

METODOLOGIA

OR 1. Misura delle prestazioni energetiche degli edifici e certificazione del retrofit in ottica NZEB

La U.O. UNISA ha collaborato con la U.O. UNICAS nella effettuazione del confronto tra le tecniche termoflussimetriche e quelle termografiche per la verifica dell'isolamento termico degli edifici esistenti, nella caratterizzazione metrologica di sensori di misura della temperatura media radiante e nella effettuazione di campagne di monitoraggio delle condizioni termoigrometriche. In particolare:

- OR 1a: la U.O. UNISA ha collaborato alle misure effettuate su diverse tipologie di involucro, in differenti condizioni ambientali di prova, utilizzando il metodo del misuratore del flusso di calore, noto come "termoflussimetro" (Heat Flow Meter, HFM).
- OR 1b: la ricerca è stata incentrata sulla possibilità di monitorare le condizioni termoigrometriche degli ambienti interni, con particolare riferimento alla temperatura media radiante sulla quale la U.O. UNISA ha già effettuato specifiche indagini metrologiche riportate in alcune pubblicazioni, anche in collaborazione con la unità UNICAS. La temperatura media radiante, da cui dipende fortemente la sensazione di comfort termico, viene generalmente calcolata a partire dal valore della temperatura di globotermometro. Utilizzando i prototipi dei globotermometri miniaturizzati progettati dalla U.O. UNICAS (OR 1.3), la U.O. UNISA ha confrontato i risultati ottenibili con 5 diversi globotermometri.
- OR 1c: la U.O. UNISA, in collaborazione con la U.O. UNICAS, ha effettuato una sperimentazione sulle condizioni di comfort termico di clienti e personale nelle aree refrigerate di quattro supermercati localizzati nel centro Italia. I risultati delle misurazioni, effettuate dalla U.O. UNICAS in diverse postazioni rappresentative di diverse condizioni termoigrometriche, secondo quanto riportato nella relazione UNICAS (OR 1.c), sono stati elaborati dalla U.O. UNISA. Per classificare gli ambienti termici come moderati o severi e distinguere questi ultimi in caldi e freddi, è stato utilizzato l'indice PMV secondo quanto previsto dalla norma UNI EN ISO 15265 (UNI, 2005a). Nel caso di ambiente moderato, sono poi stati calcolati gli indici di comfort globale PMV-PPD e i quattro indici di discomfort locale previsti dalla norma UNI EN ISO 7730 (UNI, 2006); per gli ambienti severi è stato valutato l'indice IREQ per il rischio globale, non sono state individuate postazioni rappresentative di ambienti severi caldi. Per effettuare i calcoli è stato utilizzato un software originale ad hoc.

OR 2. Misura della permeabilità all'aria e analisi dei suoi effetti sulla qualità dell'ambiente interno nel retrofit degli impianti di ventilazione degli edifici in ottica NZEB

La U.O. UNISA ha collaborato con la U.O. UNICAS nella verifica degli effetti di miglioramento ottenuti a seguito del retrofit della ventilazione sulle prestazioni energetiche e sulla qualità dell'aria in ambiente chiuso, con riferimento alle misure effettuate in un appartamento privato per effettuare il confronto tra i risultati ottenuti con la tecnica del Blower Door Test (BDT) e quelli ottenuti a partire dalla misura dei ricambi d'aria con la tecnica del gas tracciante. Per la metodologia si faccia riferimento a quanto presente nella relazione della U.O. UNICAS (OR 2.1 e OR 2.2).

OR 3. Misura delle prestazioni energetiche dell'impianto di illuminazione in interventi di retrofit in ottica NZEB

- OR 3a: la U.O. UNISA ha collaborato con la U.O. UNICAS per raccogliere i dati relativi alla profilazione dei consumi elettrici. Per la metodologia si faccia riferimento a quanto presente nella relazione della U.O.2 (OR3.3).
- OR 3b: partendo da recenti studi sulla interazione tra comfort termico e visivo condotti negli ultimi anni, la U.O. UNISA ha effettuato indagini di laboratorio mirate a verificare la possibilità di agire sulla sensazione termica variando la temperatura di colore delle sorgenti luminose. L'idea su cui si basano questi studi è che l'esposizione a radiazioni luminose il cui spettro è maggiormente ricco di lunghezze d'onda corte, le cosiddette luci fredde, indurrebbe una sensazione di fresco, mentre, viceversa, l'esposizione a luci calde determinerebbe una sensazione di caldo. L'obiettivo è stato dunque quello di verificare, tramite test sulle persone, la possibilità di garantire il comfort termico agendo non solo con gli impianti termotecnici, ma anche con quelli di illuminazione, opportunamente progettati e gestiti. A questo scopo, è stata realizzata una test room in un ufficio del Dipartimento di Architettura dell'Università di Napoli Federico II in cui sono stati installati degli apparecchi illuminanti incassati nel controsoffitto con sorgenti LED "white tuning" e gestiti, tramite protocollo DALI, da centralina elettronica che consente il setting e la memorizzazione di diversi scenari luminosi. Ciò ha consentito di modificare sia la temperatura di colore che il flusso luminoso emesso dalle sorgenti. La test room è stata inoltre equipaggiata con un sistema di climatizzazione a pompa di calore che permette un controllo ottimale delle condizioni microclimatiche in ambiente.

Allo scopo di valutare gli effetti di tali strategie progettuali sui consumi energetici dovuti all'impianto di illuminazione, sono state effettuate simulazioni di luce naturale e artificiale statiche e dinamiche riferite al laboratorio utilizzato per le analisi sperimentali. I consumi energetici legati all'illuminazione sono stati calcolati sia per un caso in cui sono state applicate le strategie progettuali, sia relativamente a una soluzione tradizionale, per la quale la temperatura di colore delle sorgenti è stata mantenuta sempre costante e uguale a 4000 K e la finestra non è schermata da tende colorate. Dal confronto tra i risultati ottenuti è stato possibile stimare l'incremento di energia richiesta dal sistema di illuminazione quando si attiva la strategia proposta. Tali risultati costituiranno una base per effettuare delle valutazioni globali, sia in termini di riduzione dei consumi che di incremento delle condizioni di comfort globale per gli occupanti, attraverso la definizione di opportuni criteri progettuali.

OR 4. Analisi del retrofit dei generatori in ottica NZEB

Considerato che il miglioramento dell'efficienza energetica degli impianti di riscaldamento prevede, tra l'altro, il miglioramento dei rendimenti di regolazione e tenuto conto della larga diffusione che i termostati "smart" hanno avuto in questi ultimi anni, uno degli obiettivi della U.O. UNISA è stato quello di realizzare un sistema di controllo intelligente e "connesso", utile a migliorare la regolazione del generatore di calore in ambito residenziale. Una delle peculiarità che contraddistinguono il sistema proposto è che è implementabile sull'enorme parco di caldaie esistente e, in particolare, su quelle di vecchia generazione, dotate di schede di controllo elementari e inabili a implementare logiche di controllo sofisticate o liberamente programmabili. Tutto ciò è stato realizzato garantendo l'economicità dell'"hardware" impiegato, dal momento che il sistema di controllo proposto è basato sulla ben nota scheda Arduino.

La seconda linea di ricerca perseguita è stata mirata a caratterizzare il rendimento di micro-cogeneratori a uso residenziale; per quanto essi, ad oggi, sono nel nostro paese ancora una rarità, si stima un potenziale di circa 50 milioni di utenti su base europea. Questi sistemi consentono una produzione combinata di energia termica ed elettrica in misura inferiore a 50 kW elettrici, secondo la classificazione del Dlgs 20/2007, che recepisce quanto previsto dalla direttiva europea 2004/8/CE sulla promozione della cogenerazione. Nel caso specifico, sono state caratterizzate le prestazioni, in termini di rendimenti termici ed elettrici, di un microgeneratore a gas basato su ciclo Stirling.

Metodologia di svolgimento

OR 1. Misura delle prestazioni energetiche degli edifici e certificazione del retrofit in ottica NZEB

- OR 1a: la U.O. UNISA ha collaborato con la U.O. UNICAS in alcune delle indagini termoflussimetriche e termografiche finalizzate a ottenere i valori delle grandezze di interesse necessari per confrontare i risultati ottenibili con le due tecniche; l'elaborazione dei risultati è stata poi svolta dalla U.O. UNICAS. Per maggiori dettagli si faccia riferimento alla relazione della U.O. UNICAS (OR2.1 e OR2.2).
- OR 1b: l'apparecchiatura sviluppata per le indagini metrologiche è stata progettata e realizzata da UNICAS, secondo quanto riportato nella relazione di quest'ultima U.O. (OR 1c) e testata da UNINA presso il Laboratorio di Microclima del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Napoli Federico II. L'apparecchiatura è costituita da due solenoidi sovrapposti, in tubo di rame, in cui viene inserito il globotermometro e da due dischi a chiusura dello stesso materiale in cui circola il fluido termovettore, come mostrato in Figura 1. Per variare la velocità dell'aria all'interno del volume di prova, è stata installata, al di sopra dell'apparecchiatura, una cappa dotata di ventilatore alimentato a tensione variabile. Nel corso della sperimentazione sono state monitorate: le temperature d'ingresso e di uscita dell'acqua proveniente dai bagni termostatici e circolante nei quattro elementi (cilindri e fondi) che delimitano il volume in cui è stato posto il globotermometro sottoposto a prova; la temperatura dell'aria misurata all'ingresso del volume di prova, nella mezzera e all'uscita; la velocità dell'aria in prossimità del globotermometro in prova.

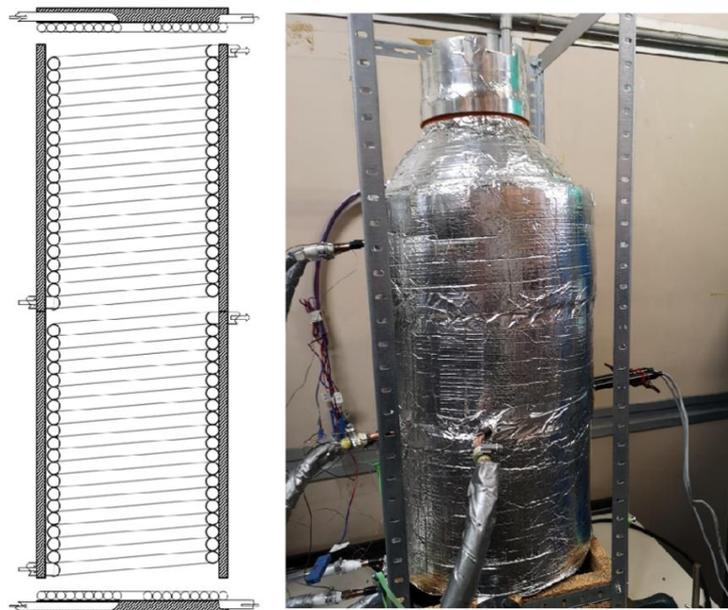


Figura 1 - Schema dell'apparecchiatura e prodotto finito.

Prima di essere installati sull'apparecchiatura, i sensori di temperatura sono stati calibrati per confronto su più punti con un termometro di riferimento a cura della U.O. UNICAS presso il LAMI, il Laboratorio di Misure Industriali dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale, accreditato dall'ente di accreditamento italiano.

