

POLITECNICO DI MILANO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria della Prevenzione e  
Sicurezza nell'Industria di Processo

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione



**Caratterizzazione dell'efficienza energetica di un  
edificio ad uso non abitativo in funzione dei  
fattori influenzanti meteorologici: definizione di  
Indici di Prestazione Energetica e Benchmarking**

Tesi di laurea di:

Federico Arangio  
Matricola 876224

Relatore:  
Prof. Loredana Cristaldi

Correlatore:  
Samantha Pilati

Anno accademico 2017/2018

## **Ringraziamenti**

Vorrei ringraziare innanzitutto la mia famiglia, per l'appoggio e il sostegno durante tutti questi anni di studio. Il percorso è stato lungo, ma meno impegnativo con il loro aiuto.

Ringrazio la Professoressa Loredana Cristaldi, che mi ha seguito durante il seguente lavoro di tesi, rendendosi sempre estremamente disponibile.

Infine un ringraziamento speciale a tutti i collaboratori della Fondazione Osservatorio Milano Duomo ed in particolare alla Dottoressa Samantha Pilati, per i consigli ad ogni mio dubbio e per le ore passate a rileggere i miei scritti.

# Sommario

Introduzione .....	4
1 - Contesto Operativo .....	6
1.1 - Meteorologia e climatologia .....	6
1.3 - Ottimizzazione energetica e meteorologia.....	11
1.4 - Normativa attuale.....	13
1.5 - Indici Microclimatici .....	21
2 - Caso studio .....	22
2.1 - Descrizione Edificio.....	22
2.2 - Descrizione stazione meteo .....	26
2.3 - Descrizione della centralina microclimatica .....	29
3 - Raccolta dati.....	35
3.1 - Consumi Termici .....	35
3.2 - Consumi Elettrici .....	37
3.3 - Numero degli occupanti edificio.....	39
3.4 - Dati meteorologici .....	42
3.5 - Dati microclimatici .....	47
4 - Applicazione modelli Indici di Prestazione Energetica.....	51
4.1 - 1° Metodo .....	53
4.2 - 2° Metodo .....	69
4.3 - 3° Metodo .....	71
5 - Analisi dati microclimatici .....	75
6 - Conclusioni .....	76
Bibliografia .....	78
Appendice 1.....	80
Appendice 2.....	82
Appendice 3.....	84

# Introduzione

L'efficientamento energetico è sicuramente una delle più grandi sfide che le piccole e grandi aziende sono chiamate a risolvere nella loro vita operativa. L'utilizzo errato e lo spreco di energia hanno effetti immediati sull'economia dell'organizzazione e futuri sull'ambiente e sul clima. Per incrementare il profitto bisogna anche ridurre i consumi di energia, considerando quest'ultima come una materia prima, direttamente collegabile e controllabile ai vari processi.

Per identificare le opportunità di risparmio vengono in aiuto la diagnosi energetica e il conseguente monitoraggio continuo dell'uso dell'energia. L'audit energetico viene definito come la "procedura sistematica volta a fornire un'adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o gruppo di edifici, di un'attività o impianto industriale o di servizi pubblici o privati, ad individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici e riferire in merito ai risultati" [D.lgs. 115/2008]. La diagnosi energetica è inoltre obbligatoria per le grandi imprese e aziende energivore, le quali vi si devono sottoporre ogni quattro anni.

Per quanto riguarda il monitoraggio in continuo dell'efficienza energetica, si tratta di un utilissimo strumento per migliorare la produttività di un processo o di un impianto e per prolungarne la vita utile. I consumi anomali sono solitamente sintomi della necessità di intervenire per ripristinare le corrette condizioni di funzionamento o per effettuare operazioni di manutenzione correttive e preventive.

Riguardo ad un sistema di gestione dell'efficienza energetica sarà quindi fondamentale il ruolo delle misure dei principali vettori energetici (per esempio elettricità e gas naturale) e di tutti i fattori che incidono sull'impiego dell'energia, i cosiddetti fattori influenzanti (per esempio numero di occupanti e temperatura esterna).

