitolo 2 – Tabelle:

Tabella 2.1 – Database elaborati **pag.30**

Tabella 2.2 – Risultati probit analysis sui dati di Fanger **pag.35**

Tabella 2.3 – Probabilità che la correlazione sia fortuita in funzione di R^2 e n. di punti interpolati **pag.36**

Capitolo 2 – Figure:

Figura 2.1 – Probit Plot, in ascissa c'è la probabilità cumulativa e in ordinata il quantile della normale standard associato. Wikipedia, “probit function” (2015). **pag.33**

Figura 2.2 – Probit analysis per i dati di Fanger. **pag.35**

Figura 2.3 - Esempio interpolazione per k, Honolulu **pag.38**

Capitolo 3 – Tabelle:

Tabella 3.1 – Deviazioni standard per il ramo caldo degli insoddisfatti NV **pag.42**

Tabella 3.2 – Deviazioni standard per il ramo freddo degli insoddisfatti NV **pag.43**

Tabella 3.3 – Deviazioni standard per il ramo caldo degli insoddisfatti HVAC **pag.44**

Tabella 3.4 – Deviazioni standard per il ramo freddo degli insoddisfatti HVAC **pag.45**

Tabella 3.5 – Riepilogo radici della varianza **pag.46**

Tabella 3.6 – Coefficiente del legame tra voto medio e ΔT dal comfort **pag.48**

Tabella 3.7 – Riepilogo k **pag.49**

Tabella 3.8 – Intervalli di accettabilità **pag.51**

Capitolo 3 – Figure:

Figura 3.1 – Brisbane, intervalli accettabilità, tesi **pag.53**

Figura 3.2 – Brisbane, intervalli accettabilità, ASHRAE 55 **pag.53**

Figura 3.3 – Melbourne, intervalli accettabilità, tesi **pag.55**

Figura 3.4 – Melbourne, intervalli accettabilità, ASHRAE 55 **pag.55**

Figura 3.5 – Peshawar, intervalli accettabilità, tesi **pag.57**

Figura 3.6 – Peshawar, intervalli accettabilità, ASHRAE 55 **pag.57**

Figura 3.7 – Atene, intervalli accettabilità, tesi **pag.59**

Figura 3.8 – Atene, intervalli accettabilità, ASHRAE 55 **pag.59**

Figura 3.9 – Singapore, intervalli accettabilità, tesi **pag.61**

Figura 3.10 – Singapore, intervalli accettabilità, ASHRAE 55 **pag.61**

Figura 3.11 – Honolulu, intervalli accettabilità, tesi **pag.63**

Figura 3.12 – Honolulu, intervalli accettabilità, ASHRAE 55 **pag.63**

Figura 3.13 – Atene, Probit Lines per la percentuale di individui che esprimerebbero un intervallo di voti. **pag.64**

Figura 3.14 – Brisbane, Probit Lines per la percentuale di individui che esprimerebbero un intervallo di voti. **pag.65**

Figura 3.15 – Honolulu, Probit Lines per la percentuale di individui che esprimerebbero un intervallo di voti. **pag.65**

Nomenclatura e lista acronimi

HVAC – Heating, Ventilating and Air Conditioning

NV – Natural Ventilating

PMV – Predicted Mean Vote

PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied

APD – Actual Predicted Dissatisfied

MET – Indicatore per l'attività metabolica (58 W/mq)

CLO – Indicatore per l'isolamento del vestiario ($0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$).

T_{rm} – Mean Running Temperature

R^2 – Coefficiente di determinazione

PF – Percentuale caso Fortuito

σ – Deviazione standard della distribuzione normale

$\langle V \rangle$ – Voto medio sperimentale

k – coefficiente legame voto medio e scostamento dal comfort

T_c – Temperatura di comfort

T_{RMn} – Mean Running Temperature per il giorno n

T_{An} – Temperatura media giornaliera per il giorno n

T_{op} – Temperatura Operante

X_i – Quantile normale standard

X_s – Quantile normale reale

Bibliografia

P.O. Fanger. 1970. "Thermal Comfort". Danish Technical Press.