Come temperatura media radiante di riferimento, con cui confrontare i valori calcolati tramite il globotermometro, è stata scelta la temperatura media della superficie interna del volume di prova che, almeno teoricamente, dovrebbe costituire una cavità isoterma. In prima approssimazione si è assunto che la media tra le temperature di ingresso e di

uscita dell'acqua di ciascuna sezione (disco, cilindro) rappresenti il valore medio della temperatura superficiale interna della sezione e calcolando il valore medio tra le varie sezioni è stato ottenuto un valore della temperatura superficiale interna del volume di prova, che rappresenta la media aritmetica delle temperature di ingresso e di uscita del fluido termovettore dai cilindri e dai fondi, come riportato in Tabella 1.

Utilizzando questo apparato è stato condotto un primo insieme di prove su globotermometri sferici, normalizzati e non, aventi le seguenti caratteristiche:

- un globotermometro non normalizzato di diametro pari a 50 mm (S1);
- un globotermometro non normalizzato di diametro pari a 38 mm (S2);
- due globotermometri standard di diametro pari a 150 mm (S3, S4);
- un globotermometro di dimensioni normalizzate, ma realizzato in materiale plastico (S6).

Tabella 1 - Calcolo della temperatura di riferimento per le diverse temperature dei bagni termostatici. Legenda: t_{dbi} : t ingresso acqua disco basso; t_{dbu} : t uscita dell'acqua dal disco basso; t_{dai} : t ingresso dell'acqua nel disco alto; t_{dau} : t uscita dell'acqua dal disco alto; t_{cbi} : t ingresso dell'acqua nel cilindro basso; t_{cbu} : t uscita dell'acqua dal cilindro basso; t_{cai} : t ingresso dell'acqua nel cilindro alto; t_{cau} : t uscita dell'acqua dal cilindro alto; $t_{db,m}$: t media del disco basso; $t_{da,m}$: t media del disco alto; $t_{cb,m}$: t media del cilindro basso; $t_{ca,m}$: t media del cilindro alto; $t_{dab,m}$: t media dei dischi; $t_{cab,m}$: t media dei cilindri; $t_{s,m}$: temperatura media della camera di prova.

| t_{bagno} | t_{dbi} | t_{dbu} | t_{dai} | t_{dau} | t_{cbi} | t_{cbu} | t_{cai} | t_{cau} | $t_{db,m}$ | $t_{da,m}$ | $t_{cb,m}$ | $t_{ca,m}$ | $t_{dab,m}$ | $t_{cab,m}$ | $t_{s,m}$ |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-----------|
| (°C) | (°C) | (m/s) | (°C) | (m/s) | (°C) | (°C) | (°C) | (°C) | (°C) |
| 10 | 10,8 | 10,9 | 10,9 | 10,8 | 11,4 | 11,3 | 11,3 | 11,5 | 10,8 | 10,9 | 11,4 | 11,4 | 10,8 | 11,4 | 11,1 |
| 20 | 20,1 | 20,1 | 20,2 | 20,2 | 21,0 | 21,0 | 21,0 | 21,0 | 20,1 | 20,2 | 21,0 | 21,0 | 20,2 | 21,0 | 20,6 |
| 30 | 29,7 | 29,6 | 29,7 | 29,8 | 30,6 | 30,8 | 30,8 | 30,6 | 29,6 | 29,7 | 30,7 | 30,7 | 29,7 | 30,7 | 30,2 |
| 40 | 39,3 | 39,0 | 39,1 | 39,3 | 40,3 | 40,5 | 40,7 | 40,2 | 39,1 | 39,2 | 40,4 | 40,4 | 39,2 | 40,4 | 39,8 |
| 50 | 48,9 | 48,4 | 48,6 | 48,9 | 49,9 | 50,3 | 50,5 | 49,8 | 48,7 | 48,7 | 50,1 | 50,2 | 48,7 | 50,1 | 49,4 |
| 60 | 58,4 | 57,8 | 58,0 | 58,3 | 59,6 | 60,0 | 60,3 | 59,3 | 58,1 | 58,2 | 59,8 | 59,8 | 58,1 | 59,8 | 59,0 |

Nelle Figure 2 e 3 sono riportate le immagini relative rispettivamente ai globotermometri sottoposti a prova e al posizionamento di un globotermometro nell'apparato.



Figura 2 - I cinque globotermometri sottoposti a prova.

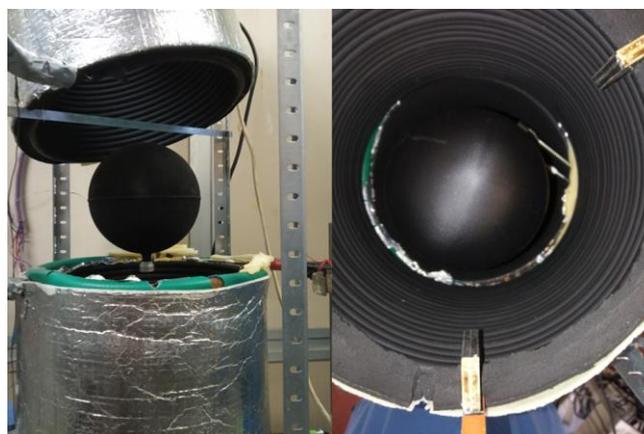


Figura 3 - Posizionamento dei globotermometri nell'apparecchiatura.

Le prove sono state condotte per temperature variabili tra 10 °C e 60 °C. Per ciascuna condizione di prova si è atteso che tutte le variabili monitorate raggiungessero una condizione di regime e, a quel punto, è stato dato il via al campionamento dei valori che avrebbero costituito il risultato della misura; la durata dell'acquisizione dei valori è stata pari a 10 min. Terminata la giornata di misura, si è provveduto a estrarre dai dati acquisiti i valori relativi agli intervalli ritenuti validi ai fini della prova, riportandoli su un foglio di lavoro Excel. Per ciascuna prova e ciascuna grandezza misurata sono stati poi calcolati il valore medio e la deviazione standard. In Tabella 2 è riportato, a titolo di esempio, un estratto del foglio di lavoro Excel (contenente i soli valori medi delle grandezze misurate).

Tabella 2 - Esempio dei risultati delle misure condotte sui globotermometri.

| Sens. | tbagno. (°C) | tai,m (°C) | va,m (m/s) | tbi (°C) | tbu (°C) | tai (°C) | tdu (°C) | tbi (°C) | tbu (°C) | tai (°C) | tdu (°C) | tgs1 (°C) | tgs2 (°C) | tgs3 (°C) | tgs4 (°C) | tgs6 (°C) | ts,m (°C) |
|-------|-----------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| S3 | 10 | 17,4 | 0,20 | 10,8 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 11,5 | 11,5 | 11,4 | 11,7 | | | 15,9 | | | 11,2 |
| S3 | 10 | 18,3 | 0,42 | 10,8 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 11,4 | 11,5 | 11,3 | 11,8 | | | 16,7 | | | 11,2 |
| S3 | 20 | 21,5 | 0,62 | 20,3 | 20,3 | 20,4 | 20,4 | 21,1 | 21,2 | 21,2 | 21,2 | | | 21,4 | | | 20,8 |
| S3 | 20 | 21,6 | 0,76 | 20,3 | 20,3 | 20,4 | 20,4 | 21,1 | 21,2 | 21,2 | 21,2 | | | 21,5 | | | 20,8 |
| S6 | 20 | 22,1 | 0,79 | 20,4 | 20,4 | 20,4 | 20,4 | 21,2 | 21,2 | 21,2 | 21,2 | | | | | 22,3 | 20,8 |
| S6 | 30 | 25,2 | 0,23 | 29,9 | 29,8 | 29,9 | 29,9 | 30,9 | 30,9 | 31,0 | 30,8 | | | | | 27,6 | 30,4 |
| S6 | 30 | 25,2 | 0,44 | 29,9 | 29,8 | 29,9 | 29,9 | 30,9 | 30,9 | 31,0 | 30,8 | | | | | 27,6 | 30,4 |
| S6 | 30 | 25,1 | 0,64 | 30,0 | 29,8 | 30,0 | 30,0 | 30,9 | 31,0 | 31,0 | 30,9 | | | | | 27,5 | 30,4 |
| S4 | 50 | 30,9 | 0,61 | 49,1 | 48,5 | 48,9 | 48,9 | 50,2 | 50,3 | 50,6 | 50,0 | | | | 37,5 | | 49,6 |
| S4 | 50 | 32,0 | 0,43 | 49,1 | 48,6 | 49,0 | 49,0 | 50,3 | 50,4 | 50,6 | 50,1 | | | | 39,1 | | 49,6 |
| S4 | 50 | 33,1 | 0,25 | 49,1 | 48,7 | 49,0 | 49,1 | 50,3 | 50,5 | 50,6 | 50,2 | | | | 40,8 | | 49,7 |
| S4 | 60 | 34,3 | 0,81 | 58,6 | 57,9 | 58,4 | 58,3 | 59,9 | 60,1 | 60,5 | 59,7 | | | | 42,8 | | 59,2 |
| S2 | 20 | 24,3 | 0,45 | 20,4 | 20,6 | 20,6 | 20,5 | 21,3 | 21,3 | 21,3 | 21,4 | | 24,0 | | | | 20,9 |
| S2 | 20 | 23,5 | 0,21 | 20,4 | 20,5 | 20,6 | 20,5 | 21,3 | 21,3 | 21,3 | 21,4 | | 23,5 | | | | 20,9 |
| S2 | 30 | 26,7 | 0,61 | 30,0 | 29,8 | 30,0 | 29,9 | 31,0 | 30,8 | 31,1 | 30,8 | | 27,2 | | | | 30,4 |
| S2 | 30 | 26,9 | 0,44 | 30,0 | 29,9 | 30,0 | 30,0 | 31,0 | 31,0 | 31,1 | 30,9 | | 27,6 | | | | 30,5 |
| S1 | 50 | 34,6 | 0,22 | 48,8 | 48,8 | 49,0 | 49,1 | 50,4 | 50,5 | 50,7 | 50,2 | 37,2 | | | | | 49,7 |
| S1 | 60 | 36,0 | 0,55 | 58,1 | 58,1 | 58,5 | 58,4 | 60,1 | 60,2 | 60,5 | 59,9 | 41,0 | | | | | 59,2 |
| S1 | 60 | 37,6 | 0,40 | 58,1 | 58,1 | 58,5 | 58,4 | 60,1 | 60,2 | 60,5 | 59,8 | 40,2 | | | | | 59,2 |
| S1 | 60 | 38,3 | 0,18 | 58,1 | 58,1 | 58,5 | 58,5 | 60,1 | 60,3 | 60,5 | 59,9 | 40,9 | | | | | 59,3 |

Per il calcolo della temperatura media radiante t_r dalle misure di temperatura di globo per sensori sferici sono state utilizzate le relazioni generali contenute nella UNI EN ISO 7726 (UNI, 2002) considerando i valori di diametro dei globotermometri presi in considerazione:

in convezione naturale:

$$t_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{0,25 \cdot 10^8}{\epsilon_g} \left(\frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{1/4} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273$$

in convezione forzata:

$$t_r = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \cdot 10^8 v_a^{0,6}}{\epsilon_g D^{0,4}} (t_g - t_a) \right]^{1/4} - 273$$