Attraverso tutto il lavoro di raccolta e analisi di tutti i dati sarà quindi possibile realizzare una diagnosi energetica completa, che porterà alla definizione di Indici di Prestazione Energetica (IPE), i quali permettono sia il confronto con aziende benchmark di settore sia di monitorare le prestazioni nel tempo. La definizione e il calcolo degli IPE sono però ancora oggetto di studio e non esiste una normativa con precise linee guida a riguardo.

La seguente tesi, sviluppata in collaborazione con la Fondazione Osservatorio Meteorologico Duomo (FOMD), si propone l'obiettivo, attraverso lo studio della vita energetica di un edificio del Politecnico di Milano, di ricavare la relazione che sussiste tra i consumi energetici e i fattori influenzanti.

Dopo aver definito il contesto operativo dell'edificio scelto, sono stati raccolti e valutati non solo gli impieghi energetici, ma anche tutti i fattori che influenzano il

funzionamento e i consumi dei sistemi sotto controllo. Nello specifico sono stati raccolti fattori operativi dinamici come il numero di occupanti, fattori operativi statici come le volumetrie degli ambienti climatizzati e fattori esterni come le condizioni meteorologiche. Successivamente sono stati definiti e calcolati tre modelli di IPE per la valutazione energetica degli edifici civili.

Infine si ricorda che per gli edifici civili è importante che l'efficienza energetica vada incontro ai bisogni degli occupanti e al loro comfort termico. Per questo motivo è stata effettuata una valutazione delle condizioni microclimatiche indoor attraverso una serie di misurazioni in più punti dell'edificio scelto nell'analisi energetica.

# 1 - Contesto Operativo

## 1.1 - Meteorologia e climatologia

Visto l'importanza che ricoprono i parametri meteorologici nel seguente lavoro di tesi, è opportuno introdurre e definire alcuni concetti di base. Bisogna inizialmente chiarire la differenza che intercorre tra meteorologia e climatologia e specificare, inoltre, cosa si intende per meteorologia urbana.

La **meteorologia** è la scienza che studia i fenomeni fisici che avvengono nella troposfera e le leggi fisiche che li governano. L'approccio alla materia è sia teorico, ovvero attraverso la modellazione delle leggi fisiche agenti sull'atmosfera, sia pratico; vengono infatti utilizzate osservazioni e misurazioni dirette e indirette attraverso stazioni meteo, sonde, razzi, palloni e satelliti meteorologici equipaggiati della necessaria strumentazione.

Uno degli scopi di questa scienza è individuare un modello matematico in grado di prevedere il comportamento atmosferico, specialmente quello che influisce sulle condizioni della superficie terrestre.

La **climatologia** può essere considerata come una branca della meteorologia, in quanto studia le condizioni atmosferiche medie in un arco di tempo prolungato per permettere la caratterizzazione dei parametri fisici tipici di un luogo specifico. Il periodo di tempo analizzato non deve essere né troppo breve né troppo lungo e per questo si utilizza solitamente un intervallo temporale di 30 anni. Il clima viene quindi definito come l'insieme delle condizioni meteorologiche medie di un determinato territorio su di un arco temporale di almeno 30 anni.

La **meteorologia urbana** si differenzia dalla materia classica in quanto considera anche gli effetti provenienti dall'attività umana, che si manifestano nell'atmosfera.

La sempre maggior crescita della popolazione e dell'urbanizzazione globale sta causando un impatto evidente sull'atmosfera e sull'ecosistema urbano. Si può studiare l'impatto che le città hanno sull'ambiente attraverso l'analisi di flusso materiale e di energia, usando il concetto di metabolismo urbano. I conglomerati urbani possono essere schematizzati come un sistema al cui interno scorrono flussi di energia e di materia. Le città sono rifornite con energia, carburante, acqua e cibo, che vengono convertiti in beni usati dagli organismi, con conseguente produzione di rifiuti solidi, acque nere e aria inquinata.

I sistemi urbani sono caratterizzati dalla forma urbana (layout degli edifici e della città) e dalla funzione urbana (attività e scopi); entrambi influiscono sull'atmosfera attraverso processi fisici o chimici. Attualmente la sfida è intervenire coscientemente sulla forma e sulla funzione urbana per rendere più resilienti le città e utilizzare le risorse in modo più

efficace, in quanto le città moderne non sono sostenibili dipendendo largamente da risorse fossili. Per far ciò viene in aiuto la **climatologia urbana** che aiuta a prendere decisioni per usare efficientemente acqua ed energia, mitigare il clima e combattere l'inquinamento dell'aria.

