



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

## Analisi critica degli indicatori per la valutazione del comfort termico indoor

*L. Pagliano, S. Carlucci, P. Zangheri*



Report RdS/2012/115

## ANALISI CRITICA DEGLI INDICATORI PER LA VALUTAZIONE DEL COMFORT TERMICO INDOOR

L. Pagliano, S. Carlucci, P. Zangheri (end-use Efficiency Research Group, Politecnico di Milano)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Tecnologie per il risparmio elettrico nel settore civile

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano. ENEA

## Indice

<b>Sommario</b> .....	<b>4</b>
<b>Introduzione</b> .....	<b>5</b>
<b>Metodologia adottata</b> .....	<b>5</b>
<i>Descrizione dell'edificio di riferimento</i> .....	9
<i>I contesti climatici analizzati</i> .....	11
<b>Indici di discomfort di lungo periodo proposti dalla UNI EN 15251</b> .....	<b>11</b>
<i>Metodo A: La percentuale di ore al di fuori dell'intervallo di comfort</i> .....	11
<i>Metodo B: Il criterio dei gradi giorno</i> .....	12
<i>Metodo C: Il criterio del PPD pesato</i> .....	13
<b>Discussione dei risultati</b> .....	<b>14</b>
<i>Milano</i> .....	15
<i>Genova</i> .....	16
<i>Roma</i> .....	17
<i>Foggia</i> .....	18
<i>Palermo</i> .....	19
<i>Surriscaldamento e sottoraffreddamento</i> .....	20
<i>Analisi di sensitività</i> .....	22
<b>Conclusioni</b> .....	<b>24</b>
<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	<b>24</b>

## Sommario

Oggetto del contratto è l'analisi critica degli indicatori proposti dalla norma UNI EN 15251: 2008<sup>1</sup> per valutare attraverso misura o calcolo le condizioni termiche generali del clima degli ambienti interni; in particolare essa consiste in un'analisi comparata degli indicatori di lungo termine applicati alla valutazione del comfort termico durante la stagione estiva. Gli indici di valutazione di lungo periodo sono strumenti utili sia per la valutazione in esercizio delle condizioni di comfort termico in edifici esistenti, sia per guidare il processo di ottimizzazione del progetto di un nuovo edificio, sia per ottimizzare il funzionamento degli impianti termici. Focalizzandosi esclusivamente al periodo estivo, gli indici di valutazione di lungo periodo delle condizioni di comfort termico proposti dalla norma UNI EN 15251 : 2008 sono stati usati per valutare 54 differenti varianti di un ampio edificio per uffici di riferimento localizzato in diverse città italiane caratterizzate da differenti condizioni climatiche. Le 54 varianti dell'edificio sono state ottenute combinando quattro parametri di riferimento dell'involucro edilizio assumendo due o tre differenti livelli di prestazione per ogni parametro.

Tuttavia gli indicatori proposti dalla norma UNI EN 15251 restituiscono diversi risultati, a volte anche in contrasto, (1) a causa del fatto che alcuni considerano nella valutazione del discomfort solo il surriscaldamento ambientale, mentre altri anche il sottoraffreddamento e (2) se cambia il modello di comfort rispetto al quale vengono calcolati gli indicatori. Tutti gli indici analizzati in questo lavoro dipendono dalle categorie di comfort, ma sono disponibili in letteratura altri indici che invece non dipendono dalle categorie di comfort, ma magari solo da una temperatura fissa generalmente usata come estremo superiore della zona di comfort.

Invece, sotto il profilo progettuale, l'analisi condotta ha permesso di identificare alcuni parametri di progetto che maggiormente influenzano la valutazione del discomfort termico. In particolare si è individuato che la ventilazione naturale notturna è il parametro che maggiormente influenza le condizioni termiche dell'edificio e quindi ha il maggiore impatto sul comfort termico e un'efficace protezione solare delle superfici trasparenti aumenta sempre il comfort durante il periodo estivo, anche se il suo potenziale è minore di quello della ventilazione notturna (almeno nei climi analizzati in questo lavoro e relativamente alle tipologie edilizie considerate, in cui il rapporto superfici vetrate/superfici opache non è particolarmente elevato).

L'aumento dell'isolamento termico e la diminuzione della permeabilità all'aria dell'involucro possono ridurre in estate il comfort termico interno, ma solo se le superfici vetrate non sono opportunamente schermate e se non è implementata una strategia di ventilazione notturna adeguata. In generale evacuare i carichi termici estivi attraverso le pareti (e quindi peggiorarne il comportamento invernale) appare come una strategia errata se questi carichi possono essere controllati con le protezioni solari e smaltiti efficacemente con la ventilazione notturna, con vantaggi dal punto di vista energetico e di comfort.

L'aumento della massa termica dà benefici in tutti i contesti climatici analizzati, con un beneficio marginale che si riduce all'aumentare della massa oltre certi valori.

---

<sup>1</sup> 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

## Introduzione

La letteratura scientifica e alcuni standard tecnici offrono un certo numero di metodi per valutare le condizioni di comfort termico negli edifici valutate su un lungo periodo e indici per predire le condizioni di surriscaldamento estivo dell'ambiente interno. Tali metodi e indici possono essere strumenti utili sia per la valutazione in esercizio delle condizioni di comfort termico in edifici esistenti, sia per guidare il processo di ottimizzazione del progetto di un nuovo edificio, sia per ottimizzare il funzionamento degli impianti termici. Focalizzandosi esclusivamente sul periodo estivo, gli indici di valutazione di lungo periodo delle condizioni di comfort termico proposti dalla norma UNI EN 15251: 2008 sono stati usati per valutare 54 differenti varianti di un ampio edificio per uffici di riferimento localizzato in diverse città italiane caratterizzate da differenti condizioni climatiche. Le 54 varianti dell'edificio sono state ottenute combinando quattro parametri di riferimento dell'involucro edilizio assumendo due o tre differenti livelli di prestazione per ogni parametro.

I valori assunti dagli indici sono stati confrontati al fine di individuarne sia le somiglianze e le differenze, sia i punti di forza e i limiti. Gli indici hanno restituito risultati diversi (a volte anche in modo significativo) nella valutazione delle 54 varianti, finanche ad individuare come varianti ottimali dell'edificio, configurazioni anche molto diverse tra loro. Pertanto si ritiene necessario investigare le loro peculiarità al fine di supportare efficacemente l'ottimizzazione basata sul comfort di un edificio, ad esempio come proposto nella norma UNI EN 15251.

Questo può fornire metodologie utili a supportare una migliore progettazione degli involucri per soddisfare i nuovi obiettivi di prestazione della legislazione Italiana e quelli prevedibilmente ancora più ambiziosi per il 2020

## Metodologia adottata

Uno degli obiettivi che la Comunità europea sta perseguendo negli ultimi decenni è la riduzione di energia nel settore delle costruzioni attraverso la direttiva 2002/91/CE [1]. A seguito del sempre maggior uso di dispositivi di condizionamento meccanico, l'energia usata per il raffrescamento sta assumendo una percentuale crescente all'interno del bilancio energetico del settore edifici. Pertanto, uno dei temi attuali è la fornitura di comfort termico durante il periodo estivo a fronte di un basso consumo energetico o addirittura senza utilizzare energia attraverso sistemi attivi.

Uno degli strumenti a supporto di questo obiettivo è costituito dalla norma UNI EN 15251 che fornisce riferimenti per il comfort termico, luminoso e qualità dell'aria. Per quanto riguarda il comfort termico la norma utilizza due modelli, quello di Fanger, da usarsi in presenza di raffrescamento meccanico, e il modello di comfort Adattivo, dedicato invece agli edifici sprovvisti di un impianto di raffrescamento meccanico. In particolare, la tale norma europea stabilisce che:

*"The temperature limits presented in A.2 [ndr: Adaptive-based comfort range] should be used for the dimensioning of passive means to prevent overheating in summer conditions. Dimensioning and orientation of windows, dimensioning of solar shading and the thermal capacity of the building's construction. Where the adaptive temperature limits presented in A.2 (upper limits) cannot be guaranteed by passive means mechanical cooling is unavoidable. In such cases the design criteria for buildings WITH mechanical cooling [ndr: Fanger-based comfort range] should be used."*

In altre parole, essa suggerisce al progettista di ottimizzare l'orientamento dell'edificio e la progettazione delle finestre, delle schermature solari e delle caratteristiche termiche di un edificio facendo riferimento prima ai limiti di comfort proposti insieme al modello di comfort Adattivo e ove non si riesca a soddisfare tali requisiti e si ricorra all'installazione di sistemi meccanici per il raffrescamento si deve fare riferimento al modello di comfort di Fanger. [3].

Per agevolare il lavoro dei progettisti la norma ha anche suggerito alcuni metodi che permettono di sintetizzare in un unico valore (indicatore di discomfort di lungo periodo) la prestazione di comfort termico di un edificio integrata su un periodo esteso. Con riferimento agli indicatori di discomfort di lungo periodo, la frase della UNI EN 15251 può essere esplicitata in un procedura di ottimizzazione che permette di individuare i parametri dell'edificio che minimizzano in principio un indice di discomfort di lungo periodo costruito sul modello adattivo e se non si riesce a confinare il discomfort termico entro i limiti previsti dalla norma, a fronte dell'installazione di un impianto di raffrescamento meccanico, si passa al modello di comfort di Fanger e si procede con l'individuazione di quei parametri dell'edificio che minimizzano un indice di discomfort di lungo periodo costruito sul modello di Fanger.

Diversi indici sono sia stati proposti da norme tecniche, sia disponibili in letteratura scientifica, ma per i fini del presente lavoro, si utilizzano gli indici proposti dalla norma europea EN 15251 nell'allegato F.

La metodologia utilizzata in questo lavoro per identificare sia le similitudini e differenze, sia i punti di forza e i limiti dei suddetti indici, si compone di quattro fasi.

Nella fase 1, si generano le varianti di un edificio di riferimento, variando 4 caratteristiche di un edificio: (i) la resistenza dell'involucro edilizio al passaggio dei flussi energetici e delle infiltrazioni d'aria, (ii) il fattore solare dei sistemi vetrati delle finestre, (iii) la massa termica interna e (iv) la strategia di apertura delle finestra per la ventilazione naturale notturna. Per ogni caratteristica sono stati assunti 2 o 3 livelli di prestazioni così come riportato in Tabella 1.