Dai valori misurati, per ciascun sensore e per ciascuna condizione di prova, sono stati calcolati i valori delle conduttanze unitarie superficiali convettive h_c , secondo le relazioni sopra riportate. I valori di h_c , in convezione forzata e naturale sono stati comparati e si è utilizzato il maggiore per calcolare la temperatura media radiante secondo la relazione:

$$T_r = \sqrt[4]{\left[T_g^4 + \left(\frac{h_{c,g}}{\sigma \varepsilon_g} \right) (T_g - T_a) \right]}$$

- OR 1c: la U.O. UNISA ha collaborato con la U.O. di UNICAS nella valutazione delle condizioni di comfort termico di clienti e personale nelle aree refrigerate di quattro supermercati del centro Italia. In particolare, ha elaborato il materiale fornito dalla U.O. UNICAS riguardante i risultati delle misurazioni effettuate in campo e le risposte ai questionari somministrati secondo quanto riportato nella relazione UNICAS (OR 1.3) per valutare l'aspetto oggettivo del comfort secondo quanto previsto dalla norma UNI EN ISO 7730 (UNI, 2006). Per quanto riguarda i parametri relativi alle persone, è stato considerato un valore dell'energia metabolica pari a 1,60 met per i clienti e a 1,85 met per lo staff secondo quanto previsto dalla UNI EN ISO 8996 (UNI, 2005b), mentre i valori dell'isolamento termico dell'abbigliamento sono stati stimati a partire da quanto dichiarato dalle persone intervistate secondo la procedura indicata nella relazione UNICAS (OR.1.3). In particolare, sia per la stagione estiva che per quella invernale, così come indicato nella norma UNI EN ISO 9920 (UNI, 2009) è stato calcolato l'isolamento termico intrinseco relativo all'abbigliamento della singola persona come somma di quelli dei singoli capi, per passare poi a calcolare l'isolamento termico intrinseco medio della categoria di persone (clienti e staff) per la singola stagione. Il valore di isolamento termico intrinseco così ottenuto è stato poi corretto per tener conto del pumping effect. Va sottolineato che per i due supermercati per i quali non erano disponibili informazioni sull'abbigliamento indossato, sono stati utilizzati gli stessi valori di isolamento termico intrinseco dell'abbigliamento calcolati per gli altri due; questa approssimazione è da ritenere accettabile, in quanto le misurazioni sono state effettuate negli stessi periodi in tutti e 4 i supermercati, in giorni con condizioni esterne simili.

Infine, per confrontare i risultati oggettivi delle misurazioni con quelli soggettivi ottenuti sulla base delle risposte ai questionari, sono stati calcolati due indici di benessere termico soggettivo, il TSV (Thermal Sensation Vote), ovvero il voto attribuito sulla di sensazione termica ASHRAE ben noto in letteratura, e il PD_f (Percentage of Dissatisfied), definito dalla U.O. UNISA in conformità con le modalità con cui Fanger ricavò il PPD e cioè uguale alla percentuale degli intervistati che hanno votato ± 2 o ± 3 sulla scala della percezione termica (Fanger, 1970; UNI, 2006).

OR 2. Analisi degli effetti sulla qualità dell'ambiente interno nel retrofit di edifici in ottica NZEB

La U.O. UNISA ha collaborato con la U.O. UNICAS alle misure effettuate con la tecnica del BDT e del decadimento del gas tracciante in un appartamento privato. Per maggiori dettagli si faccia riferimento a quanto presente nella relazione della U.O.2 (OR 2.1 e OR 2.2).

OR 3. Misura delle prestazioni energetiche dell'impianto di illuminazione in interventi di retrofit in ottica NZEB

- OR 3a: la U.O. UNISA ha fornito un piccolo contributo alla U.O. UNICAS sul tema della determinazione dei profili dei consumi per il miglioramento della consapevolezza dell'utente finale, come riportato nella relazione della U.O. UNICAS (OR 3.3).

- OR 3b: l'analisi della interazione tra comfort termico e scenario visivo è stata effettuata presso il Laboratorio di Fotometria e Illuminazione del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Napoli Federico II in una test room a forma di L specificamente progettata e realizzata. Il Laboratorio è situato presso la sede di Architettura dell'Università.

Lo spazio più ampio (evidenziato dall'area tratteggiata in Figura 4), in cui sono state posizionate una scrivania e una sedia, è dotato di un controsoffitto in cui sono installate diverse sorgenti luminose LED caratterizzate da una diversa temperatura di colore correlata (CCT). La finestra è stata opportunamente schermata per impedire completamente l'ingresso della luce naturale; tre tende bianche coprono le pareti perimetrali e un'altra, una volta chiusa, divide le due parti rettangolari della stanza per cui l'ambiente è considerato neutro. Nello spazio più piccolo è collocata l'unità di controllo DALI (Digital Addressable Lighting Interface), necessaria per gestire i dispositivi di illuminazione per il settaggio e il controllo dell'emissione del flusso luminoso e della temperatura di colore correlata.

Per quanto riguarda gli aspetti termoigrometrici, nella zona tratteggiata è stato installata una unità split della AERMEC (mod. SE 500) di potenza frigorifera (termica) pari a 5275 W (5800 W).

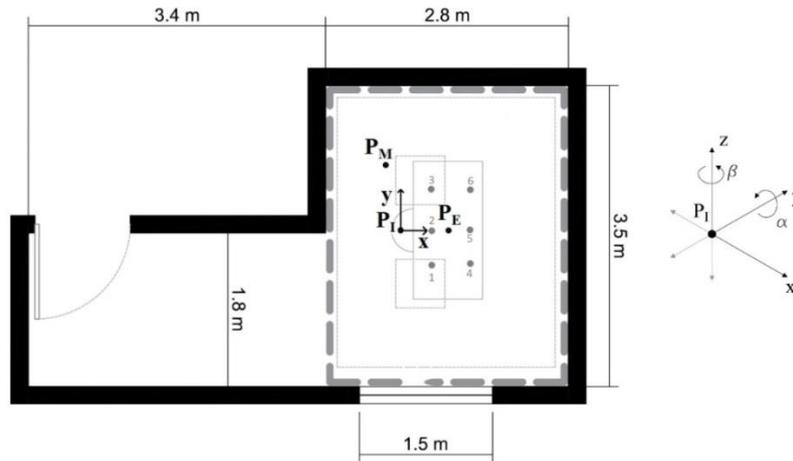


Figura 4 - Configurazione della test room. Legenda: P_E : punto di misura dell'illuminamento; P_I punto di misura dell'irradianza; P_M : punto di misura delle grandezze termo igrometriche; 1, 2, 3, 4, 5, 6 punti di calcolo per le simulazioni dinamiche.

Questionario per la valutazione termoigrometrica

L'indagine soggettiva è stata effettuata attraverso l'uso di un questionario (Alfano et al., 1993), basato sulla norma UNI EN ISO 10551 (UNI, 2019) e frutto di una collaborazione tra fisici tecnici, medici del lavoro e psicologi. Il questionario è diviso in due sezioni: informazioni personali e sensazione termica, che sono state separatamente somministrate ai soggetti in prova.

Tra le informazioni personali ci sono quelle riguardanti l'abbigliamento indossato al momento del test: i soggetti sono invitati a indicare i capi indossati scegliendoli tra quelli riportati nel questionario, che, come risulta dalla Figura 8, è differenziato per genere (UNI, 2009). Per quanto riguarda invece la sezione del questionario sulla sensazione termica, in Figura 9 è riportata la scheda per la valutazione termoigrometrica.

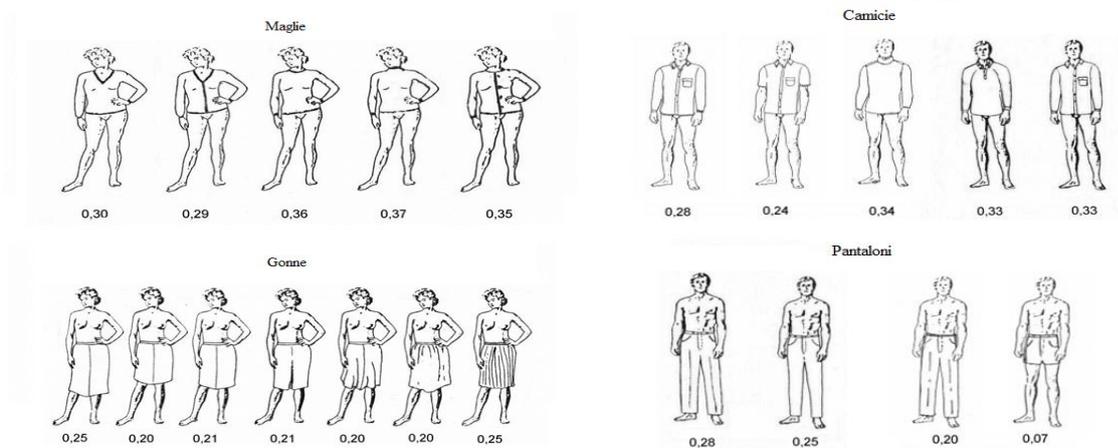


Figura 8 - Alcuni esempi di abbigliamento con relativo valore di isolamento termico statico per le donne (sinistra) e gli uomini (destra).

| | |
|---|---|
| 1. Come ti senti in questo momento? | |
| | Molto freddo <input type="checkbox"/> |
| | Freddo <input type="checkbox"/> |
| | Leggermente freddo <input type="checkbox"/> |
| | Né caldo né freddo <input type="checkbox"/> |
| | Leggermente caldo <input type="checkbox"/> |
| | Caldo <input type="checkbox"/> |
| | Molto caldo <input type="checkbox"/> |
| 2. Quale sensazione ti procura: | |
| | Benessere <input type="checkbox"/> |
| | Leggero fastidio <input type="checkbox"/> |
| | Fastidio <input type="checkbox"/> |
| | Molto fastidio <input type="checkbox"/> |
| 3. In questo momento vorresti avere: | |
| | Molto più freddo <input type="checkbox"/> |
| | Più freddo <input type="checkbox"/> |
| | Un po' più freddo <input type="checkbox"/> |
| | Né più caldo né più freddo <input type="checkbox"/> |
| | Un po' più caldo <input type="checkbox"/> |
| | Più caldo <input type="checkbox"/> |
| | Molto più caldo <input type="checkbox"/> |
| 4. Avverti correnti d'aria? | |
| | Sì <input type="checkbox"/> |
| | No <input type="checkbox"/> |
| 4a. Se sì, come le valuti? | |
| | Piacevoli <input type="checkbox"/> |
| | Tollerabili <input type="checkbox"/> |
| | Non tollerabili <input type="checkbox"/> |
| 5. Come avverti l'aria? | |
| | Secca <input type="checkbox"/> |
| | Né secca né umida <input type="checkbox"/> |
| | Umida <input type="checkbox"/> |
| 6. Tali condizioni ambientali ti hanno provocato problemi per lo svolgimento del gioco ? | |
| | Sì <input type="checkbox"/> |
| | No <input type="checkbox"/> |

Figura 9 - Principali domande del questionario somministrato durante l'indagine soggettiva.