Un'ulteriore differenza che intercorre tra queste tre materie riguarda i sistemi di misura, la gestione dei dati acquisiti e il loro confronto. Alla fine del diciannovesimo secolo iniziarono a formarsi i primi centri di registrazione e misurazione dei dati meteorologici, che comunicavano tra loro attraverso l'uso del telegrafo. Lentamente venne a formarsi un network di stazioni meteo e informazioni, che ricopre ora la maggior parte del suolo terrestre, e che è formalmente gestito dalla World Meteorological Organization (WMO) la quale si occupa del coordinamento tra i network meteo nazionali. Il sistema di osservazione, comunicazione, analisi e previsione è chiamato World Weather Watch (WWW). Le previsioni sono adatte per definire il tempo meteorologico su larga scala e in particolare si utilizza la scala sinottica, la quale studia i moti atmosferici e oceanici su lunghezze orizzontali variabili da centinaia a migliaia di chilometri, mediati su tempi nell'ordine delle 12-24 ore. [1]

Le misure sinottiche sono regolamentate dalla WMO e pertanto sono confrontabili. Contrariamente la scala urbana non è compatibile con la scala sinottica in quanto quest'ultima non tiene conto degli effetti influenzanti degli edifici e della città, considerando solo l'ambiente naturale.

L'atmosfera urbana è completamente diversa da quella rurale ed è più complessa.

Un altro problema della climatologia urbana è dato dal fatto che, nel corso dei 30 anni considerati per lo studio del clima, inevitabilmente il layout della città continua a modificarsi, rendendo le misure disomogenee tra di loro.

Le principali variabili meteorologiche campionate dalle stazioni in ambito urbano sono: temperatura, pressione, velocità e direzione del vento, umidità relativa, precipitazioni e radiazione.

E' importante capire cosa la misura rappresenta. Le misure, infatti, dipendono dal punto di campionamento ad esempio livello strada, piazza, parchi, edifici, torri meteorologiche. Pertanto, in caso di diverse localizzazioni delle stazioni meteorologiche, non è possibile confrontare tra loro le misure.

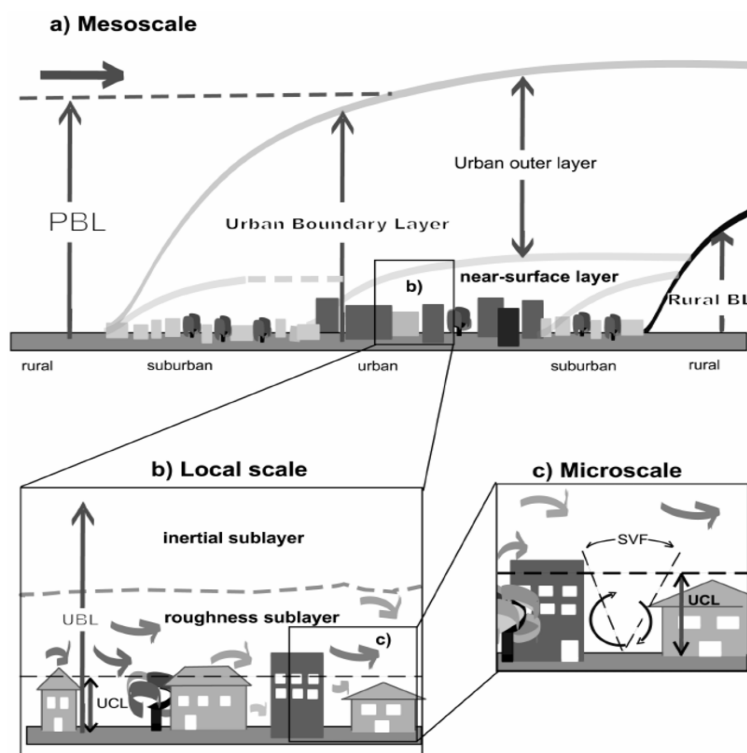
Infine è utile definire il contesto delle misurazioni, ovvero come l'ambiente viene suddiviso in base all'influenza degli edifici urbani, della loro dimensione e aggregazione.