Ci si è concentrati maggiormente sulle caratteristiche passive dell'involucro, perché la procedura proposta dalla UNI EN 15251 prevede l'applicazione in due fasi (prima si ottimizzare l'involucro e i sistemi passivi rispetto al comfort adattivo e se le condizioni di comfort non sono soddisfacenti, si introducono sistemi attivi e si ottimizza rispetto al comfort di Fanger) e il passaggio dalla prima fase alla seconda può produrre una discontinuità.

Per quanto riguarda l'elenco dei parametri fisici da modificare in modo da ottimizzare il comportamento comfort termico dell'edificio, abbiamo scelto di seguire le indicazioni riportate nella norma SIA 382, rivista nel 2007 [6]. Dal momento che in Europa meridionale sia le temperature medie estive, sia quelle di picco sono decisamente superiori che Svizzera e il clima dei paesi del Mediterraneo mostrano differenze distinte dal caldo continentale, il nostro obiettivo è:

- di utilizzare i suggerimenti UNI EN 15251 per costruire un metodo esplicito di ottimizzazione e verificarne la coerenza e l'applicabilità;
- di individuare i valori ottimali dei parametri fisici (massa termica, permeabilità all'aria, trasmittanza termica, fattore solare), accoppiati ad una strategia di raffreddamento passivo come la ventilazione naturale notturna, in 5 climi italiani (Milano, Genova, Roma, Foggia e Palermo) durante la stagione estiva, che migliorano il comfort termico valutato attraverso gli indici di lungo termine.

Dopo aver scelto un edificio geometricamente rappresentativo (edificio per uffici di grandi dimensioni), l'ottimizzazione è stata effettuata simulando dinamicamente (mediante il software EnergyPlus) vari modelli numerici dell'edificio. Le simulazioni sono state condotte assumendo che non vi sia alcun sistema attivo di controllo della temperatura interna estiva, per cui la temperatura interna nelle varie zone termiche del modello numerico è stata lasciata libera di fluttuare secondo la variazione dell'energia interna dell'edificio. Combinando i vari livelli prestazioni delle 4 caratteristiche individuate in tabella 1, sono state costruite 54 varianti dell'edificio di riferimento secondo lo schema riportato in tabella 2.

Tabella 1 – Sommario delle variazioni per ogni caratteristica.

Caratteristica		Variazioni			
Trasmittanza termica e permeabilità all'aria dell'involucro edilizio	o	Livelli prescritti dal DLgs 311 [5]	Copertura (Roma)	0.36	$W m^{-2}K^{-1}$
			Pareti perimetrali (Roma)	0.32	$W m^{-2}K^{-1}$
			Pavimento (Roma)	0.36	$W m^{-2}K^{-1}$
			Finestre (Roma)	2.40	$W m^{-2}K^{-1}$
			Permeabilità all'aria <sup>a</sup>	5.0	$m^3 h^{-1}m^{-2}$
	+	Livelli prescritti dalla SIA 382 [6] (per ristrutturazioni)	Copertura (Roma)	0.20	$W m^{-2}K^{-1}$
			Pareti perimetrali (Roma)	0.20	$W m^{-2}K^{-1}$
			Pavimento (Roma)	0.20	$W m^{-2}K^{-1}$
			Finestre (Roma)	1.2	$W m^{-2}K^{-1}$
			Permeabilità all'aria <sup>a</sup>	0.5	$m^3 h^{-1}m^{-2}$
Fattore solare dei sistemi vetrati	-	Valori tipici in edifici esistenti	Facciata N	-	-
			Facciata NE-NO	0.70	-
			Facciata E-SE-S-SO-O	0.70	-
	o	Valori medi	Facciata N	-	-
			Facciata NE-NO	0.40	-
			Facciata E-SE-S-SO-O	0.40	-
	+	Livelli prescritti dalla SIA 382 [6] (per ristrutturazioni)	Facciata N	-	-
			Facciata NE-NO	0.27	-
			Facciata E-SE-S-SO-O	0.15	-
Thermal mass	-	Massa termica interna bassa	Pareti perimetrali <sup>b</sup>	4.0	$Wh m^{-2}K^{-1}$
			Soffitto <sup>b</sup>	11.0	$Wh m^{-2}K^{-1}$
			Pavimento <sup>b</sup>	4.1	$Wh m^{-2}K^{-1}$
			Pareti interne <sup>b</sup>	2.3	$Wh m^{-2}K^{-1}$
			Edificio <sup>c</sup>	20.0	$Wh m^{-2}K^{-1}$
	o	Massa termica interna media	Pareti perimetrali <sup>b</sup>	15.4	$Wh m^{-2}K^{-1}$
			Soffitto <sup>b</sup>	18.6	$Wh m^{-2}K^{-1}$
			Pavimento <sup>b</sup>	12.7	$Wh m^{-2}K^{-1}$
			Pareti interne <sup>b</sup>	8.9	$Wh m^{-2}K^{-1}$
			Edificio <sup>c</sup>	50.0	$Wh m^{-2}K^{-1}$
	+	Massa termica interna alta	Pareti perimetrali <sup>b</sup>	15.4	$Wh m^{-2}K^{-1}$
			Soffitto <sup>b</sup>	22.1	$Wh m^{-2}K^{-1}$
			Pavimento <sup>b</sup>	22.4	$Wh m^{-2}K^{-1}$
			Pareti interne <sup>b</sup>	18.8	$Wh m^{-2}K^{-1}$
			Edificio <sup>c</sup>	80.0	$Wh m^{-2}K^{-1}$
Ventilazione naturale notturna	-	Assenza di ventilazione naturale notturna	Percentuale dell'area apribile rispetto all'area dell'intero serramento	0	%
	o	Ventilazione naturale notturna media	Percentuale dell'area apribile rispetto all'area dell'intero serramento	25	%
	+	Ventilazione naturale notturna alta	Percentuale dell'area apribile rispetto all'area dell'intero serramento	50	%

<sup>a</sup> La Permeabilità all'aria è stata calcolata secondo la SIA 180 [7] ed è riferita all'area dell'involucro edilizio.

<sup>b</sup> La Capacità termica di un componente edilizio è calcolato secondo la norma EN ISO 13786 [8]. Essa è espressa per area del componente edilizio.

<sup>c</sup> La Capacità termica di un edificio o di una zona di un edificio è calcolata secondo la definizione SIA [7] sulla base della EN ISO

13786 [8]. È espressa per unità di superficie netta di pavimento della zona.

Tabella 2 – varianti dell’edificio di riferimento ottenute combinando le differenti prestazioni delle caratteristiche dell’edificio.

nome della variante	Qualità dell’involucro		Massa termica	Fattore solare	Ventilazione naturale notturna
	Resistenza termica	Permeabilità all’aria			
Variant 01	0	0	-	+	-
Variant 02	0	0	-	+	0
Variant 03	0	0	-	+	+
Variant 04	0	0	-	0	-
Variant 05	0	0	-	0	0
Variant 06	0	0	-	0	+
Variant 07	0	0	-	-	-
Variant 08	0	0	-	-	0
Variant 09	0	0	-	-	+
Variant 10	0	0	0	+	-
Variant 11	0	0	0	+	0
Variant 12	0	0	0	+	+
Variant 13	0	0	0	0	-
Variant 14	0	0	0	0	0
Variant 15	0	0	0	0	+
Variant 16	0	0	0	-	-
Variant 17	0	0	0	-	0
Variant 18	0	0	0	-	+
Variant 19	0	0	+	+	-
Variant 20	0	0	+	+	0
Variant 21	0	0	+	+	+
Variant 22	0	0	+	0	-
Variant 23	0	0	+	0	0
Variant 24	0	0	+	0	+
Variant 25	0	0	+	-	-
Variant 26	0	0	+	-	0
Variant 27	0	0	+	-	+
Variant 28	+	+	-	+	-
Variant 29	+	+	-	+	0
Variant 30	+	+	-	+	+
Variant 31	+	+	-	0	-
Variant 32	+	+	-	0	0
Variant 33	+	+	-	0	+
Variant 34	+	+	-	-	-
Variant 35	+	+	-	-	0
Variant 36	+	+	-	-	+
Variant 37	+	+	0	+	-
Variant 38	+	+	0	+	0
Variant 39	+	+	0	+	+
Variant 40	+	+	0	0	-
Variant 41	+	+	0	0	0
Variant 42	+	+	0	0	+
Variant 43	+	+	0	-	-
Variant 44	+	+	0	-	0

Variant 45	+	+	0	-	+
Variant 46	+	+	+	+	-
Variant 47	+	+	+	+	0
Variant 48	+	+	+	+	+
Variant 49	+	+	+	0	-
Variant 50	+	+	+	0	0
Variant 51	+	+	+	0	+
Variant 52	+	+	+	-	-
Variant 53	+	+	+	-	0
Variant 54	+	+	+	-	+

Nella Fase 2, tutte le 54 varianti di edificio sono state simulate con EnergyPlus [9] in ogni contesto climatico identificato (Milano, Genova, Roma, Foggia e Palermo) e i parametri caratterizzanti l'ambiente interno sono stati registrati in un database.

Quindi, nella Fase 3, Il discomfort termico è stato valutato in ogni zona di ogni modello attraverso gli indici di valutazione di lungo periodo proposti dall'allegato F della norma EN 15251:

- la percentuale di ore al di fuori dell'intervallo di comfort (metodo A, nelle due varianti, Fanger e adattivo);
- il criterio dei gradi-ora (metodo B, nelle due varianti, Fanger e adattivo);
- il criterio del PPD pesato (metodo C, applicabile solo utilizzando il modello di Fanger).

Il metodo A calcola la percentuale delle ore durante il periodo di occupazione dell'edificio in cui si verificano condizioni di discomfort, rispetto al numero totale delle ore di occupazione; mentre i metodi B e C pesano ogni ora durante il periodo di occupazione dell'edificio in cui si verificano condizioni di discomfort, per un fattore di peso che cerca di stimare di quanto le condizioni correnti distano dalle condizioni di comfort.

Infine nella Fase 4, i vari indicatori sono stati analizzati in sottogruppi attraverso la comparazione dei risultati, per individuarne similitudini e differenze al fine di evincere informazioni sulle implicazioni della scelta dell'indice sul processo di progettazione.