Indagine soggettiva

La sperimentazione soggettiva è stata condotta su un campione di 163 volontari (91 donne e 72 uomini appartenenti a una fascia di età compresa tra i 18 e i 35 anni, come indicato in Tabella 5) costituito da studenti e persone che frequentano l'area didattica di architettura. Prima di partecipare al test, ai soggetti sono state illustrate modalità e finalità dell'indagine.

Tabella 5 - Riepilogo dei dati antropometrici del campione investigato. SD= deviazione standard.

| Genere (N) | età ± SD (anni) | Percentuale del campione con altezza h (cm) nell'intervallo: | | | | Percentuale del campione con massa m (kg) nell'intervallo: | | | |
|--------------|-----------------|--|-----------|-----------|-------|--|---------|---------|------|
| | | <160 | 161<h<170 | 171<h<180 | h>180 | <60 | 61<m<70 | 71<m<80 | m>80 |
| Donne (91) | 22,7 ± 3,3 | 16,5 | 65,9 | 17,6 | 0,0 | 7,7 | 57,1 | 27,5 | 7,7 |
| Uomini (72) | 23,4 ± 2,4 | 2,8 | 9,9 | 60,6 | 26,7 | 2,8 | 5,6 | 21,2 | 70,4 |
| Totale (163) | 23,1 ± 2,9 | 10,4 | 41,2 | 36,6 | 11,8 | 5,5 | 34,4 | 24,7 | 35,4 |

I soggetti sono stati accompagnati singolarmente nella Test-Room, nella quale erano state preventivamente settate una delle due scene luce (3000 K/300 lx e 6000 K/300 lx) e le condizioni termoisometriche (fissando il set point del sistema HVAC a 20 °C nel caso invernale e 25 °C in quello estivo), e sono stati invitati a sedersi al tavolo, dove sono rimasti per 10 minuti, per adattarsi all'ambiente dal punto di vista termico. Durante questo tempo hanno innanzitutto risposto a un questionario contenente domande di carattere personale quali quelle su età, altezza, peso, nazionalità, eventuali problemi di salute e abbigliamento indossato in quel momento; poi hanno risolto, o cercato di risolvere, un cruci-puzzle 19-13 avente come tema "Titoli di libri", individuando nello schema i 30 titoli nascosti. Questa seconda operazione ha una duplice finalità. La prima consiste nel verificare un potenziale effetto dello scenario di luce sul livello di concentrazione e le prestazioni di gioco, la seconda è quella di costituire un *fattore di distrazione* per distogliere l'attenzione dall'ambiente circostante, evitando che se ne abbia memoria nel test successivo. Trascorsi questi 10 minuti, è stato emesso un segnale sonoro per invitare i soggetti a rispondere a un secondo questionario sulla propria sensazione termica, descritto al punto successivo; una volta terminata la compilazione, i soggetti sono stati invitati ad uscire dalla Test-Room per una durata compresa tra i 10 e i 15 minuti, durante i quali è stata cambiata la scena luce. I soggetti sono stati quindi nuovamente accompagnati nella Test-Room e sono state ripetute le stesse operazioni della fase precedente.

È importante precisare che la somministrazione del test con le due scene luce non è stata dettata da una sequenza fissa, infatti la loro alternanza è avvenuta in modo tale da non avere mai la stessa scena luce come prima sezione di sperimentazione. Infine, il gruppo di soggetti che ha partecipato all'indagine soggettiva nelle condizioni estive è diverso da quello investigato in quelle invernali.

Caratterizzazione illuminotecnica

I LED impiegati hanno la possibilità di variare la sintonia di bianco nell'intervallo tra 3000 K e 6000 K. Per l'esperimento sono state impostate due tipologie di luce: la prima è caratterizzata da 3000 K CCT, la seconda da 6000 K CCT (vedi Figura 5). Per entrambi i valori di CCT, il flusso luminoso degli apparecchi di illuminazione è stato regolato in modo che il corrispondente illuminamento sul piano di lavoro fosse pari a circa 300 lx, come richiesto dalla norma UNI EN 12464-1 (UNI, 2011) per effettuare un'attività di lettura.



Figura 5 - Configurazioni di luce della test room. A sinistra con CCT impostata a 3000 K, a destra con CCT impostata a 6000 K.

Grazie all'utilizzo di un luxmetro Konica Minolta T-10°, di uno spettroradiometro Konica Minolta CL-500 A e di un misuratore di potenza collegato al quadro elettrico del laboratorio sono stati misurati i seguenti parametri:

- illuminamento sul piano di lavoro, misurato nel punto P_E (vedi Figura 4);
- potenza assorbita;
- radianza spettrale delle sorgenti LED;
- temperatura di colore;
- resa cromatica;
- irradianza spettrale agli occhi di una persona seduta alla scrivania misurata nel punto P_I secondo diversi angoli di vista (vedi Figura 4).

I risultati delle misure sono riportati in Figura 6 e in Tabella 3, dove sono anche indicati i valori relativi a una scena luce caratterizzata da luce neutra (4000 K) perché utili per lo svolgimento delle simulazioni energetiche.

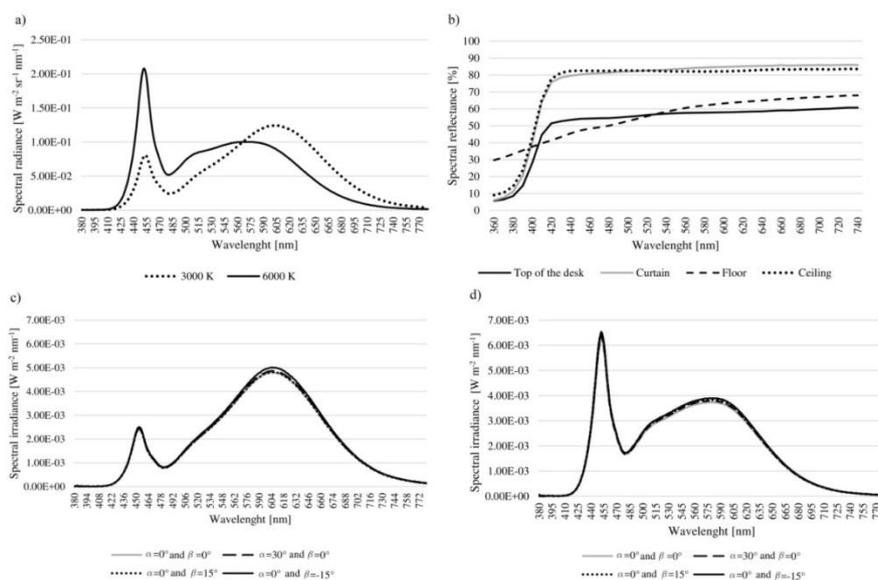


Figura 6 - a) Radianza spettrale delle sorgenti LED; b) Fattori di riflessione spettrale delle superfici del laboratorio; c) Irradianza spettrale agli occhi per differenti direzioni di vista riferita alla scena luce a 3000 K; d) Irradianza spettrale agli occhi per differenti direzioni di vista riferita alla scena luce a 6000 K.

Tabella 3 - Parametri caratterizzanti le diverse scene luce.

| | Luce calda | Luce intermedia | Luce fredda |
|--------------------------|-------------------|------------------------|--------------------|
| Resa cromatica | 83 | 86 | 85 |
| Temperature di colore, K | 3038 | 4035 | 6076 |
| Illuminamento, lx | 305 | 301 | 302 |
| Potenza assorbita, W | 59,5 | 56,0 | 52,5 |

Caratterizzazione e calibrazione termoigrometrica

La caratterizzazione termoigrometrica è stata effettuata mediante il datalogger INNOVA 1221 dotato di sensori per la misura della temperatura dell'aria, delle temperature piane radianti, della velocità dell'aria, della temperatura di rugiada e della temperatura del pavimento. Allo scopo di verificare l'uniformità spaziale delle condizioni microclimatiche sono stati utilizzati anche tre sensori di tipo HOBO U12 (mod. T/RH/2) posizionati sulla scrivania e sulla sedia per la misurazione della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa. Tutti i sensori utilizzati sono conformi ai requisiti di accuratezza della norma UNI EN ISO 7726 (UNI, 2002). I sensori sono stati collegati su un treppiede vicino alla postazione occupata dai soggetti, come indicato in Figura 7, alle altezze indicate dalla norma UNI EN ISO 7726 (UNI, 2002):

- temperatura dell'aria: 0,1 m; 0,6 m; 1,1 m;
- velocità dell'aria: 0,1 m; 0,6 m; 1,1 m;
- temperatura di rugiada: 0,6 m;
- temperature piane radianti: 0,6 m.

La calibrazione termoigrometrica della sala prove è stata eseguita fissando il sistema di controllo dell'unità HVAC a una temperatura scelta nell'intervallo da 18°C a 25°C e quindi misurando tutte le variabili fisiche ogni minuto per 15 minuti. La procedura è stata ripetuta tre volte. In Tabella 4 sono riportati i valori delle principali grandezze termoigrometriche misurati durante la sperimentazione condotta in condizioni estive (set point a 25 °C) e invernali (setpoint a 20 °C).



Figura 7 - Postazione di misura delle grandezze microclimatiche.

Tabella 4 - Valori delle principali grandezze microclimatiche e dell'indice PMV misurati 60 cm al di sopra del pavimento durante le indagini soggettive condotte durante la stagione estiva ed invernale (N=numero di misure).

| Grandezza | Inverno (N=74) | Estate (N=77) |
|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Temperatura dell'aria t_a , °C | 20.3 ± 0.2 | 25.2 ± 0.1 |
| Temperatura media radiante t_r , °C | 20.8 ± 0.0 | 25.4 ± 0.0 |
| Velocità dell'aria v_a , m/s | 0.01 ± 0.00 | 0.03 ± 0.00 |
| Umidità relativa UR , % | 53.9 ± 2.7 | 51.4 ± 1.8 |
| PMV, - | -0.32 ± 0.30 | 0.27 ± 0.29 |

Valutazione dei consumi energetici dovuti all'impianto di illuminazione: simulazioni illuminotecniche

Per valutare i consumi energetici dovuti all'impianto di illuminazione, sono state effettuate delle simulazioni numeriche statiche e dinamiche di luce naturale e artificiale per un modello virtuale avente le stesse caratteristiche geometriche e ottiche del laboratorio utilizzato per le sperimentazioni. Le prime sono state utili per verificare in che modo il software modella le caratteristiche spettrali delle sorgenti e delle superfici architettoniche, mentre quelle dinamiche hanno permesso di valutare i consumi energetici annuali dovuti all'impianto di illuminazione, tenendo conto della disponibilità di luce naturale in ambiente. Per le simulazioni è stato utilizzato il software DIVA, un plug-in per Rhinoceros basato sul motore di calcolo di Radiance; è stato adoperato il file climatico IWEC relativo alla città di Napoli disponibile sulla pagina web del software Energy Plus e, sulla base di quanto stabilito in letteratura, sono stati settati i seguenti parametri di calcolo: ambient bounces 7, ambient division 1500, ambient sampling 100, ambient resolution 300, ambient accuracy 0.05. Poiché il software Radiance non è in grado di simulare precisamente le caratteristiche spettrali delle sorgenti luminose, ma le approssima applicando il modello RGB, l'illuminamento viene quindi calcolato secondo la seguente equazione:

$$E = (E_{E,R} \cdot 0,265 + E_{E,G} \cdot 0,67 + E_{E,B} \cdot 0,065) \cdot 179$$

dove $E_{E,R}$, $E_{E,G}$ and $E_{E,B}$ sono le componenti rossa, verde e blu dell'irradianza; 0,265, 0,67 e 0,065 sono coefficienti che tengono in considerazione della differente sensibilità spettrale dell'occhio umano e 179 lm/W è il valore di coefficiente di visibilità considerato.