Nello studio della climatologia urbana è importante il fattore di scala. Infatti, mentre i processi fisici sono immutabili, la loro influenza sull'atmosfera urbana varia con la scala. L'unità più piccola è il **facet** (muro/tetto per esempio) che ha delle certe proprietà come il materiale, forma e aspetto. Più parti formano un **elemento urbano** come un

edificio. La combinazione di elementi costruiscono caratteristiche forme urbane come **canyons e blocks**. La diversità di questi elementi rende il paesaggio urbanistico spazialmente eterogeneo in macroscale, tuttavia per grandi aree le città tendono ad avere caratteristiche simili: questi sono i **neighbourhoods** con simili caratteristiche interne. Questi ultimi formeranno infine la **città**.

Per quanto riguarda l'atmosfera urbana, essa può essere divisa in molteplici strati, racchiusi dal **Planetary Boundary Layer** che è lo strato di troposfera a contatto con il suolo dove avvengono tutti i moti convettivi di calore e di quantità di moto. **L'Urban Boundary Level (UBL)** comprende lo strato d'aria che è modificato dalla presenza di un'area urbana; può essere di 1-2 km di giorno e di 100 m di notte. Il **Surface Layer (SL)** si colloca nella parte più vicina al suolo cittadino ed ha uno spessore di circa il 10% dell'UBL. Si tratta della zona dove gli effetti dell'influenza della città sono più manifesti; le sue proprietà vengono gradualmente diluite mischiandosi con lo strato superiore **Mixed Layer (ML)**. Il SL è diviso in **Inertial Sublayer (ISL)** e **Roughness Sublayer (RSL)**. Il RSL, poco profondo e molto turbolento, manifesta in microscala gli effetti dovuti dall'influenza di ogni singolo facet ed elemento urbano. Presenta un'altezza di 1.5/3 volte quella degli edifici e incorpora l'**Urban Canopy Layer**, il quale può essere considerato sotto la media dell'altezza degli edifici. Infine nel ISL, il quale separa il RSL dal ML, gli effetti della turbolenza degli elementi urbani sono miscelati con quelli provenienti dalla presenza dei neighbourhoods. [2]

La suddivisione in strati dell'atmosfera urbana viene riepilogata nella seguente figura.



**Figura 1.1** Suddivisione dell'atmosfera urbana



## **1.2 - L'importanza di una rete di stazioni diffusa, l'esperienza della Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo**

La stesura della seguente tesi è stata sviluppata durante un'esperienza di stage presso la Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo (Fondazione OMD). Tutti i dati meteorologici utilizzati provengono da un dispositivo presente sul tetto dell'edificio 14 del Politecnico di Milano e riconducibile ad una rete di stazioni meteorologiche gestite dalla Fondazione OMD: Climate Network. [3]

Sviluppata a partire dal 2010, Climate Network è una rete di stazioni meteorologiche professionali e consiste in quasi 50 punti di misura, distribuiti uniformemente nei principali capoluoghi italiani. Nell'area metropolitana milanese sono presenti 20 stazioni, di cui 8 nella città di Milano. In questo modo è possibile analizzare le differenze in aree diverse della stessa città e osservare come il layout urbano influenza le variabili meteorologiche.

Le caratteristiche principali della rete sono:

- Criteri omogenei di posizionamento delle stazioni
- Identica tipologia di sensori per tutte le stazioni
- Completa tracciabilità delle misure e riferibilità agli standard metrologici nazionali
- Procedure di controllo e assicurazione qualità
- Validazione giornaliera dei dati operata da meteorologi

### **1-Criteri omogenei di posizionamento delle stazioni**

Tutte le stazioni soddisfano i requisiti suggeriti dalla WMO, viene quindi fornita una rappresentazione corretta dell'Urban Canopy Layer. I dispositivi sono posizionati su superfici distanti da muri, da altri edifici e da qualsiasi altro elemento che potrebbe influenzare la misura. Inoltre i tetti o le terrazze che ospitano gli strumenti presentano un valore di albedo simile ( $\approx 0,2$ ). Tutti questi accorgimenti presi nel posizionamento delle stazioni garantiscono la piena confrontabilità dei dati.