### *Descrizione dell'edificio di riferimento*

Le simulazioni energetiche dell'edificio sono state eseguite utilizzando il software EnergyPlus [9] versione 6.0.0.23. Tutte le 54 varianti dell'edificio sono state simulate in ognuno dei 5 climi identificati (Milano, Genova, Roma, Foggia e Palermo) durante il periodo estivo compreso tra il 15 maggio e il 30 settembre. Compatibilmente con le caratteristiche di EnergyPlus, i modelli numerici sono stati impostati in modo da riprodurre abbastanza in dettaglio le caratteristiche geometriche ed i fenomeni fisici che influenzano il comportamento termico dell'edificio, anche se questo ha causato un'espansione del tempo di calcolo.

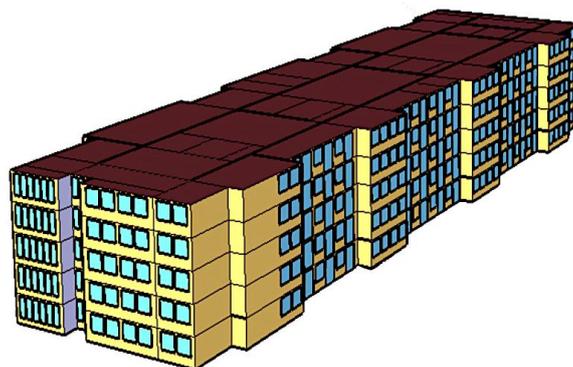


Figura 1 – Vista tridimensionale del modello numerico dell'edificio.

L'edificio di riferimento è un ampio edificio per uffici di cinque piani (Figura 1), caratterizzato da un volume occupato di 32 706 m<sup>3</sup> e da una superficie esterna di 8 501 m<sup>2</sup>, quindi il suo rapporto di forma (S / V) è 0,26 m<sup>-1</sup>. Il rapporto tra la superficie finestrata e le facciate verticali è il 40%.

Il piano tipo, che si ripete per ogni piano, è stato suddiviso in cinque zone termiche: la Zona sud-est (20 uffici, 710 m<sup>2</sup>), la Zona nord-ovest (21 uffici, 514 m<sup>2</sup>), la Zona nord-est (3 uffici, 66 m<sup>2</sup>), la Zona sud-ovest (3 uffici, 33 m<sup>2</sup>) e la Zona centrale (connettivi verticali e orizzontali e zone servizi, 935 m<sup>2</sup>). La geometria e la zonizzazione termica del piano tipo è mostrato in Figura 1. Tutti e cinque piani sono stati simulati per tener conto delle differenze nelle condizioni di comfort tra le zone ai piani superiori e al piano terra.

Le proprietà termofisiche dell'edificio di riferimento sono in accordo con i requisiti della legge italiana Decreto Legislativo n. 311 (DLgs 311) [5] e sono riportate nella tabella 3.

Tabella 3 – Trasmissioni limite per i nuovi edifici costruiti dopo il 2010 secondo il D.Lgs 311.

Città	Zona climatica invernale	Parete perimetrale	Copertura	Pavimento	Finestre
Palermo	A	0,62	0,38	0,65	4,60
	B	0,48	0,38	0,49	3,00
	C	0,40	0,38	0,42	2,60
Roma Genova Foggia	D	0,36	0,32	0,36	2,40
Milano	E	0,34	0,30	0,33	2,20
	F	0,33	0,29	0,32	2,00

Le porzioni vetrate delle finestre non sono protette da schermature solari esterne ed sono caratterizzato da un fattore solare di 0,70. La Capacità termica specifica dell'edificio di riferimento è di 50 Wh m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> e la Permeabilità all'aria dell'involucro, così come definita dalla SIA 180 [7], è di 5,0 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>. I carichi interni seguono i programmi orari giornalieri indicati nella figura 2.

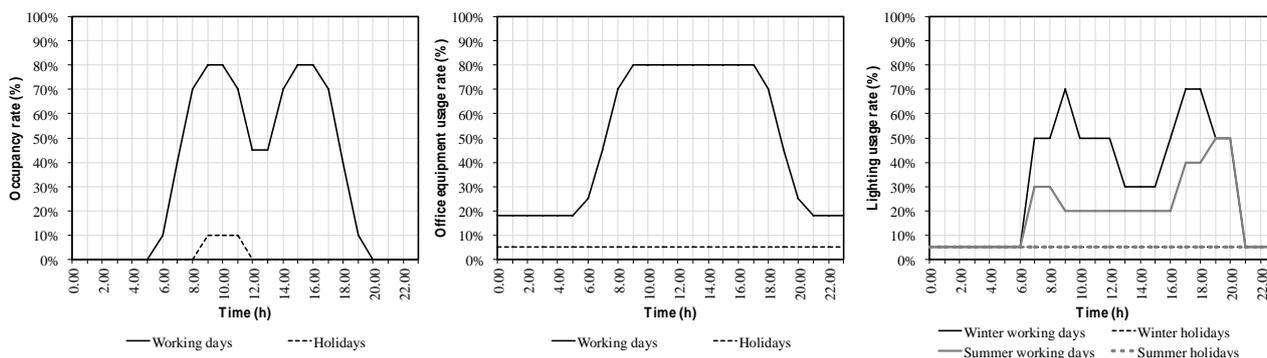


Figura 2 - Programmi orari giornalieri della densità occupativa, della percentuale di utilizzo dell'apparecchiatura elettrica e della percentuale di utilizzo dell'illuminazione artificiale.

Durante le simulazioni energetiche, le finestre vengono aperte per consentire la ventilazione notturna, tra le 8:00 e le 7:00, se, in una certa ora, la temperatura dell'aria esterna è inferiore alla temperatura dell'aria interna.

## I contesti climatici analizzati

Italia è generalmente considerata un Paese in clima mediterraneo. Tuttavia l'Italia ha una topologia variabile di monti e piani che si estende per 1.500 km da nord a sud ed è soggetta a variazioni climatiche notevoli. Il DPR 412:1993 introduce 6 zone climatiche invernali definite come intervalli di gradi giorno calcolati rispetto ad una temperatura di riferimento di 20 °C. La Zona A (<600 GG) è la più calda e la Zona F è la più fredda (> 3000 GG).

Anche se la varietà clima è molto notevole anche durante il periodo estivo, la normativa di riferimento non prevede una zonizzazione del territorio nazionale sulla base della forzante climatica estiva. Pertanto si è deciso di sviluppare l'analisi per le condizioni climatiche di 5 città: Milano, Genova, Roma, Foggia e Palermo. La tabella 4 mostra le caratteristiche principali di questi climi. Le simulazioni sono state effettuate utilizzando i file climatici in formato EPW prodotti a partire dai dati IWECC.

Tabella 4 – principali caratteristiche del periodo 1 Giugno – 31 Agosto estratti dal file STAT dei dati IWECC delle città identificate.

Città	Zona climatica estiva (CNR)	Gradi giorno estivi	Temp. Dell'aria media oraria [°C]	Temp. Dell'aria oraria massima [°C]	Escursione media giornaliera [°C]	Velocità del vento media [m s <sup>-1</sup> ]	Umidità relativa media [%]	Irradianza solare media [Wh m <sup>-2</sup> ]
Palermo	1	842	25,1	34,0	4,0	3,3	74%	6471
Foggia	3	2595	23,9	38,0	11,7	3,3	58%	4427
Roma	3	568	23,3	31,8	7,5	3,3	75%	4918
Genova	4	287	23,5	31,0	4,0	2,4	72%	4222
Milano	7	482	21,7	32,6	8,9	1,0	71%	4855

## Indici di discomfort di lungo periodo proposti dalla UNI EN 15251

Al fine di valutare la prestazioni in termini di comfort termico dei modelli numerici non raffrescati meccanicamente, abbiamo utilizzato gli indici di discomfort proposti dalla UNI EN 15251 nell'allegato F:

- la percentuale di ore al di fuori dell'intervallo di comfort (metodo A, nelle due varianti, Fanger e adattivo);
- il criterio dei gradi-ora (metodo B, nelle due varianti, Fanger e adattivo);
- il criterio del PPD pesato (metodo C, applicabile solo utilizzando il modello di Fanger).

Per maggiori informazioni si rimanda a [10].

### Metodo A: La percentuale di ore al di fuori dell'intervallo di comfort

La Percentuale di fuori dell'intervallo di comfort (POR) è stata dapprima introdotta dalla norma ISO 7730 [11] e, quindi, riproposta dalla UNI EN 15251. Questo metodo richiede di calcolare la percentuale di ore di occupazione quando la temperatura operativa interna o il voto medio previsto (PMV) ricadono al di fuori di un determinato intervallo di comfort definito in base alla specifica categoria comfort individuata [12].

$$POR \equiv \frac{\sum_{i=1}^{Oh} wf_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^{Oh} h_i} \in [0;1] \quad (1)$$

È, pertanto, applicabile sia al modello di comfort di Fanger, sia al modello adattivo. Quando si fa riferimento al modello di Fanger, l'intervallo di comfort è espresso in termini di PMV. In questo caso, l'indice può essere indicata con  $POR_{Fanger, PMV}$ :

$$POR_{Fanger, PMV} = f(wf_i) : \begin{cases} wf_i = 1 \Leftrightarrow (PMV < PMV_{lower\ limit}) \vee (PMV > PMV_{upper\ limit}) \\ wf_i = 0 \Leftrightarrow (PMV_{lower\ limit} \leq PMV \leq PMV_{upper\ limit}) \end{cases} \quad (2)$$

Tuttavia, i limiti espressi in termini di PMV possono essere tradotti in temperatura operativa se si accettano determinate assunzioni relative al vestiario, all'attività metabolica, alla velocità dell'aria, all'umidità relativa e al rapporto tra la temperatura dell'aria interna a bulbo secco e le temperatura media radiante. In questo caso, l'indice può essere indicato con  $POR_{Fanger, \theta_{op}}$ :

$$POR_{Fanger, \theta_{op}} = f(wf_i) : \begin{cases} wf_i = 1 \Leftrightarrow (\theta_{op, actual\ PMV} < \theta_{op, lower\ PMV\ limit}) \vee (\theta_{op, actual\ PMV} > \theta_{op, upper\ PMV\ limit}) \\ wf_i = 0 \Leftrightarrow (\theta_{op, lower\ PMV\ limit} \leq \theta_{op, actual\ PMV} \leq \theta_{op, upper\ PMV\ limit}) \end{cases} \quad (3)$$

Quando, invece, si fa riferimento al modello di comfort adattivo, l'intervallo di comfort è espresso in termini di temperatura operativa. In questo caso, l'indice può essere indicato con  $POR_{Adaptive}$ :

$$POR_{Adaptive} = f(wf_i) : \begin{cases} wf_i = 1 \Leftrightarrow (\theta_{op, in} < \theta_{op, lower\ limit}) \vee (\theta_{op, in} > \theta_{op, upper\ limit}) \\ wf_i = 0 \Leftrightarrow (\theta_{op, lower\ limit} \leq \theta_{op, in} \leq \theta_{op, upper\ limit}) \end{cases} \quad (4)$$

Questo indice è anche accompagnato da una proposta di soglia massima per il discomfort ammissibile, infatti la UNI EN 15251 stabilisce che: *"The parameter in the rooms representing 95% of the occupied space is not more than as example 3% (or 5%) of occupied hours a day, a week, a month and a year outside the limits of the specified category"*.