Utilizzando questo modello è possibile valutare con una buona approssimazione qual è l'effetto delle variazioni nei valori R, G e B dei fattori di riflessione e trasmissione delle superfici architettoniche sulle variazioni dei valori di illuminamento, ovvero nel caso specifico è possibile valutare la capacità delle tende di filtrare la luce naturale solo in canali specifici (il rosso ed il blu a turno). Dunque, per modellare le proprietà ottiche delle superfici del laboratorio, i fattori di riflessione spettrale sono stati misurati con uno spettrofotometro Konica Minolta CM 2600d. Conoscendo i fattori di riflessione spettrale è stato quindi possibile ricavare le coordinate XYZ relative all'illuminante D65, riportate in Tabella 3 e infine, utilizzando il Colour Picker for Radiance, convertire tali coordinate nei corrispondenti valori dei fattori di riflessione nei canali RGB, da inserire in DIVA, come mostrato sempre in Tabella 6. Al vetro della finestra è stato applicato un fattore di trasmissione visiva uguale a 0.80.

Tabella 6 - Coordinate XYZ delle superfici del laboratorio e relativi valori delle componenti R, G e B dei fattori di riflessione spettrale usati in DIVA.

| | X | Y | Z | Fattore di riflessione R | Fattore di riflessione G | Fattore di riflessione B |
|-----------------------|-------|-------|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Soffitto | 76,39 | 80,73 | 85,28 | 0,69 | 0,87 | 0,88 |
| Pavimento interno | 53,03 | 55,31 | 46,85 | 0,56 | 0,61 | 0,49 |
| Muri interni | 77,82 | 82,03 | 83,47 | 0,72 | 0,88 | 0,85 |
| Piano della scrivania | 54,02 | 56,99 | 57,32 | 0,49 | 0,60 | 0,57 |
| Infissi | 15,80 | 13,06 | 4,20 | 0,26 | 0,12 | 0,05 |
| Muri esterni | 71,70 | 75,07 | 66,30 | 0,71 | 0,80 | 0,66 |
| Pavimento esterno | 53,03 | 55,31 | 46,85 | 0,56 | 0,61 | 0,49 |

Per il modello così costruito sono stati calcolati i valori di illuminamento all'occhio di una persona seduta alla scrivania del laboratorio (P_1 nella Figura 4), che guarda dritto avanti a sé. I calcoli sono stati effettuati durante i due solstizi d'estate e d'inverno, ogni ora nell'intervallo temporale 9:00-18:00, considerando il modello di cielo CIE sereno. Per ciascuna giornata le simulazioni sono state ripetute due volte: la prima considerando che la finestra non fosse schermata in alcun modo (caso base – CB), la seconda considerando la presenza di una tenda di colore arancio durante il solstizio d'inverno e di colore azzurro durante il solstizio d'estate (caso di analisi – CA). Le tende sono state modellate come superfici piane poste davanti alla finestra e caratterizzate dai seguenti valori di fattori di trasmissione nei canali R, G e B: 0,9, 0,4 e 0,2 per la tenda arancione; 0,3, 0,6 e 0,9 per quella azzurra.

Le componenti R, G e B degli illuminamenti da luce naturale sono stati valutati per entrambi i casi analizzati ed è stata calcolata l'incidenza percentuale di ciascuna componente nel determinare l'illuminamento totale.

Le simulazioni dinamiche sono state utilizzate da un lato per valutare la disponibilità di luce naturale sul piano di lavoro e la sua eventuale riduzione dovuta all'utilizzo delle tende colorate, dall'altro per calcolare i consumi energetici dovuti ad un impianto di illuminazione costituito dagli stessi corpi illuminanti usati per la sperimentazione. La disponibilità di luce naturale è stata espressa in termini di Useful Daylight Illuminance (UDI) secondo la definizione di letteratura, considerando un illuminamento sul piano di lavoro uguale a 300 lx. I consumi energetici sono stati valutati considerando le variazioni sia della temperatura di colore a seconda della stagione, sia del flusso luminoso emesso dai corpi illuminanti in base alla disponibilità di luce naturale, immaginando che l'impianto fosse regolato da un sistema di gestione automatica di tipo switching on-off, controllato da un fotosensore installato a soffitto.

Per ottenere i risultati, sono stati calcolati i valori di illuminamento da luce naturale in sei punti sulla scrivania (1, 2, 3, 4, 5 e 6 nella Figura 4) e in un punto posto al centro del soffitto. È stato considerato che il laboratorio fosse utilizzato dalle 9:00 alle 18:00 e che dal 1° aprile al 31 ottobre fosse in vigore l'ora legale. Infine, sulla base dei risultati forniti

da DIVA, grazie all'utilizzo del tool di calcolo proposto è stato possibile calcolare i consumi energetici relativi all'illuminazione considerando le variazioni di potenza assorbita dovute sia alle variazioni di temperatura di colore che di flusso luminoso.

Le simulazioni sono state effettuate sia per il CB che per il CA. Nello specifico, per il CB è stato considerato che i corpi illuminanti emettessero sempre luce caratterizzata da temperatura di colore uguale a 4000 K. Per tener conto dei rischi di abbagliamento e surriscaldamento dovuti all'ingresso in ambiente della radiazione diretta, è stata considerata la presenza di un sistema schermante generico, utilizzando per il calcolo il modello "conceptual shading" di DIVA controllato secondo il sistema di controllo Lightswitch (Reinhart, 2004). Secondo tale modello ogni qual volta l'irradianza diretta sul piano di lavoro è maggiore di 50 W/m² viene attivato uno schermo ideale che blocca completamente la radiazione diretta e riduce del 75% quella diffusa.

Per il CA la disponibilità di luce naturale e i consumi energetici sono stati calcolati facendo variare i parametri di calcolo come riportato in Tabella 7.

Tabella 7 - Parametri di calcolo per il CA.

| Intervallo di tempo | Temperatura di colore delle sorgenti [K] | Schermo utilizzato |
|----------------------------|--|--|
| 1° gennaio – 31 marzo | 3000 | "conceptual shading" di DIVA + tenda arancione |
| 1° aprile – 14 giugno | 4000 | "conceptual shading" di DIVA |
| 15 giugno – 15 settembre | 6000 | "conceptual shading" di DIVA + tenda blu |
| 16 settembre – 14 novembre | 4000 | "conceptual shading" di DIVA |
| 15 novembre – 31 dicembre | 3000 | "conceptual shading" di DIVA + tenda arancione |

Valutazione delle risposte soggettive alle condizioni termoigrometriche

Sono stati presi in considerazione:

- il voto di sensazione termica (TSV) espresso su una scala a 7 punti da -3 (molto freddo) a +3 (molto caldo);
- il voto di valutazione (EV) espresso sulla scala da 0 (confortevole) a +3 (molto non confortevole);
- il voto di preferenza PV espresso sulla scala da -3 (molto più freddo) a +3 (molto più caldo);
- il voto di umidità (HV) espresso sulla scala da -1 (umido) a +1 (secco);
- il numero di parole trovate durante l'esecuzione del cruci-puzzle.

Per garantire il più elevato livello di attendibilità dell'indagine soggettiva, i questionari sono stati sottoposti ad una operazione di post-processing in modo da ridurre al minimo gli effetti dovuti ad una inaccurata compilazione (risposte contraddittorie, presenza di troppe cancellature nella stessa risposta, più di una scelta per la stessa domanda) o alla presenza di disturbi psicologici (claustrofobia, ansia). Le analisi statistiche sono state condotte mediante test ANOVA eseguiti da uno script Matlab. Il valore limite di p ai fini della non significatività statistica è stato fissato a 0,10.

OR 4. Analisi del retrofit dei generatori in ottica NZEB

E' stato realizzato un impianto di prova nel laboratorio di Trasmissione del Calore del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno in cui sono stati installati componenti per la produzione, la distribuzione e l'erogazione dell'energia. Per la fase di produzione, l'impianto ha previsto, in alternativa, la possibilità di essere connesso a una caldaia tradizionale Immergas Eolo oppure a un micro-cogeneratore Viessmann Vitotwin-300W. La doppia connessione scaturisce dalla necessità di avere supporto sia per le misure di rendimento del micro-cogeneratore che per la fase di test del sistema "smart" di retrofit per il controllo della temperatura di mandata. I carichi termici sono stati simulati con uno scambiatore di calore acqua-acqua a piastre saldobrasate funzionante in circuito aperto sul secondario, cioè sulla linea d'utenza.

La caratterizzazione del rendimento ha richiesto la misura delle diverse forme di energia coinvolte nel processo: chimica, termica ed elettrica. La metodologia seguita per la misura del rendimento è quella delineata dalla norma UNI EN 303-3 (UNI, 2007). Le misure sono state realizzate in condizioni stazionarie e ripetibili. Il setup sperimentale, riportato in Figura 10, prevede una parte hardware (caldaia, linea di distribuzione asservite ad uno scambiatore di calore acqua-acqua, scheda Arduino, resistenza digitale in sostituzione del termostato di bordo e la strumentazione di misura) e una parte software per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati in tempo reale (Labview by National Instruments) come indicato in Figura 10.

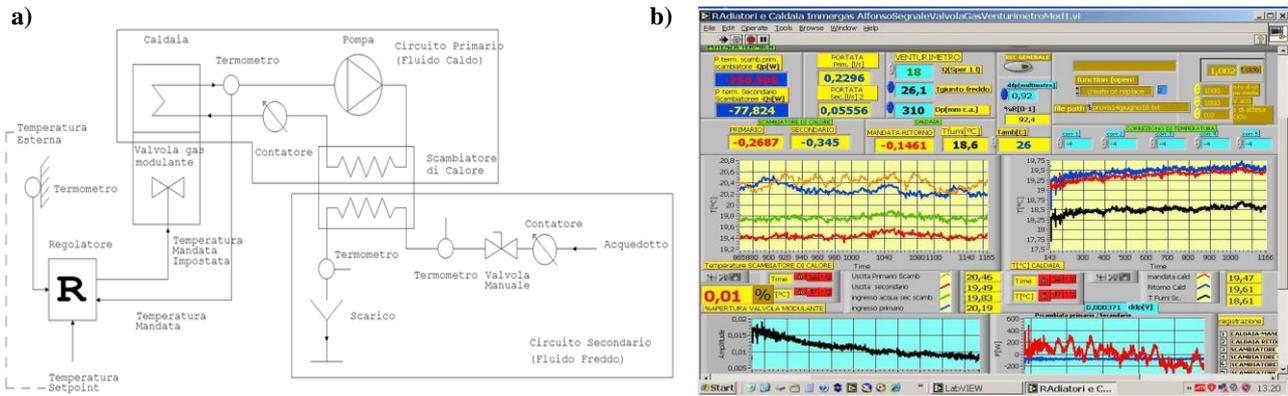


Figura 10 - a) Schema funzionale; b) Pannello DAQ.