### **2-Identica tipologia di sensori per tutte le stazioni**

La rete è composta da stazioni meteorologiche identiche, le quali implementano moderne tecnologie che garantiscono misurazioni continue e affidabili. I parametri misurati sono:

- Temperatura
- Umidità relativa
- Pressione atmosferica

- Precipitazione (quantità, intensità, durata)
- Grandine (quantità, intensità, durata)
- Velocità e direzione del vento
- Radiazione solare

### **3-Tracciabilità delle misure e assicurazione qualità**

La tracciabilità è uno dei requisiti più importanti per la definizione di qualità delle misure. Il bisogno di procedure operative e misurazioni riferite agli standard ha portato la Fondazione alla creazione di un laboratorio interno di calibrazione. Tutte le misure sono caratterizzate da una catena di riferibilità ben documentata e la periodica calibrazione è effettuata in completa autonomia. La Fondazione collabora attivamente con l'INRIM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica) per avere un pieno controllo sui dati misurati e sulle loro incertezze.

L'obiettivo è l'ottimizzazione della gestione del network, sviluppato a livello nazionale, soddisfacendo alti standard di qualità. Per raggiungere questo scopo, i sensori sono soggetti a manutenzione periodica e tutte le operazioni d'ispezione e calibrazione sono eseguite all'interno del laboratorio della Fondazione. Le stazioni sono inserite in una rotazione di sostituzioni annuali, la quale permette di effettuare la manutenzione in laboratorio e non a campo, garantendo una continuità di misura.

Le incertezze di misura di Climate Network sono:

- $T \leq 0,2^{\circ}\text{C}$  tra  $[-20^{\circ}\text{C}, +50^{\circ}\text{C}]$
- $UR = 3\%$

### **4-Validazione giornaliera dei dati**

Tutti i parametri registrati vengono periodicamente analizzati attraverso algoritmi che evidenziano l'affidabilità delle misure e validati dai meteorologi della Fondazione.

## 1.3 - Ottimizzazione energetica e meteorologia

In Italia, l'evento meteorologico viene considerato come un costo passivo, non venendo quindi gestito e valutato a priori. Invece le attività economiche sono largamente influenzate dal clima e dal tempo meteorologico. Infatti il raffrescamento e il riscaldamento dell'ambiente di lavoro e domestico sono determinati dai parametri ambientali esterni, come la temperatura e l'umidità relativa. I consumi energetici derivanti da ciò costituiscono una parte consistente del bilancio energetico nazionale: il comparto civile (residenziale e terziario) corrisponde al 40% dei consumi nazionali, di cui il 70% deriva dal solo riscaldamento invernale (Fonte: elaborazione ENEA su dati MISE, 2018).

Nell'analizzare le spese energetiche del sistema edificio-impianto, uno dei punti cruciali è stimare il reale consumo energetico e quantificare i fattori che lo determinano. È a questo livello che va inquadrata l'importanza del dato meteorologico misurato: i parametri meteorologici sono variabili indipendenti, correlati al fabbisogno energetico.

Tre sono i livelli per cui la valenza economica derivata dai parametri meteorologici e climatologici non può essere trascurata:

- Contrattuale
- Gestionale
- Progettuale

Per quanto riguarda il livello **Contrattuale**, la temperatura dell'aria esterna è in stretta relazione con l'energia utilizzata per riscaldare un edificio e quindi con la bolletta energetica. L'argomento viene affrontato dal DPR 412/93, il quale definisce che: "il Fabbisogno Energetico è direttamente proporzionale alla somma dei Gradi Giorno nella stagione termica di riscaldamento relativamente al comune in cui è localizzato l'impianto termico". In tale legislazione, viene introdotto un parametro fondamentale per l'ottimizzazione energetica: i Gradi Giorno. Questi sono definiti come la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra una temperatura predefinita per l'ambiente interno (per esempio 20°C per edifici residenziali) e la temperatura dell'aria media giornaliera. Le Linee Guida che si occupano dell'efficientamento energetico degli edifici prevedono, nella stipula dei contratti servizio energia, la contabilizzazione in funzione dei Gradi Giorno misurati dalla stazione meteo più vicina possibile.