La Percentuale di ore al di fuori dell'intervallo di comfort è un metodo semplice da applicare e permette un facile confronto delle prestazioni di comfort di diversi edifici in climi diversi. Tuttavia però, non fornisce informazioni sulla severità delle condizioni di discomfort ed è affetta da una discontinuità causata dalla presenza del limite delle categorie di comfort che non ha corrispondenza né fisica, né fisiologia.

## Metodo B: Il criterio dei gradi giorno

Il criterio dei gradi giorno (DhC) è stato introdotto dalla ISO 7730 e successivamente è stato incluso con alcune modifiche nella UNI EN 15251. Secondo questo metodo, le ore durante del periodo di occupazione durante le quali la temperatura operativa interna supera i limiti dell'intervallo di comfort sono ponderate per un fattore,  $wf$ , che dipende dal modulo della differenza tra temperatura operativa interna,  $\theta_{op}$  (ad una certa ora) e il limite inferiore o superiore,  $\theta_{op, limite}$ , di uno specifico intervallo di comfort. Se l'intervallo di comfort è espresso in termini di PMV, i limiti possono essere tradotti in temperatura operativa attraverso opportune ipotesi circa la resistenza termica del vestiario, l'attività metabolica, la velocità dell'aria, l'umidità relativa e il rapporto tra la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante.

Il fattore di peso,  $wf$ , ha due diverse formulazioni secondo le due norme:

$$wf_{i|Fanger}^{ISO\ 7730} \equiv 1 + \frac{|\theta_{op,i} - \theta_{op,limit}|}{|\theta_{op,comfort} - \theta_{op,limit}|} \quad (5)$$

$$wf_{i|Fanger}^{EN\ 15251} \equiv |\theta_{op,i} - \theta_{op,limit}| \quad (6)$$

La formulazione della norma ISO (i) penalizza la ricorrenza dei superamenti, poiché, assumendo due situazioni caratterizzate dallo stesso numero totale di gradi fuori dell'intervallo di comfort, ma

diversamente distribuite nel tempo, la situazione caratterizzata da più ore di discomfort ha un valore più elevato dell'indice e (ii) stima il discomfort in funzione dell'ampiezza dell'intervallo di comfort che dipende dalla categoria comfort selezionata; cioè il valore dell'indice è indirettamente proporzionale rispetto alla semi-ampiezza dell'intervallo di comfort (denominatore), in tal modo, per uno stesso numero di gradi di sfornamento (numeratore), questo indice di discomfort è maggiore in quelle situazioni in cui è richiesta una minore fluttuazione della temperatura operativa, per esempio per edifici che ricadono nella Categoria I. Al contrario, la formulazione EN definisce il fattore di peso come la somma dei gradi-ora di sfornamento della temperatura operativa al di fuori dei limiti di una determinata categoria di comfort. Quest'ultima formulazione può essere facilmente estesa anche al modello di comfort adattivo.

$$wf_i^{EN\ 15251}_{Adaptive} \equiv |\theta_{op,i} - \theta_{op,limit}| \quad (7)$$

Per un determinato periodo (anno, stagione, ...), l'indice è calcolato sommando i prodotti del fattore di peso per l'intervallo temporale usato (usualmente l'ora).

$$DhC \equiv \sum_{i=1}^{Oh} wf_i \cdot h_i \in [0; +\infty[ \quad (8)$$

Per entrambe le norme durante il periodo caldo, la sommatoria è estesa esclusivamente a quelle ore del periodo di occupazione quando la temperatura operativa interna è maggiore del limite superiore dell'intervallo di comfort specificato. Allo stesso modo durante il periodo, la sommatoria è estesa solo a quelle ore in cui la temperatura operativa interna è minore del limite inferiore dell'intervallo di comfort specificato.

$$DhC_{warm\ period} = f(wf_i) : \begin{cases} wf_i > 0 \Leftrightarrow (\theta_{op,i} > \theta_{op,upper\ limit}) \\ wf_i = 0 \Leftrightarrow (\theta_{op,i} \leq \theta_{op,upper\ limit}) \end{cases} \quad (9)$$

$$DhC_{cold\ period} = f(wf_i) : \begin{cases} wf_i > 0 \Leftrightarrow (\theta_{op,i} < \theta_{op,lower\ limit}) \\ wf_i = 0 \Leftrightarrow (\theta_{op,i} \geq \theta_{op,lower\ limit}) \end{cases} \quad (10)$$

## Metodo C: Il criterio del PPD pesato

Il criterio del PPD pesato è disponibile solo per il modello di comfort di Fanger e assume che il tempo durante il quale in PMV sfora i limiti delle categorie di comfort espresse in termini di PMV siano pesati attraverso un fattore di peso  $wf_i$ . Quindi, l'indice viene calcolato sommando ora per ora il prodotto di  $wf_i$  per l'intervallo temporale.

$$PPDwC \equiv \sum_{i=1}^{Oh} wf_i \cdot h_i \in [0; +\infty[ \quad (11)$$

la valutazione del discomfort nei periodi caldo e freddo sono separati.

$$\begin{cases} PPDwC_{warm\ period} = f(PPD) \Leftrightarrow (PMV > PMV_{upper\ limit}) \\ PPDwC_{cold\ period} = f(PPD) \Leftrightarrow (PMV < PMV_{lower\ limit}) \end{cases} \quad (12)$$

dove  $PMV_{lower\ limit}$  e  $PMV_{upper\ limit}$  sono rispettivamente il limite inferiore e superiore di un certo intervallo di comfort. Tuttavia il calcolo del  $wf_i$  è diverso nella UNI EN 15251 e ISO 7730:

$$PPDwC^{EN\ 15251} = f(wf_i) : \begin{cases} wf_i \equiv \frac{PPD_{actual\ PMV,i}}{PPD_{PMV\ limit}} \Leftrightarrow (PMV > PMV_{upper\ limit}) \\ wf_i = 0 \Leftrightarrow (PMV_{lower\ limit} \leq PMV \leq PMV_{upper\ limit}) \\ wf_i \equiv \frac{PPD_{actual\ PMV,i}}{PPD_{PMV\ limit}} \Leftrightarrow (PMV < PMV_{lower\ limit}) \end{cases} \quad (13)$$

$$PPD_{wC}^{ISO 7730} = f(wf_i) : \begin{cases} wf_i \equiv \frac{PPD_{actual PMV,i}}{PPD_{PMV limit}} \Leftarrow (|PMV| > |PMV_{limit}|) \\ wf_i = 1 \Leftarrow (PMV = PMV_{limit}) \end{cases} \quad (14)$$

Una caratteristica interessante di questo indicatore (in entrambe le versioni) è che esso tiene in considerazione il PPD e la valutazione sul lungo periodo del discomfort termico è calcolata come la somma del PPD orario pesato rispetto al valore limite del PPD di una certa categoria di comfort.

## Discussione dei risultati

Tutte le 54 varianti del modello numerico descritto sono state simulate nei 5 contesti climatici selezionati. Quindi sono stati calcolati i seguenti indici di discomfort di lungo periodo:

- il criterio del PPD pesato (metodo C),
- Il criterio dei gradi giorno (metodo B),
- la percentuale di ore fuori dall'intervallo del modello di comfort di Fanger relativo alla categoria II (metodo A, Fanger)
- la percentuale di ore fuori dall'intervallo del modello di comfort adattivo relativo alla categoria II (metodo A, Adattivo).

Il metodo C e il metodo B, nella versione adattiva, sono stati applicati senza considerare il discomfort causato durante il periodo di occupazione, quando la temperatura operativa interna scende al di sotto del limite inferiore dell'intervallo di comfort (anche indicati col termine sottoraffreddamento). Anche il metodo B nella versione di Fanger è stato calcolato, ma non viene mostrato di seguito, perché ha restituito dei risultati molto simili a quelli forniti dal metodo C.

Abbiamo sviluppato un foglio elettronico che calcola PMV conoscendo i risultati della simulazione dinamica (temperatura dell'aria e media radiante, velocità dell'aria e umidità relativa) e assumendo valori prestabiliti relativi alla resistenza termica dell'abbigliamento, all'attività metabolica. Questo permette una maggiore flessibilità, poiché partendo dai dati relativi alle temperature e umidità relative calcolate in certo modello e variando attraverso un'analisi di sensitività i valori della resistenza dell'abbigliamento, dell'attività metabolica e della velocità dell'aria, si può direttamente calcolare il valore del PMV e quindi del PPD al fine di stimare l'influenza di una certa variabile sulla percezione stimata del discomfort nell'ambiente interno.

Nei risultati presentati di seguito, si è assunto un'attività metabolica di 1,2 met corrispondente ad un lavoro sedentario e una resistenza dell'abbigliamento di 1,0 clo compatibili con il caso simulato di un edificio per uffici sito in località italiane sono spesso in vigore in modo esplicito dei codici di abbigliamento.

Si riportano tutti i risultati calcolati per tutte le varianti analizzate. Nei grafici che seguono, ogni variante di edificio viene indicata con il codice identificativo usato nella Tabella 2. I significati delle abbreviazioni sono:

- Uv : trasmittanza termica,
- AP : Permeabilità all'aria,
- TM : Massa termica,
- SF : Fattore solare,
- NV : Ventilazione naturale.