La caldaia prevede un sistema di regolazione manuale della temperatura di mandata attraverso un potenziometro a nove posizioni, rimpiazzato da una resistenza digitale (MCP4251) controllabile mediante Arduino che permette di ottenere 256 valori di resistenza e, quindi, di temperatura di mandata della caldaia. Questo sistema è impostabile liberamente in base alle esigenze dell'utente per realizzare le desiderate strategie di regolazione. Il sistema è stato implementato con uno shield Wi-Fi di Arduino, fornendo la capacità di connettersi alla rete (IOT, Internet of Things) e quindi la possibilità di adottare strategie di controllo più evolute, ad esempio basate sulle previsioni del tempo o sull'acquisizione della temperatura esterna dalla rete, evitando il costo di acquisto e di installazione di un termometro esterno. Al riguardo, utilizzate varie fonti web per l'acquisizione della temperatura esterna a Fisciano, si è potuto constatare che l'errore commesso è non superiore al 5%, mantenendosi a valori nettamente inferiori per gran parte delle prove effettuate.

Risultati

OR 1. Misura delle prestazioni energetiche degli edifici e certificazione del retrofit in ottica NZEB

- OR 1a: i primi risultati ottenuti, opportunamente corredati dall'analisi dell'incertezza di misura della temperatura superficiale tramite la tecnica termografica, hanno dato risultati incoraggianti, pur mostrando uno scostamento ancora importante tra i valori ottenuti con la termografia e quelli ottenuti con il tradizionale metodo termoflussimetrico. Per maggiori dettagli si faccia riferimento a quanto presente nella relazione della U.O. 2 (OR 1.1 e O.R. 1.2).
- OR 1b: il confronto tra i valori di temperatura media radiante previsti (pari alla temperatura del bagno) e quelli misurati con i globi investigati è riportato in Figura 11; per agevolare il confronto nei diagrammi è riportata anche la temperatura media radiante di riferimento, $t_r = t_{s,m}$. E' evidente che:
 - per i globotermometri normalizzati, con diametro pari a 150 mm, i valori di temperatura media radiante si distribuiscono all'incirca intorno al valore di riferimento, come mostrato in Figura 11a, con valori degli scarti medi tra il valore calcolato e quello di riferimento, in Tabella 8, relativamente contenuti e coerenti con i requisiti della norma UNI EN ISO 7726 (UNI, 2002). Tale fenomeno è di indubbio rilievo se si considera che il globo S6 è stato realizzato dalla U.O. UNICAS mediante tecnica 3D printing e quindi, a differenza di S3 e S4, non è costituito da materiale metallico;
 - per i sensori non normalizzati i valori si discostano da quelli di riferimento in misura estremamente significativa con valori degli scarti estremamente elevati, oltre 7 °C, che ne limitano fortemente l'impiego.
- OR 1c: relativamente alle misure di comfort termico nei supermercati, l'analisi dei parametri microclimatici negli spazi refrigerati ha rivelato nella stagione estiva (autunnale) valori di temperatura operativa fino a 3 °C (1,5 °C) minori rispetto a quelli misurati nelle aree non refrigerate.

Per quanto riguarda il comfort termico globale per i clienti, i valori di PMV basati sull'abbigliamento reale sono sistematicamente negativi, sia in estate che in autunno. Ad eccezione di 5 casi su 23, sono state riscontrate condizioni di disagio generalizzate ($PMV < -0,7$) e, in alcuni casi, l'insorgenza di stress da freddo ($PMV < -2$, secondo quanto stabilito dalla UNI EN 15265). Al contrario, per il personale sono state generalmente rilevate condizioni di comfort termico ($0,7 < PMV < 0,7$) grazie all'utilizzo di abbigliamento più idoneo per i compiti di lavoro nelle aree refrigerate e a un livello di attività maggiore. In riferimento al discomfort termico locale, la tipologia di cabinets, specialmente quelli aperti, e la loro disposizione all'interno dell'area di vendita, ad esempio cabinets contrapposti, favoriscono una significativa stratificazione dell'aria fredda a livello della cavaglia con bassi valori di temperatura del pavimento, determinando una percentuale di insoddisfatti anche maggiore di 80% che sembra ridursi in caso di cabinets chiusi (fino a circa il 20%). In entrambe le stagioni sono state inoltre riscontrate differenze tra i valori di temperatura dell'aria misurati a 0,10 m e a 1,70 m che raggiungono 9 °C nel caso dei cabinet aperti.

Per quanto riguarda la valutazione dello stress da freddo, nel caso dei clienti, in estate, a causa dei bassi valori di temperatura operativa e dello scarso isolamento termico dell'abbigliamento, il DLE (Durata Limite di Esposizione) è risultato pari a circa 40 minuti in cinque aree di vendita (latticini, salumi, yogurt, pesce e verdure). Nel caso autunnale i DLE aumentano grazie alla favorevole combinazione microclima-abbigliamento e, comunque restano maggiori dei

tempi medi di permanenza all'interno degli spazi di vendita. Non sono state rilevate, invece, condizioni di stress per il personale in nessuna postazione.

Come descritto nella sezione Metodologia, in due supermercati è stata condotta anche un'indagine soggettiva sui clienti; i risultati sono coerenti con l'indagine oggettiva e hanno rivelato che il disagio locale dovuto all'effetto dei piedi freddi è più significativo per le donne, probabilmente sempre a causa della diversa distribuzione degli indumenti nelle parti inferiori del corpo. Per quanto riguarda il comfort globale, i giudizi espressi sulle scale percettiva, valutativa e di tolleranza sono coerenti con condizioni leggermente fredde, come confermato dai voti sulla sensazione termica (TSV=-0,61 in estate e TSV=-0,77 in autunno). Sebbene i valori di TSV non siano stati influenzati da problemi legati al genere, sono state riscontrate percentuali più elevate di insoddisfatti (secondo il criterio di Fanger) per le donne.

OR 2. Misura della permeabilità all'aria e analisi dei suoi effetti sulla qualità dell'ambiente interno nel retrofit degli impianti di ventilazione degli edifici in ottica NZEB

Per quanto riguarda i risultati di tale attività si faccia riferimento a quanto presente nella relazione della U.O. UNICAS (OR 2.1 e OR 2.2).

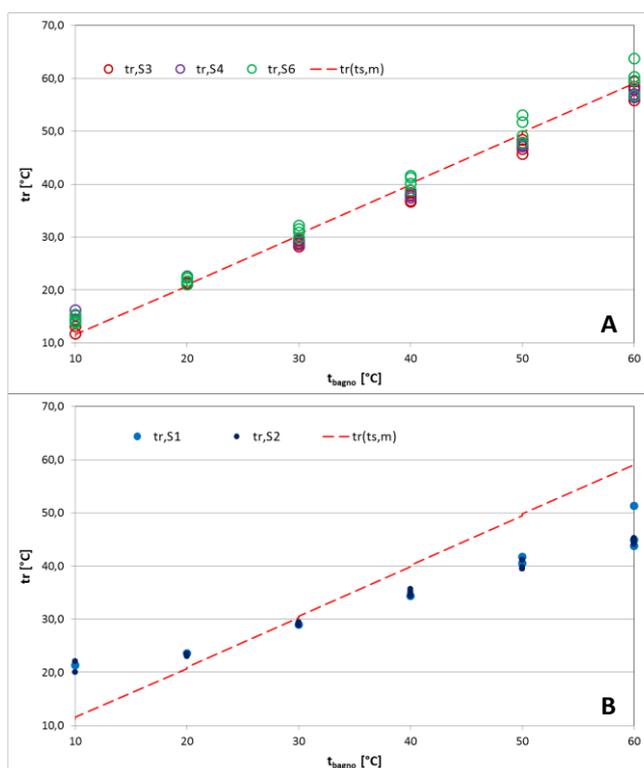


Figura 11 - Confronto tra i valori di temperatura media radiante misurati con globi standardizzati (A) e non (B) con i valori di riferimento del bagno.

Tabella 8 - Valori medi degli scostamenti tra la t_r calcolata e quella di riferimento.

| | $(t_{r,S1} - t_{s,m})$ | $(t_{r,S2} - t_{s,m})$ | $(t_{r,S3} - t_{s,m})$ | $(t_{r,S4} - t_{s,m})$ | $(t_{r,S6} - t_{s,m})$ |
|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Media | -5,5 | -5,1 | -0,8 | -0,9 | 1,3 |
| Deviazione standard | 7,568 | 7,358 | 1,826 | 2,411 | 1,722 |

OR 3: Misura delle prestazioni energetiche dell'impianto di illuminazione in interventi di retrofit in ottica NZEB

- OR 3a: per quanto riguarda i risultati di tale attività si faccia riferimento a quanto presente nella relazione della U.O. UNICAS (OR 3.3).
- OR 3b: di seguito sono riportati i risultati relativi ai diversi aspetti di questa attività.

Indagine soggettiva

Dall'analisi dei questionari somministrati al campione, è emerso che passando dalla luce più calda (3000 K) a quella più fredda (6000 K) si verifica un incremento generalizzato della percentuale di soggetti in condizioni di neutralità termica, cioè che hanno votato né caldo né freddo sulla scala di sensazione termica in Figura 9; in particolare, come è evidente dai risultati riportati in Tabella 9, questo effetto sembra essere più marcato nel caso delle donne con una percentuale di intervistate in condizioni di neutralità termica che aumenta da circa il 30 a circa il 50% in entrambi gli scenari termometrici, come risulta dai dati riportati in Tabella 10, nella quale compare anche il punteggio relativo

al gioco, espresso attraverso il numero di parole individuate (fino a un massimo di 30). Sempre dalle Tabelle 9 e 10 si ricava che passando dalla luce più calda (3000 K) a quella più fredda (6000 K) si ottiene anche uno spostamento verso il freddo della sensazione termica percepita; in particolare, il TSV attribuito dal campione sulla scala ASHRAE passa da 0,74 a 0,32 in inverno e da 1,03 a 0,53 in estate. Lo scenario di luce non determina variazioni statisticamente significative sia in termini di percezione dell'umidità che di prestazioni di gioco.