Nell'analizzare invece il raffrescamento estivo, bisogna tenere conto che la percezione di calore non dipende solo dalle alte temperature, ma anche da altre grandezze meteorologiche come umidità relativa, radiazione solare e intensità del vento. Il fabbisogno energetico per il condizionamento estivo può essere quindi visto, ad esempio, in funzione di un opportuno indice climatico: l'Humidex. Questo parametro

quantifica la temperatura percepita in rapporto alla temperatura dell'aria e alla sua umidità relativa. Analogamente per il riscaldamento, viene definito il Grado Giorno Estivo (GGE) come la differenza tra l'Humidex medio giornaliero e la temperatura dell'ambiente interno desiderata. Il fabbisogno energetico estivo sarà quindi proporzionale al GGE.

A causa della diversa forma e funzione degli edifici in una città, la temperatura dell'aria si differenzia all'interno dell'area urbana. Questo fenomeno condurrà ad un differente fabbisogno energetico per edifici simili, ma localizzati in diverse aree cittadine. Nella contabilizzazione economica dei consumi energetici, definiti a partire dai Gradi Giorno, è fondamentale l'uso di dati e misure meteorologiche affidabili, di alta qualità e rappresentative dell'edificio analizzato. Infatti sono molteplici i fattori che possono influenzare la misura di temperatura, i quali possono sfociare in incertezze superiori al grado centigrado e alla perdita di linearità. Alcuni di questi parametri influenzanti sono:

- Aspetti strumentali
- Aspetti di taratura periodica
- Manutenzione periodica e validazione dati
- Quota e micro posizionamento della strumentazione

A livello **Gestionale**, i dati meteorologici sono altrettanto fondamentali perché costituiscono una variabile di controllo sistematico degli impianti. Nello specifico permettono di valutare la performance di un impianto termico e ottimizzarne la gestione attraverso il telecontrollo e la telegestione. Il dato meteorologico è un'ottima variabile di verifica sul funzionamento degli impianti perché il fabbisogno energetico è correlato ad indici climatologici e il parametro meteo è una variabile indipendente rispetto alle altre grandezze che caratterizzano l'impianto.

Infine, la meteorologia influenza il settore energetico anche a livello **Progettuale**. La progettazione degli interventi di efficientamento energetico deve essere appoggiata da una serie pluriennale di dati sulle condizioni climatiche dell'ambiente urbano. Attraverso la conoscenza dello storico climatico in un'area particolare e grazie ad una rete meteorologica urbana in grado di fornire dati misurati in tempo reale, i nuovi programmi di sviluppo di automazione domestica potranno essere perfettamente implementati nelle città del futuro.

## 1.4 - Normativa attuale

I consumi energetici del sistema edificio-impianto sono sotto la lente d'ingrandimento di legislatori, autori di norme tecniche e professionisti di diversi settori. Le principali normative e decreti che si occupano del problema della gestione ed efficienza energetica sono i seguenti.

### DPR 412/93

Il decreto del Presidente della Repubblica si occupa del "*Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia*".

Nell'articolo 2 e nelle corrispondenti tabelle allegate, il territorio nazionale viene suddiviso in 6 differenti zone climatiche in funzione dei gradi giorno, indipendentemente dalla loro ubicazione geografica.

- Zona A: comuni che presentano un numero di gradi-giorno non superiore a 600.
- Zona B: comuni che presentano un numero di gradi-giorno maggiore di 600 e non superiore a 900.
- Zona C: comuni che presentano un numero di gradi-giorno maggiore di 900 e non superiore a 1400.
- Zona D: comuni che presentano un numero di gradi-giorno maggiore di 1400 e non superiore di 2100.
- Zona E: comuni che presentano un numero di gradi-giorno maggiore di 2100 e non superiore di 3000.
- Zona F: comuni che presentano un numero di gradi-giorno maggiore di 3000.