I risultati di ogni variante simulata sono stati ordinati in tutti i grafici che seguono per valori decrescenti del criterio del PPD pesato.

Milano

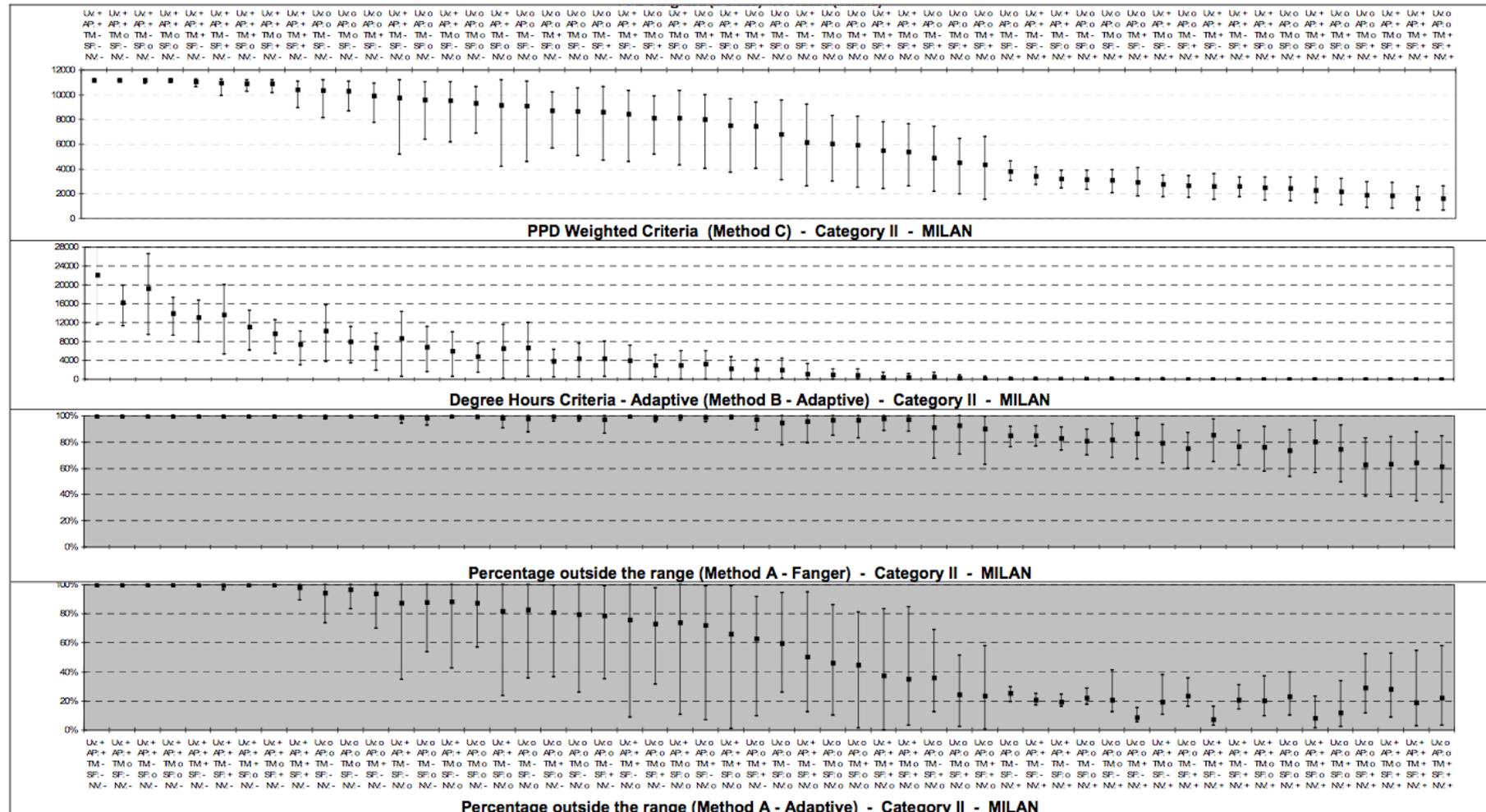


Figura 3 – Indicatori di discomfort di lungo periodo calcolati per Milano.

Genova

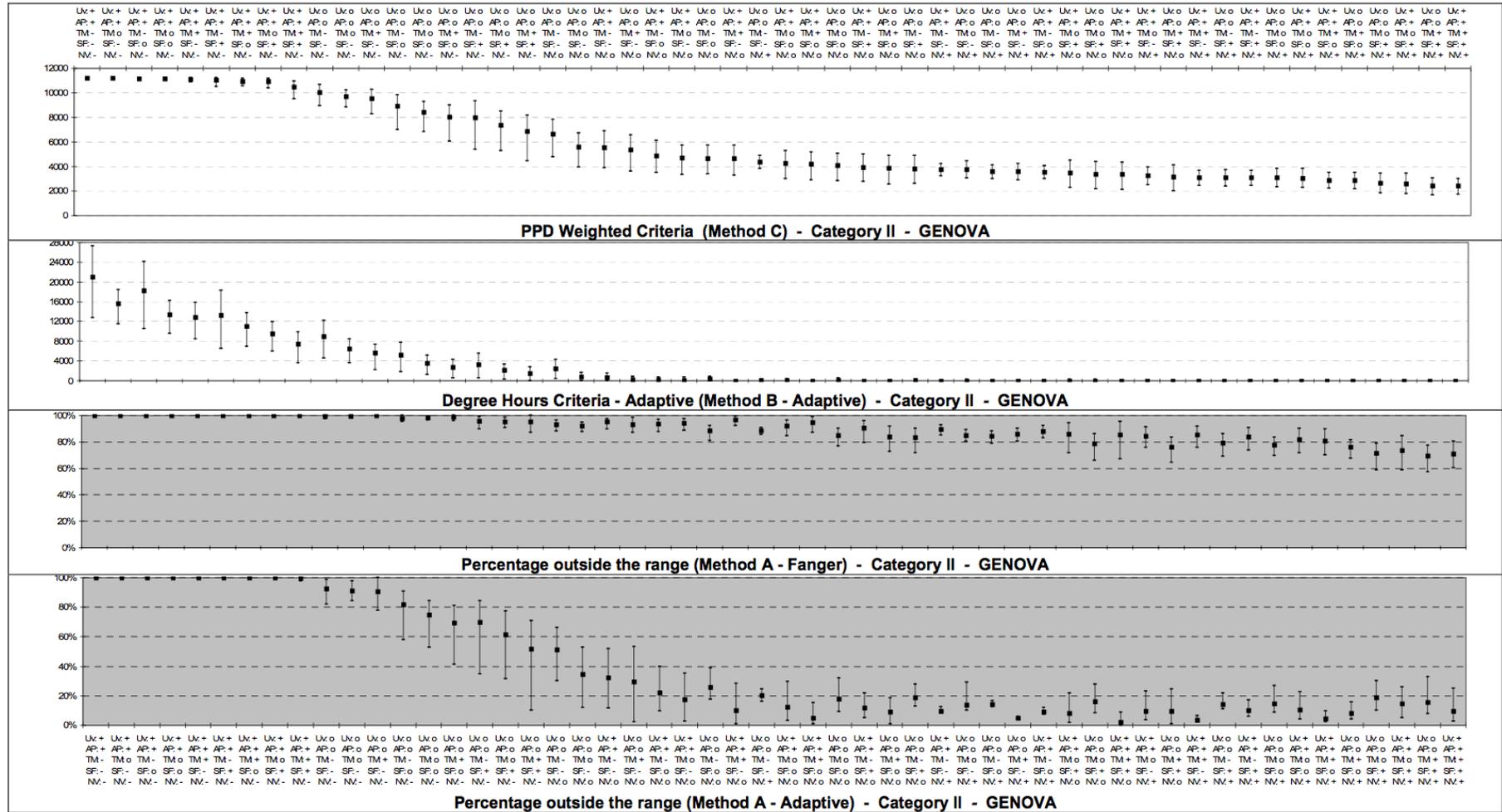


Figura 4 – Indicatori di discomfort di lungo periodo calcolati per Genova.