I giudizi espressi sulle scale di valutazione e di preferenza riportati in Tabella 10 sono coerenti con il giudizio espresso sulla scala di sensazione. Infatti, i soggetti, indipendentemente dallo scenario di luce e dalle condizioni termoisometriche, da un lato esprimono un giudizio sulla scala di percezione tendenzialmente di caldo leggero ($0 < TSV < 1$) ritenendo abbastanza confortevole la propria condizione ($0 < EV < 1$) e contestualmente preferiscono condizioni termoisometriche più fresche ($PV < 0$). Le differenze sono statisticamente significative ($p < 0,10$) solo in estate, limitatamente alle donne e all'intero campione investigato

Tabella 9 - Distribuzione dei voti attribuiti sulla scala di percezione (TSV) per i due scenari di luce investigate al variare delle condizioni termoisometriche: (W) scenario di luce a 3000 K; (C) scenario di luce a 6000 K.

| Voto | Inverno (Test room a 20 °C) | | | | | | Estate (Test room a 25 °C) | | | | | |
|--------------------|-----------------------------|-----|--------|-----|-----------------|-----|----------------------------|-----|--------|-----|-----------------|-----|
| | Donne | | Uomini | | Intero campione | | Donne | | Uomini | | Intero campione | |
| | (W) | (C) | (W) | (C) | (W) | (C) | (W) | (C) | (W) | (C) | (W) | (C) |
| Molto freddo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Freddo | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Leggermente freddo | 9 | 14 | 3 | 13 | 5 | 14 | 2 | 8 | 0 | 10 | 1 | 9 |
| Nè caldo nè freddo | 34 | 51 | 33 | 41 | 34 | 46 | 31 | 48 | 28 | 34 | 30 | 43 |
| Legermente caldo | 34 | 31 | 38 | 38 | 36 | 35 | 42 | 31 | 34 | 41 | 39 | 35 |
| Caldo | 20 | 3 | 26 | 8 | 23 | 5 | 23 | 10 | 28 | 14 | 25 | 12 |
| Molto caldo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 10 | 0 | 5 | 1 |

Valutazione dei consumi energetici dovuti all'impianto di illuminazione: simulazioni illuminotecniche

In Figura 12 sono riportati i risultati delle simulazioni statiche relative ai solstizi d'inverno e d'estate. I grafici rappresentano le componenti R, G e B dell'illuminamento (E_R , E_G , E_B) calcolate al livello degli occhi (punto P_1 nella Figura 4) e l'illuminamento totale (E), somma delle tre componenti sia per il CB che per il CA.

Durante l'inverno, a seconda dell'ora del giorno, l'uso della tenda arancione riduce E_B di circa l'84%-86%, portandolo ad assumere valori vicini a 0 per quasi tutta la giornata. Al contrario, la curva della componente rossa dell'illuminamento relativa al CA rimane prossima alla curva relativa al CB, con riduzioni percentuali che variano dal 18% al 20%, a seconda dell'ora del giorno. La riduzione percentuale della componente verde è compresa tra il 67% e il 69%. Come conseguenza delle riduzioni delle tre componenti, la disponibilità di luce del giorno viene ridotta a livello globale. Considerando l'illuminamento totale (rappresentato dalle curve nere nella Figura 10), l'uso della tenda determina una riduzione percentuale che varia dal 55% al 62%, a seconda dell'ora considerata. La diversa entità delle riduzioni percentuali durante il giorno dipende dal fatto che le superfici interne svolgono un ruolo significativo nell'aumentare o ridurre le componenti E_R , E_G , E_B sul piano di lavoro. A seconda del momento della giornata, la luce del giorno viene riflessa in modo diverso dalle superfici architettoniche e, di conseguenza, ciascuna delle tre componenti dell'illuminamento assume un peso maggiore o minore nel determinare l'illuminamento totale. Ciò è più chiaro osservando la Figura 13, in cui è rappresentato il rapporto percentuale tra E_R , E_G , E_B ed E. Si può notare che la componente rossa ha un peso significativo, variabile tra 35% e 45%, nel determinare l'illuminamento globale, mentre quella blu è generalmente pari al 2%. È importante osservare che queste differenze nei rapporti E_R/E , E_G/E ed E_B/E , sono dovute esclusivamente all'effetto delle interazioni della luce diurna con le superfici architettoniche, poiché il coefficiente di visibilità, utilizzato dal software per calcolare gli illuminamenti, non cambia in funzione del tempo. Se l'illuminamento viene calcolato all'esterno, le componenti E_R , E_G ed E_B hanno sempre lo stesso peso nel determinare l'illuminamento globale e per ciascuna componente il peso è uguale al coefficiente corrispondente.

Durante l'estate, l'uso della tenda azzurra determina lo scenario luminoso opposto. Come si può dedurre dalla Figura 13, la componente rossa è strettamente ridotta rispetto al caso invernale e pesa circa il 10% nel determinare l'illuminamento totale. Al contrario, quella blu ha un impatto più significativo nella definizione di E rispetto al caso invernale (circa il 9%). Questo risulta evidente anche dalla Figura 14, nella quale è possibile notare che l'andamento di E_B relativo a CB e quello relativo a CA sono molto simili, mentre i valori di E_R sono rigorosamente ridotti (circa il 76% -77%) in presenza della tenda colorata. Complessivamente, nel caso estivo le riduzioni degli illuminamenti globali sono pari circa al 54%.

Tabella 10 - Sintesi dei risultati dell'indagine soggettiva espressi in termini di valori medi dei voti attribuiti dal campione: (W) scenario di luce a 3000 K; (C) scenario di luce a 6000 K; TSV=voto medio sulla scala di sensazione termica; EV=voto medio sulla scala di valutazione termica; PV=voto medio sulla scala di preferenza termica; HV=voto medio di percezione dell'umidità relativa; SD=deviazione standard; p=p-value. In grassetto sono evidenziate le differenze statisticamente significative (p<0.10).

| Grandezza | Donne | | Uomini | | Intero campione | |
|------------------------------------|---------------------|-------|---------------------|-------|-----------------------|-------|
| | (W) | (C) | (W) | (C) | (W) | (C) |
| Inverno (Test room a 20 °C) | | | | | | |
| TSV | 0,60 | 0,23 | 0,87 | 0,41 | 0,74 | 0,32 |
| SD | 1,03 | 0,73 | 0,85 | 0,81 | 0,95 | 0,78 |
| p (F) | 0,082 (3,12) | | 0,016 (6,10) | | 0,0033 (8,92) | |
| EV | 0,57 | 0,43 | 0,49 | 0,31 | 0,53 | 0,36 |
| SD | 0,65 | 0,50 | 0,64 | 0,47 | 0,65 | 0,48 |
| p (F) | 0,278 (1,19) | | 0,155 (2,07) | | 0,076 (3,20) | |
| PV | -0,34 | -0,11 | -0,28 | -0,15 | -0,31 | -0,14 |
| SD | 0,73 | 0,72 | 0,83 | 0,71 | 0,78 | 0,71 |
| p (F) | 0,190 (1,75) | | 0,464 (0,54) | | 0,138 (2,22) | |
| HV | 0,20 | 0,20 | 0,10 | -0,05 | 0,15 | 0,07 |
| SD | 0,63 | 0,68 | 0,64 | 0,65 | 0,63 | 0,69 |
| p (F) | 0,295 (1,11) | | 1 (0,00) | | 0,450 (0,57) | |
| Punteggio medio al gioco | 25,4 | 26,5 | 20,5 | 22,4 | 22,9 | 24,3 |
| SD | 4,7 | 4,0 | 6,3 | 6,2 | 6,1 | 5,6 |
| p (F) | 0,356 (0,86) | | 0,202 (1,65) | | 0,145 (2,15) | |
| Estate (Test room a 25 °C) | | | | | | |
| TSV | 0,92 | 0,50 | 1,21 | 0,59 | 1,03 | 0,53 |
| SD | 0,84 | 0,87 | 0,98 | 0,87 | 0,90 | 0,87 |
| p (F) | 0,020 (5,62) | | 0,013 (6,55) | | 0,00007 (12,0) | |
| EV | 0,58 | 0,46 | 0,90 | 0,59 | 0,70 | 0,51 |
| SD | 0,61 | 0,50 | 0,86 | 0,78 | 0,73 | 0,62 |
| p (F) | 0,28 (1,19) | | 0,116 (2,07) | | 0,076 (3,20) | |
| PV | -0,71 | -0,42 | -0,69 | -0,45 | -0,70 | -0,43 |
| SD | 0,58 | 0,71 | 0,93 | 0,83 | 0,73 | 0,75 |
| p (F) | 0,030 (4,55) | | 0,30 (1,09) | | 0,023 (5,25) | |
| HV | -0,04 | -0,06 | -0,03 | -0,03 | -0,01 | -0,03 |
| SD | 0,62 | 0,52 | 0,57 | 0,57 | 0,59 | 0,53 |
| p (F) | 0,295 (1,11) | | 1 (0,00) | | 0,450 (0,57) | |
| Punteggio medio al gioco | 25,1 | 25,9 | 23,8 | 24,3 | 24,6 | 25,3 |
| SD | 6,1 | 5,4 | 6,7 | 5,5 | 6,3 | 5,5 |
| p (F) | 1,0 (0,0) | | 0,77 (0,09) | | 0,48 (0,50) | |

Con le simulazioni dinamiche è stato possibile valutare in che modo l'uso delle tende influisce sulla disponibilità annuale di luce diurna interna. La Figura 14 riporta i valori di UDI, riferiti ai 6 punti del piano di lavoro sia per il CB che per il CA. L'uso delle tende ha un effetto positivo nel ridurre le percentuali di tempo per cui si verifica che gli illuminamenti sono superiori a 2000 lx, vale a dire il numero di ore durante l'anno in cui il rischio di discomfort è significativo. Di conseguenza viene incrementata la percentuale annua delle ore durante le quali l'illuminamento da luce naturale assume valori compresi tra 300 lx e 2000 lx, ossia i valori per i quali la luce naturale è sufficiente per svolgere i compiti visivi e non vi è rischio di discomfort. Di contro aumenta anche la percentuale annua di ore durante le quali l'illuminazione naturale non è in grado di soddisfare da sola il fabbisogno di luce (illuminamenti inferiori a 300 lx), determinando la necessità di ricorrere alla luce elettrica. Nel CB la percentuale annua di ore durante le quali è necessaria la luce elettrica è al massimo pari al 16,59% (vedi punto 1), mentre nel CA essa varia dal 16,90% al 20,61%. Ovviamente, ciò influisce sui consumi energetici. Secondo i risultati ottenuti dalle simulazioni, utilizzando un sistema di controllo automatico di tipo on-off switching, i consumi energetici annuali del CB sono pari a 32,73 kWh

corrispondenti a 3,34 kWh /m², mentre ne CA sono pari a 40,56 kWh corrispondenti a 4,14 kWh/m², ovvero maggiori del 24%.

Come illustrato in precedenza l'applicazione delle strategie progettuali proposte mira a ridurre i consumi energetici dovuti alla climatizzazione. Pertanto, i risparmi così ottenuti andrebbero valutati insieme all'incremento dei consumi dovuti all'illuminazione, al fine di individuare proposte progettuali ottimali.

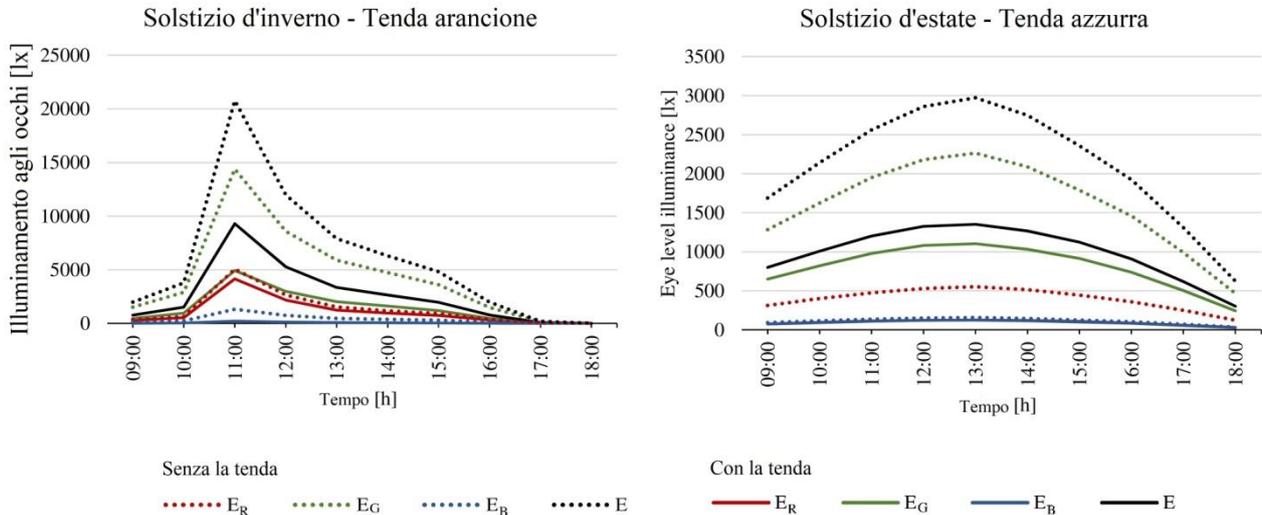


Figura 12 - Valori di illuminamento agli occhi.