Successivamente vengono classificati gli edifici per categorie in base alla loro destinazione d'uso. Viene quindi decretata una temperatura soglia che deve essere raggiunta, con il minimo spreco di energia, durante il periodo di funzione dell'impianto di climatizzazione invernale nei diversi ambienti di ogni singola unità immobiliare. Questo valore è pari a  $18^{\circ}\text{C} + 2^{\circ}\text{C}$  di tolleranza per gli edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e a  $20^{\circ}\text{C} + 2^{\circ}\text{C}$  di tolleranza per gli edifici di altre categorie.

Proseguendo, nell'articolo 5 vengono illustrati i requisiti e il dimensionamento degli impianti termici. Sia quelli nuovi sia quelli sottoposti a ristrutturazione devono essere dimensionati in base al valore massimo di temperatura visto precedentemente, alle caratteristiche climatiche della zona, alle caratteristiche termofisiche dell'involucro edilizio e al "rendimento globale medio stagionale". Questo parametro viene definito come il rapporto tra il fabbisogno di energia termica utile per la climatizzazione invernale e l'energia primaria delle fonti energetiche. [4]

## ISO 50001:2011

La norma ISO 50001:2011 riveste la parte energetica nel pacchetto normativo sui Sistemi di Gestione. Il documento normativo, utile per imprese di qualsiasi dimensione e tipologia, definisce i requisiti per un sistema di gestione dell'energia attraverso un approccio sistematico e pianificato per un continuo miglioramento delle proprie prestazioni energetiche.

Così come le altre norme di Sistemi di Gestione, la ISO 50001:2011 si focalizza su:

- Coinvolgimento e partecipazione dei fornitori strategici
- Sensibilizzazione e definizione delle parti interessate
- Responsabilizzazione del personale
- Concezione della prevenzione
- Designazione di un responsabile di sistema
- Disponibilità di risorse, mezzi e professionalità adeguati
- Formalizzazione di un impianto documentale scritto
- Realizzazione periodica di verifiche per rilevare non conformità
- Revisione periodica da parte della Direzione del sistema

In analogia ai Sistemi di qualità in ambito produttivo e ambientale, un Sistema di Gestione dell'Energia richiede l'iterazione del ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act):

- **Plan:** attraverso la diagnosi energetica stabilire i consumi di riferimento, gli Indicatori di Prestazione Energetica, gli obiettivi e le azioni necessarie per raggiungere i risultati per il miglioramento dell'efficienza energetica in accordo con le esigenze dell'Organizzazione.
- **Do:** eseguire le azioni stabilite nel punto precedente.
- **Check:** monitorare e misurare i processi che determinano l'efficienza energetica.
- **Act:** valutare i risultati ottenuti, prendere azioni per migliorare continuamente il Sistema di Gestione Energetica.

La diagnosi iniziale è fondamentale per identificare le aree d'uso dell'energia, le opportunità di miglioramento e gli ambiti di gestione. Le informazioni risultanti consentiranno la definizione di programmi, obiettivi e finalità. Per monitorare e misurare l'efficienza energetica dell'Organizzazione, bisogna identificare degli appropriati Indicatori di Performance Energetica (IPE). Gli IPE possono essere singoli parametri oppure parte di modelli più complessi, a seconda delle dimensioni, dell'attività e della complessità dei consumi energetici dell'Organizzazione.

## Direttiva 2010/31/UE

Il 40% circa del consumo energetico europeo è imputabile agli immobili. Per questo motivo l'Unione Europea ha emanato nel 2010 la direttiva 2010/31/UE per l'efficienza

energetica degli edifici (meglio conosciuta come “EPBD” - Energy Performance of Buildings Directive), che è stata aggiornata nel 2010 con la direttiva 2010/31/UE. Quest’ultima fornisce le indicazioni per il miglioramento della prestazione energetica degli edifici all’interno dell’Unione (considerando sia le condizioni locali sia climatiche esterne) e le prescrizioni relative al clima degli ambienti interni e all’efficacia economica.