J.F. Nicol, M.A. Humphreys. 1972. "Thermal comfort as part of a self-regulatory system". Proceedings of the CIB Symposium on Thermal Comfort, Building Research Establishments, Watford, UK.

M. A. Humphreys. 1978. "Outdoor temperatures and comfort indoors." Building Research and Practice(J. CIB) 6(2), pp 92-105.

John R. Taylor, "Introduzione alla teoria degli errori; lo studio delle incertezze nelle misure fisiche ", 1986, Zanichelli.

"ISO 7730, Moderate Thermal Environments – determination of the PMV and PPD indices and specification of the condition for thermal comfort". ISO, Geneva, 1994.

M.A. Humphreys, J.F. Nicol, in: J.F. Nicol, et al. (Eds.), An Adaptive Guideline for UK Office Temperatures. Standards for Thermal Comfort: Indoor Air Temperature Standards for the 21st Century E & FN Spon, London, UK, 1995.

J.F. Nicol, I.A. Raja, Thermal Comfort, Time and Posture: Explanatory Studies in the Nature of Adaptive Thermal Comfort, Oxford Brookes University, UK, 1996.

Richard de Dear, Gail Brager, Donna Cooper. 1997. "Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference." FINAL REPORT ASHRAE RP-884.

Brager, G.S., and R.J. de Dear. 1998. "Thermal Adaptation in the Built Environment: A Literature Review." Energy and Buildings, Vol. 27, No. 1, pp. 83-96.

Richard de Dear, R.J. (1998) "A global database of thermal comfort field experiments," ASHRAE Trans, V.104(1).

Richard de Dear, Gail Brager. 2002. "Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revision to ASHRAE Standard 55." Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 549-561.

P. Ole Fanger, Jorn Tuftum. 2002. "Extension of the PMV Model to non air-conditioned buildings in warm climate". Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 533-536.

Michael A. Humphreys, J. Fergus Nicol. 2002. "The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in everyday thermal environments." Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 667-684.

Kathryn J. McCartney, J. Fergus Nicol. 2002. "Developing an adaptive control algorithm for Europe." Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 623-635.

Fergus Nicol, Michael Humphreys. 2005. "Adaptive comfort in Europe: results from the SCATs surveys with special reference to free-running buildings." Proceedings of the international conference on EPBD Energy Performance of Buildings Directive : implementation in practice, held in Brussels on 21-23 september 2005 - Session 4.5. - pp 14.

Nicholas Mercandelli, Daniel Provezza, Rel. Adriana Angelotti, 2008. "Indagine sul benessere termoigrometrico estivo nelle aule del politecnico." Tesi di laurea di I livello.

UNI EN 15251:2008, Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica, In vigore dal:14 Febbraio 2008.

Adriana Angelotti. 2010. "Subjective versus objective assessment of thermal comfort: preliminary considerations on an experimental campaign in university classrooms." Proceedings of CLIMA 2010 10th REHVA world congress, 9-12/05/2010, Antalya, Turkey.

Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE

Alessandro Dama, 2013, “Appunti sulla determinazione della varianza della distribuzione dei voti di percezione termica e sulla conseguente determinazione del legame PMV-PPD”

SITOGRAFIA

THE ADAPTIVE MODEL OF THERMAL COMFORT: UNIVERSITY OF SYDNEY'S
ASHRAE RP-884 PROJECT, The University of Sydney,

Last Updated: 14-Jan-2010.

(http://sydney.edu.au/architecture/staff/homepage/richard_de_dear/index.shtml)

SEARCH, CLIMATE DATA ONLINE, NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER.

NOAA, NCEI (US), **Last Visited:** 20-Jul-2015.

(<http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/search?datasetid=GHCND>)

CLIMATE - CLIMATE DATA, Tutiempo Network, S.L. **Last Visited:** 20-Jul-2015.

(<http://en.tutiempo.net/climate>)