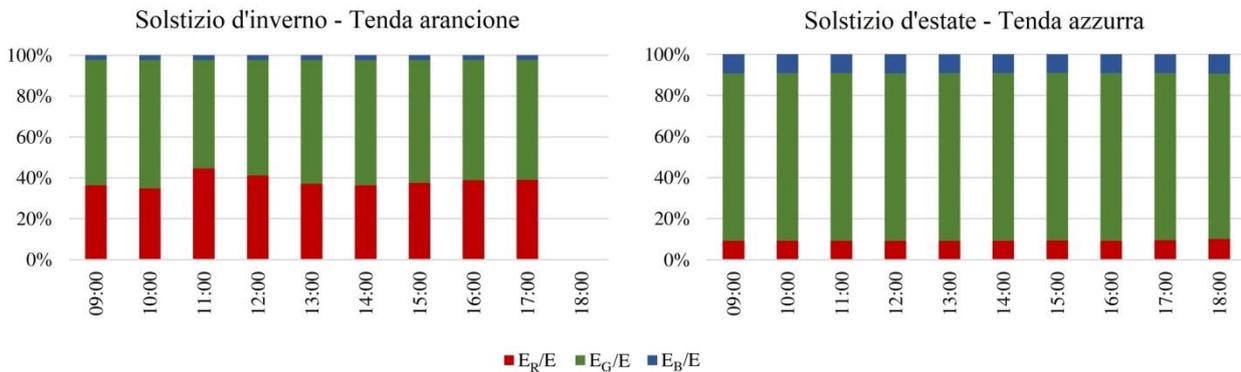


Figura 13 - Rapporto percentuale tra E_R, E_G, E_B ed E.

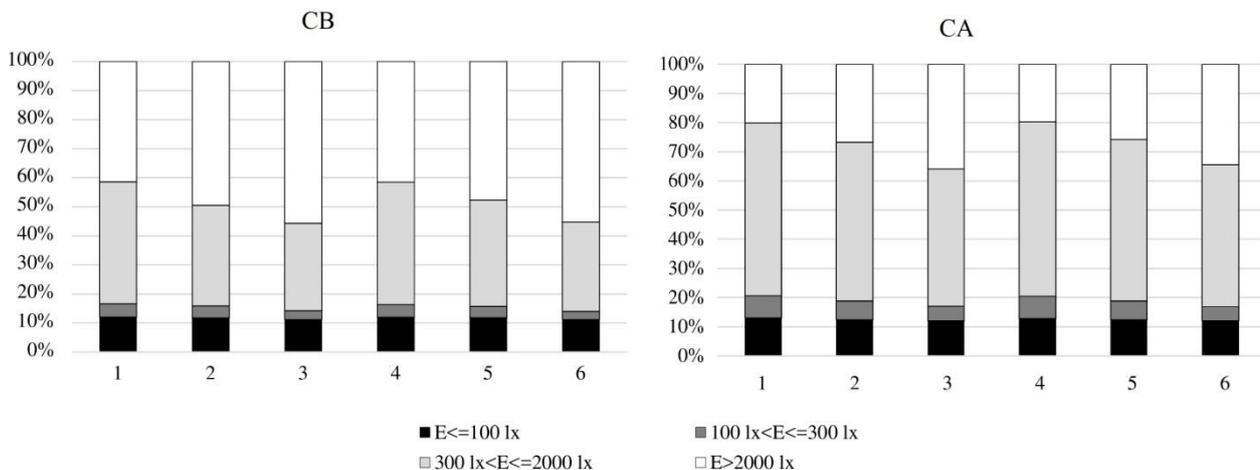


Figura 14 - Valori di UDI relativi ai sei punti di calcolo.

OR 4. Analisi del retrofit dei generatori in ottica NZEB

Con riferimento alle prove di rendimento, è stato essenziale provare l'abilità del sistema di raggiungere condizioni stazionarie; questa è testimoniata, ad esempio, dai dati di cui alla Figura 15. Le prove sono state finalizzate alla rappresentazione delle curve di rendimento al variare della portata, corrispondenti a due livelli termici, 36 °C e 46.5 °C, significativi in quanto tipici di utenze quali pannelli radianti e ventilconvettori. Il calo di peso della bombola di gas è stato acquisito con la bilancia KERN IKT 60-021, che eroga un segnale elettrico elaborato dal programma LabView per la registrazione di questo dato a intervalli impostati di 10 secondi.

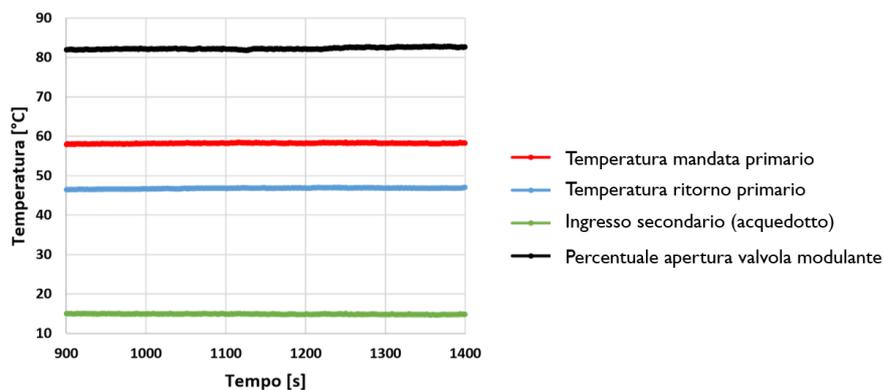


Figura 15 - Condizioni di prova stazionarie.

La Figura 16 mostra il raggiungimento di condizioni stazionarie per la misura della portata massica di combustibile.

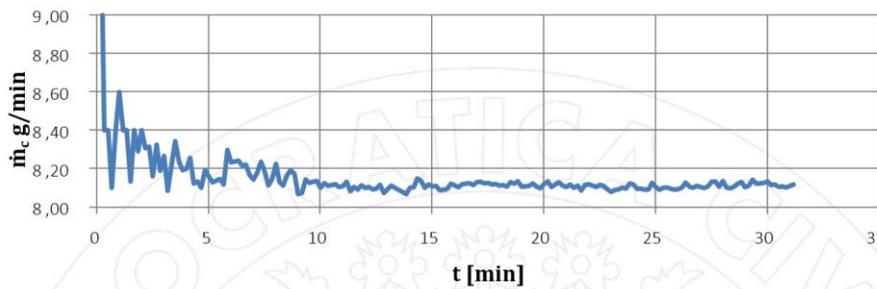


Figura 16 - Portata massica di combustibile.

Durante le prove è stata acquisita manualmente la potenza elettrica tramite il misuratore di potenza PCE – PA6000. I dati di potenza istantanea sono stati registrati a intervalli di 10 minuti. I due differenti livelli di temperatura, caratteristici delle tipologie di utenza citate nel precedente paragrafo, determinano rendimenti diversi, come indicato in Figura 17. Come ci si attendeva, il livello di temperatura più alto genera valori di rendimento più bassi, fattore essenzialmente imputabile al minor contributo della condensazione dell'acqua prodotta durante il processo di combustione.

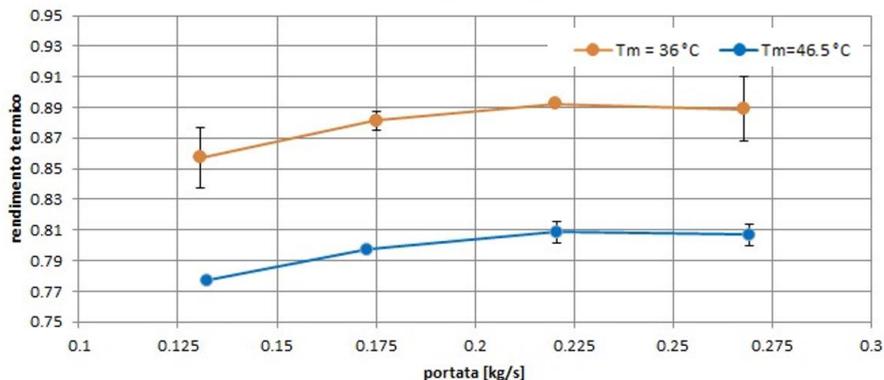


Figura 17 - Rendimento termico

Il rendimento elettrico, riportato in Figura 18, presenta un andamento decrescente con la portata. Ciò è imputabile all'aumento di potenza elettrica richiesta per il funzionamento degli ausiliari; in particolare il circolatore Grundfos VIUPM2 15-70 richiede una potenza crescente per assicurare l'aumento di portata richiesto.

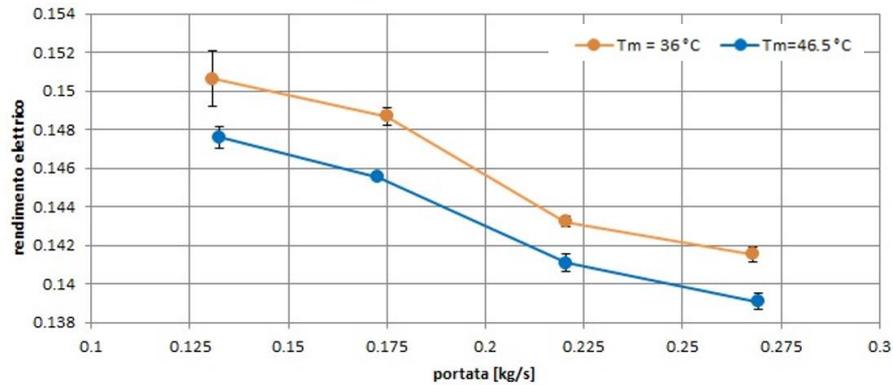


Figura 18 - Rendimento elettrico

L'aumento del rendimento elettrico nel passaggio dal livello termico superiore a quello inferiore potrebbe essere determinato dalla riduzione della temperatura di ritorno dell'acqua che incide sul rendimento ideale del ciclo Stirling. In particolare, la temperatura della testa calda è mantenuta mediamente costante nelle due diverse condizioni di prova, mentre la temperatura della testa fredda varia di circa una decina di gradi. In ogni caso la variazione percentuale del rendimento risulta minima data la scarsa variazione della temperatura di ritorno.