Roma

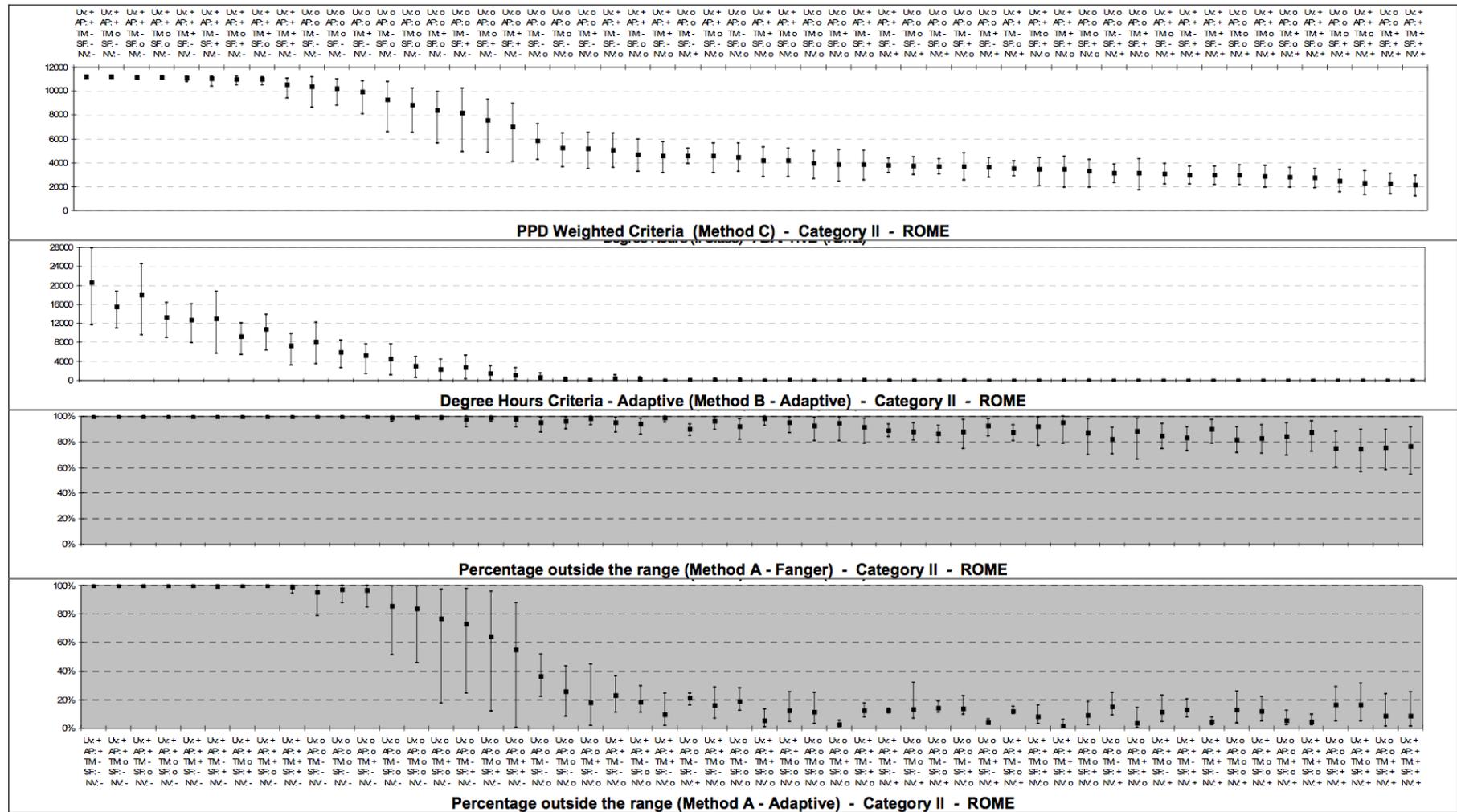


Figura 5 – Indicatori di discomfort di lungo periodo calcolati per Roma.

Foggia

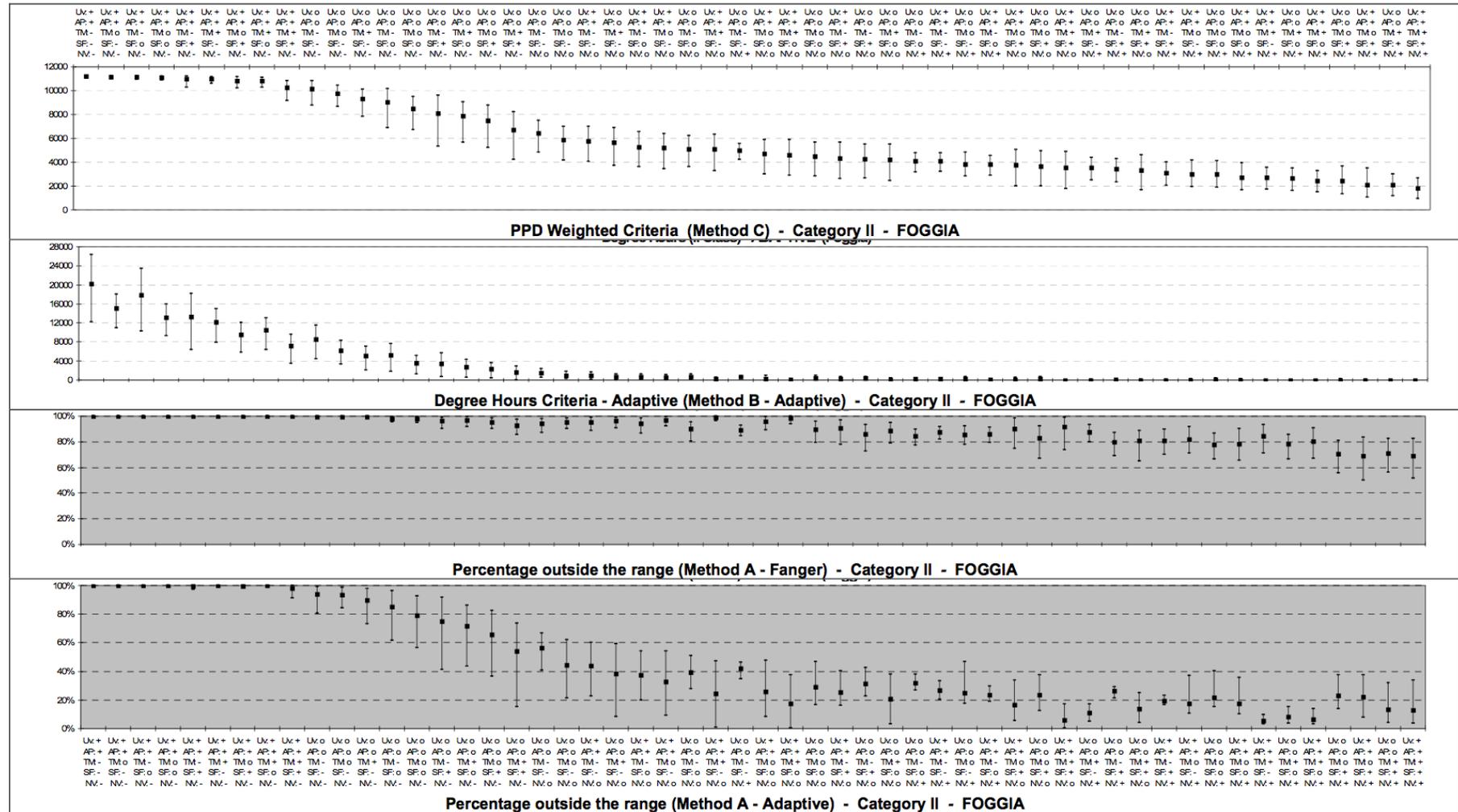


Figura 6 – Indicatori di discomfort di lungo periodo calcolati per Foggia.

Palermo

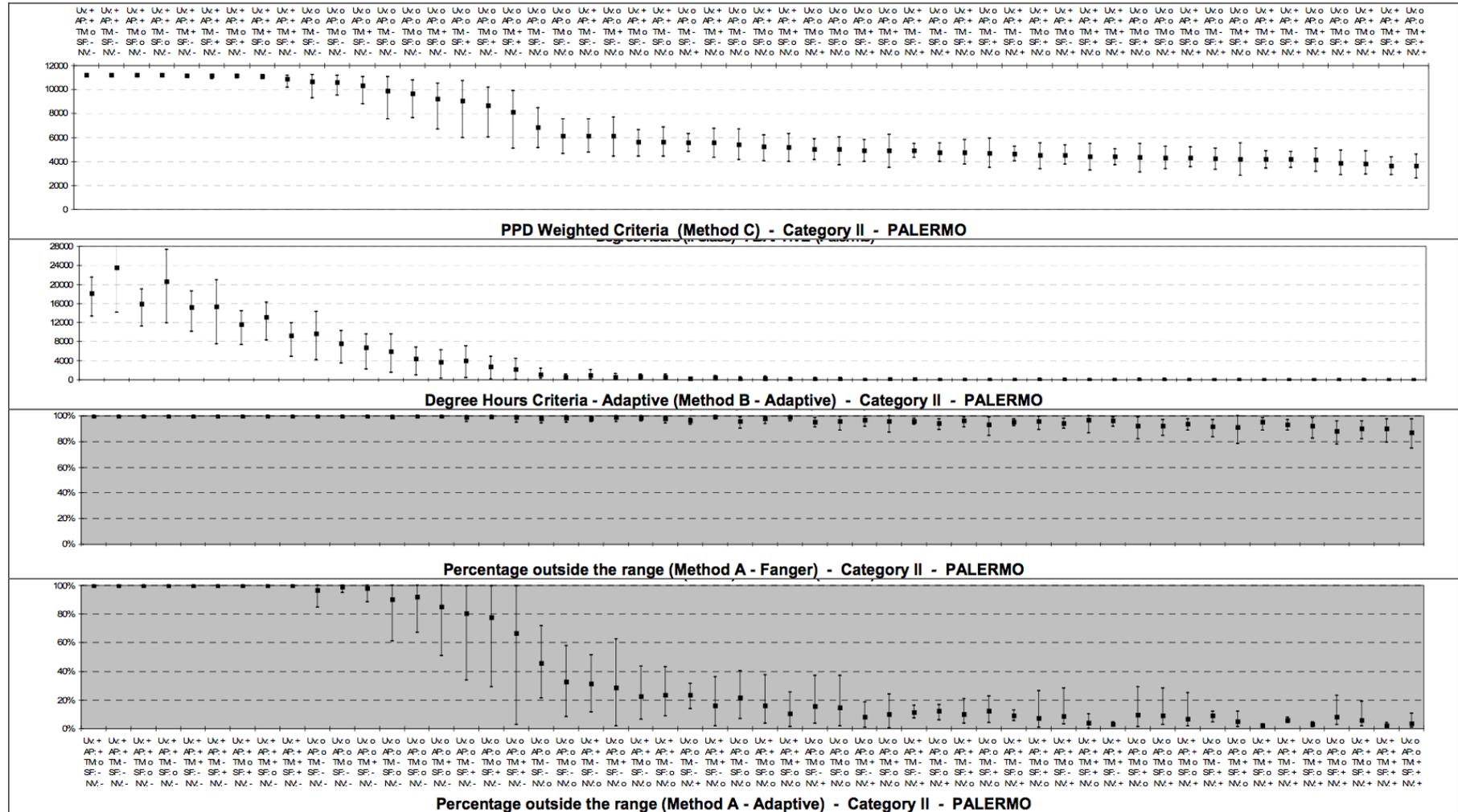


Figura 7 – Indicatori di discomfort di lungo periodo calcolati per Palermo.

## Surriscaldamento e sottoraffreddamento

Gli indicatori di lungo periodo calcolati a partire dagli output delle simulazioni dinamiche forniscono risultati che differiscono anche significativamente. Pertanto si ritiene opportuno discutere gli andamenti al fine di individuarne le principali caratteristiche.

Come già menzionato, la norma UNI EN 15251 [2] specifica che: *“The temperature limits presented in A.2 [ndr: Adaptive comfort range] should be used for the dimensioning of passive means to prevent overheating in summer conditions. Dimensioning and orientation of windows, dimensioning of solar shading and the thermal capacity of the building’s construction. Where the adaptive temperature limits presented in A.2 (upper limits) cannot be guaranteed by passive means mechanical cooling is unavoidable. In such cases the design criteria for buildings WITH mechanical cooling should be used”*.

In altre parole, la norma suggerisce al progettista di ottimizzare l’orientamento dell’edificio e la progettazione delle finestre, delle schermature solari e delle caratteristiche termiche di un edificio facendo riferimento prima ai limiti di comfort proposti insieme al modello di comfort adattivo e solo se non si riesca a soddisfare tali requisiti, diventa indispensabile l’installazione di sistemi meccanici per il raffrescamento. In questi ultimi casi, secondo la norma, si deve fare riferimento al modello di comfort proposto da Fanger [3]. Con riferimento agli indicatori di discomfort di lungo periodo, la frase della UNI EN 15251 può essere esplicitata introducendo una procedura di ottimizzazione che permette, in prima battuta, di individuare i parametri dell’edificio che minimizzano uno degli indici di discomfort di lungo periodo costruito sul modello adattivo e se non si riesce a confinare il discomfort termico entro i limiti previsti dalla norma, si è costretti a prevedere l’installazione di un impianto di raffrescamento meccanico, che comporta il passaggio al modello di comfort di Fanger. Quindi si possono individuare quei parametri dell’edificio che minimizzano un indice di discomfort di lungo periodo costruito sul modello di Fanger.

Tuttavia questo cambiamento di modello di comfort di riferimento può introdurre una discontinuità, cioè in linea teorica, la combinazione dei parametri dell’edificio (resistenza termica dell’involucro edilizio, massa termica, permeabilità all’aria, fattore solare, ...) che minimizza il valore di un certo indicatore di discomfort costruito sul modello adattivo, può non essere la configurazione che minimizza al contempo anche un altro indicatore costruito sul modello di Fanger; questo porrebbe in difficoltà il progettista poiché avrebbe il problema di “scegliere” quale combinazione di valori sia la migliore.

A tal fine, si è cercato nelle configurazioni analizzate se ci sono dei casi che mostrano questo tipo di discontinuità.

La UNI EN 15251 specifica che il metodo C e il metodo B devono essere applicati senza considerare il discomfort causato da ore in cui le temperature sono al di sotto del campo del comfort, durante il periodo caldo. Invece il metodo A, sia nella versione basata sul modello di Fanger, sia in quella basata sul modello adattivo, prevede che sia considerato anche l’effetto del sottoraffreddamento durante il periodo caldo (o periodo estivo).

Facendo riferimento al metodo A, se si cerca di aumentare le ore occupate durante le quali le condizioni dell’ambiente interno ricadono all’interno delle categorie I e II, l’indicatore costruito sul modello adattivo assume valori molto prossimi allo zero, mentre le stesse configurazioni sono caratterizzate da alti valori dell’indicatore costruito sul modello di Fanger.

Quindi i due indicatori nonostante siano caratterizzati dalla stessa struttura analitica forniscono differenti indicazioni progettuali.

Ma si verifica anche un altro fenomeno: alcune configurazioni sono caratterizzate da bassi valori dell’indice costruito sul modello di Fanger, ma sono caratterizzate da alti valori dell’indice costruito sul modello adattivo. Una spiegazione ragionevole di questo fenomeno consiste nel fatto che un certo numero di ore sono caratterizzate da condizioni che fanno sì che l’ambiente interno rispetti i limiti di comfort definiti dal modello di Fanger, ma poiché i limiti di questo modello sono più bassi di quelli del modello adattivo (Figura

8), queste stesse ore siano viste dal punto di vista dell'indicatore costruito sul modello adattivo come ore di sottoraffreddamento e cioè di discomfort. Questo fenomeno è particolarmente evidente in quelle varianti di edificio caratterizzate da un'alta ventilazione naturale e da un'alta massa termica.

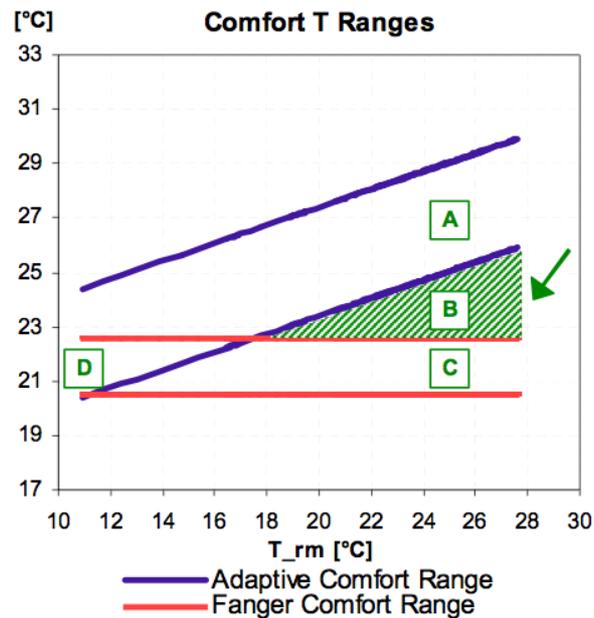


Figura 8 – Confronto tra gli intervalli di comfort del modello di Fanger (note alcune ipotesi) e modello adattivo relativi alla categoria II.

Con riferimento alla Figura 8, nella regione D, l'intervallo di comfort secondo il modello adattivo coincide con il modello di Fanger. La regione C rappresenta invece condizioni che sono di comfort secondo il modello di Fanger e sono invece di sottoraffreddamento per il modello adattivo. La regione A rappresenta condizioni che sono di comfort secondo il modello adattivo e sono invece di surriscaldamento per il modello di Fanger. La regione B è ambigua poiché secondo il modello di Fanger ospita condizioni di surriscaldamento e al contempo rispetto al modello adattivo ospita condizioni di sottoraffreddamento. Pertanto esiste una certa discontinuità nella procedura di ottimizzazione se cambia il modello di comfort. Sarebbe quindi necessario individuare un qualche indicatore di discomfort di lungo periodo che non risenta del cambiamento del modello di comfort, ma che sia in grado di fornire delle valutazioni delle varianti di edificio similari sia utilizzando il modello di Fanger che il modello adattivo.

Un aspetto interessante è quello di investigare una possibile soluzione per controllare l'eccessivo raffreddamento nelle ore precedenti al mattino caratterizzate da sottoraffreddamento secondo il modello adattivo, che può consistere nella riduzione del flusso d'aria notturno che raffredda fin troppo la massa termica dell'edificio. Questo può essere ottenuto attraverso un sensore di temperatura operativa che sia in grado di controllare l'apertura delle finestre. Al contrario, la riduzione della tasso di ventilazione notturna in modo generalizzato (piuttosto che controllato) può ridurre o evitare l'insorgenza del sottoraffreddamento nelle prime ore del mattino, ma, al tempo stesso, è molto probabile che aumenti il numero di ore in cui si verificano fenomeni di surriscaldamento.

Lo stesso effetto si ottiene se, pur non cambiando il tasso di ventilazione notturna, si riduce l'efficacia della protezione solare delle superfici trasparenti (figura 9). Infatti, il numero di punti che appartengono alla regione G diminuiscono, ma aumentano sensibilmente i punti nella regione E.

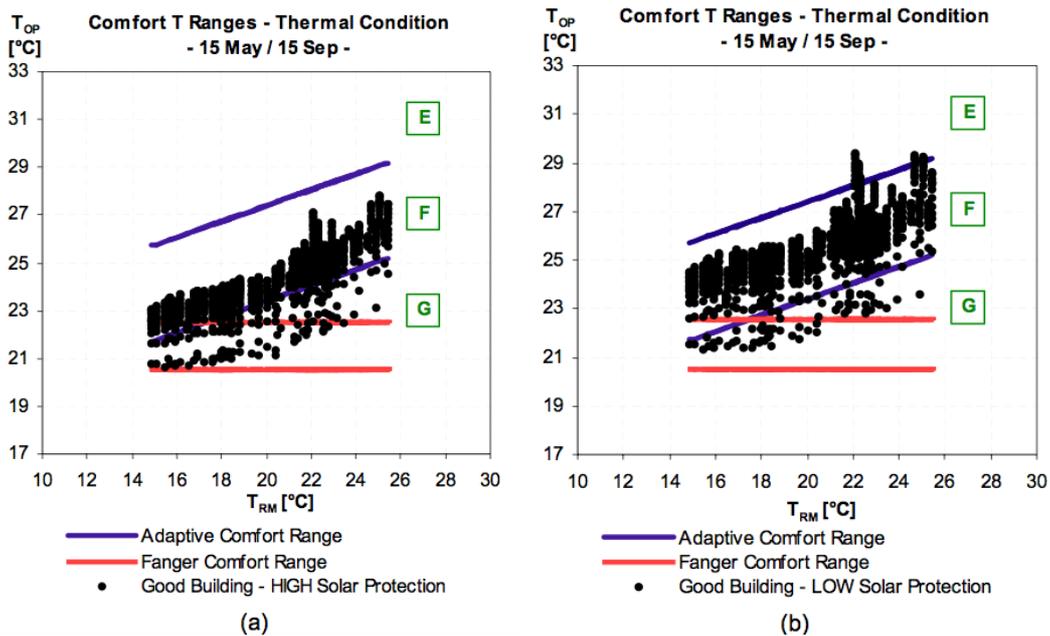


Figura 9 – I punti neri rappresentano le condizioni termiche medie, calcolate per lo stesso edificio caratterizzato da buone proprietà termiche (elevato isolamento termico e massa termica, elevati tassi di ventilazione notturna), passando da una variante con alta protezione solare (a) ad una variante con bassa protezione solare (b).

**Analisi di sensitività**

Un’analisi di sensitività è stata eseguita al fine di stimare l’influenza di alcuni parametri e delle diverse condizioni climatiche, sugli indici calcolabili attraverso il metodo C e il metodo B nella versione adattativa. I potenziali di riduzione delle condizioni di discomfort sono stati calcolati sottraendo al valore dell’indice della variante peggiore, il valore dell’indice della variante migliore. La figura 6 mostra che secondo il criterio dei gradi giorno costruito sul modello adattivo, attraverso le varianti proposte, si può ottimizzare l’edificio in modo da eliminare le condizioni di discomfort. Invece il criterio del PPD pesato indica che la migliore variante e la peggiore vi è un forte margine di miglioramento delle condizioni ambientali interne, ma non è possibile evitare l’insorgenza di alcune condizioni di discomfort (Figura 10).

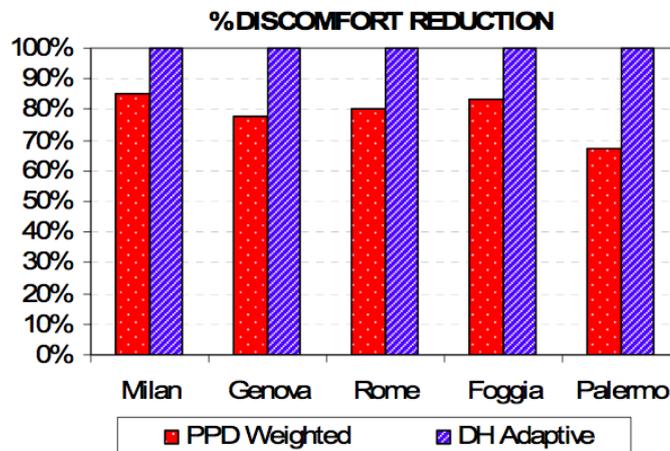


Figura 10 – Potenziali di riduzione del discomfort, valutati secondo il criterio del PPD pesato (metodo C) e il criterio dei gradi giorno (metodo B).

Abbiamo anche confrontato dei gruppi di modelli, caratterizzati dalla variazione di un solo parametro, mentre tutti gli altri erano mantenuti costanti. In questo modo, si può stimare l'intervallo di influenza di ogni parametro rispetto alle condizioni di comfort previste da un certo specifico modelli di comfort. La tabella 5 e la figura 11 riassumono le percentuali massime e minime di riduzione del discomfort relative alla variazione di ciascun parametro.

Tabella 5 – Percentuale di riduzione degli indici di discomfort relativi alla Categoria II, per la variazione di ogni parametro ed ogni contesto climatico.

		Thermal insulation		Air permeability		Thermal mass				Solar factor				Natural ventilation			
		Uv: from 0 to +		AP: from 0 to +		TM: from - to 0		TM: from 0 to +		SF: from - to 0		SF: from 0 to +		NV: from - to 0		NV: from 0 to +	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
MILAN	PPD Weighted	-37%	12%	-37%	12%	0%	29%	-1%	14%	0%	29%	1%	33%	11%	49%	47%	71%
	DH Adaptive	-229%	85%	-229%	85%	24%	64%	3%	100%	13%	100%	0%	85%	35%	95%	93%	100%
GENOVA	PPD Weighted	-52%	16%	-52%	16%	0%	17%	1%	7%	0%	29%	1%	20%	33%	68%	19%	34%
	DH Adaptive	-366%	100%	-366%	100%	-	76%	15%	100%	0%	100%	0%	100%	72%	100%	0%	100%
ROME	PPD Weighted	-48%	17%	-48%	17%	0%	24%	-1%	8%	0%	25%	1%	22%	43%	68%	16%	38%
	DH Adaptive	-	95%	-	95%	-531%	85%	13%	100%	13%	99%	27%	100%	90%	100%	0%	100%
FOGGIA	PPD Weighted	-52%	22%	-52%	22%	0%	33%	2%	12%	0%	25%	1%	25%	36%	65%	20%	48%
	DH Adaptive	-344%	100%	-344%	100%	26%	75%	18%	100%	12%	100%	0%	97%	82%	100%	57%	100%
PALERMO	PPD Weighted	-33%	12%	-33%	12%	0%	11%	0%	6%	0%	21%	0%	15%	35%	59%	10%	21%
	DH Adaptive	-314%	66%	-314%	66%	-55%	61%	-5%	90%	12%	83%	25%	87%	88%	100%	52%	92%

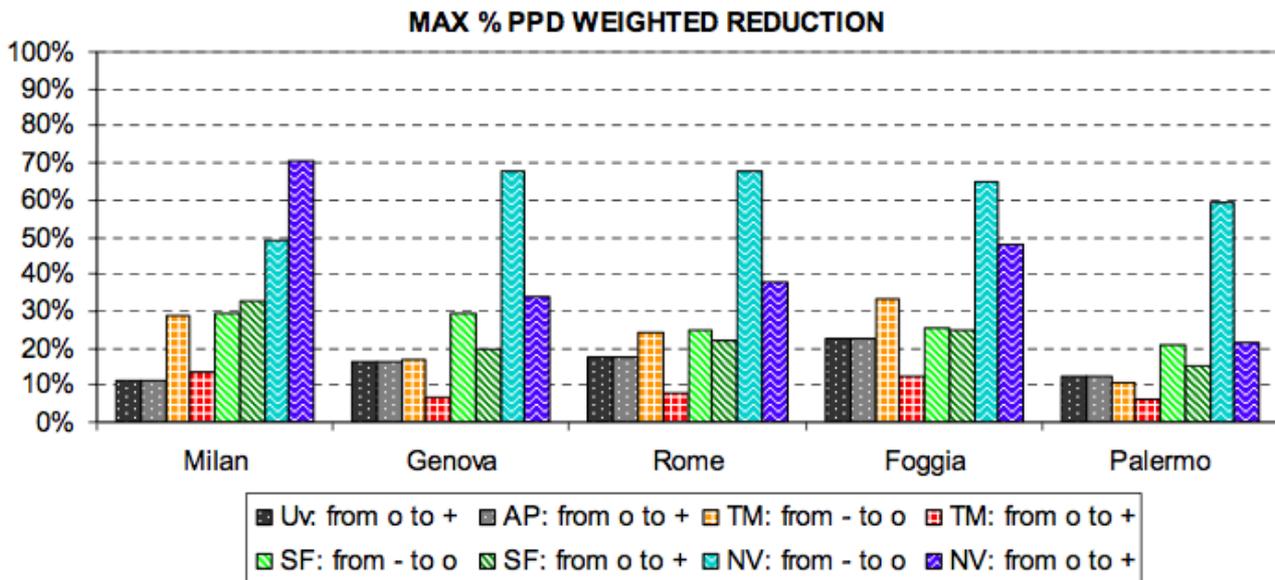


Figura 11 – Riduzioni del discomfort calcolate attraverso il criterio del PPD (metodo C).

La figura 11 suggerisce alcune osservazioni:

- la ventilazione naturale notturna è il parametro che maggiormente influenza le condizioni termiche;
- l'aumento dell'isolamento termico e la diminuzione della permeabilità all'aria dell'involucro può ridurre in estate il comfort interno, se le superfici vetrate non sono opportunamente schermate e se non è implementata una strategia di ventilazione notturna adeguata;
- una efficace protezione solare delle superfici trasparenti aumenta sempre il comfort durante i periodi estivi anche se il suo potenziale è minore di quello della ventilazione notturna (almeno nei climi individuati in questo lavoro);
- L'aumento della massa termica dà benefici in tutti i contesti climatici analizzati, tuttavia il valore più alto della massa termica proposto non fornisce i maggiori benefici. Anche a Palermo, sembra più efficace prevedere una massa termica di livello medio secondo i valori riportati nella tabella 1.

## Conclusioni

Gli indici di valutazione di lungo periodo sono utili strumenti per supportare l'ottimizzazione mirante alla riduzione del discomfort termico di un edificio. Tuttavia gli indicatori proposti dalla norma UNI EN 15251 restituiscono diversi risultati, a volte anche in contrasto, (1) a causa del fatto che alcuni considerano nella valutazione del discomfort solo il surriscaldamento ambientale, mentre altri anche il sottoraffreddamento, (2) se cambia il modello di comfort rispetto al quale vengono calcolati gli indicatori. Tutti gli indici analizzati in questo lavoro dipendono dalle categorie di comfort, ma sono disponibili in letteratura altri indici che invece non dipendono dalle categorie di comfort, ma magari solo da una temperatura fissa usata come estremo superiore della zona di comfort.

Invece sotto un profilo progettuale, l'analisi condotta ha permesso di identificare i parametri progettuali che maggiormente influenzano la valutazione del discomfort termico. In particolare si è individuato che la ventilazione naturale notturna è il parametro che maggiormente influenza le condizioni termiche dell'edificio e quindi ha il maggiore impatto sul comfort termico e un'efficace protezione solare delle superfici trasparenti aumenta sempre il comfort durante i periodi estivi anche se il suo potenziale è minore di quello della ventilazione notturna (almeno nei climi individuati in questo lavoro e per le geometrie considerate, in cui il rapporto superficie vetrata/superficie opaca non è troppo elevato).

L'aumento dell'isolamento termico e la diminuzione della permeabilità all'aria dell'involucro può ridurre in estate il comfort interno, ma solo se le superfici vetrate non sono opportunamente schermate e se non è implementata una strategia di ventilazione notturna adeguata. In generale evacuare i carichi termici estivi attraverso pareti meno isolate (e quindi peggiorarne il comportamento invernale) appare come una strategia errata quando questi carichi possono essere controllati con le protezioni solari e smaltiti efficacemente con la ventilazione notturna, con vantaggi dal punto di vista energetico e di comfort.

L'aumento della massa termica dà benefici in tutti i contesti climatici analizzati, con un beneficio marginale che si riduce all'aumentare della massa oltre certi valori.

## Riferimenti bibliografici

1. Parlamento e Consiglio dell'Unione europea, "European Directive 2002/91/CE – Energy performance of buildings", Brussels, Belgium, 2002.
2. 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
3. P.O. Fanger, Thermal Comfort, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
4. M.A. Humphreys, J.F. Nicol, Understanding the adaptive approach to thermal comfort, ASHRAE Transactions 104 (1) (1998) 991–1004.

5. Governo Italiano, "DLgs 311:2006 – Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia".
6. SIA, "SIA 382 – Installations de ventilation et de climatisation - Bases générales et performances requises", Geneva, Switzerland, 2007.
7. SIA, "SIA 180 – Isolation thermique des bâtiments", Geneva, Switzerland, 2009.
8. CEN, "EN ISO 13786 – Thermal performance of building components Dynamic thermal characteristics Calculation methods", European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2008.
9. D.B. Crawley, L.K. Lawrie, C.O. Pedersen, F.C. Winkelmann, M.J. Witte, R.K. Strand, R.J. Liesen, W.F. Buhl, Y.J. Huang, R.H. Henninger, J. Glazer, D.E. Fisher, D.B. Shirey III, B.T. Griffith, P.G. Ellis, L. Gu. EnergyPlus: New, Capable, and Linked. Journal of Architectural and Planning Research, 21:4 (Winter 2004).
10. ISO, "ISO 7730 – Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria", International Organization for Standardization, 2005.