La direttiva si sviluppa in 30 articoli e tratta nello specifico i temi seguenti:

- Definizione di requisiti minimi di prestazione energetica
- Generale linea guida di metodologia per il calcolo della prestazione energetica integrata degli edifici e delle unità immobiliari
- Applicazione di requisiti minimi alla prestazione energetica di:
  1. Edifici esistenti, unità immobiliari ed elementi edilizi sottoposti a ristrutturazioni importanti
  2. Elementi edilizi che fanno parte dell’involucro dell’edificio e hanno un impatto significativo sulla prestazione energetica dell’involucro dell’edificio quando sono rinnovati o sostituiti
  3. Sistemi tecnici per l’edilizia quando sono installati, sostituiti o sono oggetto di un intervento di miglioramento.
- Definizione degli edifici ad energia quasi zero
- La certificazione energetica degli edifici o delle unità immobiliari
- L’ispezione periodica degli impianti di riscaldamento e condizionamento d’aria negli edifici
- I sistemi di controllo indipendenti per gli attestati di prestazione energetica e i rapporti d’ispezione

Secondo la nuova direttiva, gli Stati membri devono provvedere al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero
- a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi siano edifici a energia quasi zero

Un **edificio a energia quasi zero**, viene definito secondo normativa come: "*edificio ad altissima prestazione energetica,[...]. Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da fonti rinnovabili, compresa l’energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze*". La direttiva contiene la definizione, ma lascia ad ogni Stato Membro la libertà di individuare quali caratteristiche deve avere la costruzione e come la si deve realizzare.

Per quanto riguarda il certificato di prestazione energetica, che ha una validità massima di 10 anni, dovrà essere rilasciato:

- Per gli edifici o le unità immobiliari costruiti, venduti o locati ad un nuovo locatario.
- Per gli edifici in cui una porzione di oltre 500 m<sup>2</sup> è occupata da enti pubblici e frequentata dal pubblico. Dopo cinque anni dall'entrata in vigore della direttiva, la soglia di 500 m<sup>2</sup> è abbassata a 250 m<sup>2</sup>.

Per il calcolo della prestazione energetica degli edifici bisogna tenere conto, oltre alle caratteristiche climatiche esterne, delle caratteristiche termiche degli edifici e dei suoi elementi interni (capacità termica, isolamento, elementi di raffrescamento), degli impianti di riscaldamento e di produzione di acqua calda, dell'impianto di condizionamento, di illuminazione e di tutte le caratteristiche costruttive dell'edificio. Bisogna inoltre considerare la funzione della costruzione (ad esempio abitazioni, uffici, scuole, ospedali).

In Italia la direttiva europea è stata recepita con la Legge n°90 del 03/08/2013. [5] [6]

## **Direttiva 2012/27/UE**

La direttiva 2012/27/UE del 25 ottobre 2012 stabilisce un quadro comune di misure per la promozione dell'efficienza energetica per una crescita intelligente. L'obiettivo dell'Unione europea è, attraverso un uso consapevole dell'energia, la riduzione del 20% del consumo di energia primaria dell'Unione entro il 2020 e di realizzare ulteriori miglioramenti in materia di efficienza energetica dopo il 2020. Per realizzare ciò, è necessario aumentare il tasso delle ristrutturazioni di immobili, in quanto il parco immobiliare esistente rappresenta il settore individuale con le maggiori potenzialità di risparmio. Ulteriore obiettivo è la riduzione dell'80-95% delle emissioni di gas serra entro il 2050 rispetto al 1990. Risulta quindi lecito fissare un tasso annuo di ristrutturazione per gli edifici di proprietà del governo centrale nel territorio di uno Stato membro. [7]

I punti principali della norma possono essere così riepilogati:

- **Articolo 5:** Per gli edifici pubblici dotati di impianti di climatizzazione con aree calpestabili superiori ai 500 mq scatta l'obbligo di aumentare il grado di isolamento termico, procedendo a rinnovare annualmente il 3% delle pavimentazioni. A partire da luglio 2015 il rinnovo riguarderà anche gli edifici pubblici che presentano aree calpestabili superiori a 250 mq.
- **Articolo 7:** Anche le imprese energetiche di pubblica utilità avranno l'obbligo di raggiungere un risparmio energetico di almeno 1,5% per anno sul totale dell'energia venduta ai consumatori finali. Il calcolo del risparmio energetico aggiuntivo va effettuato sulla base della media dei consumi dei 3 anni precedenti l'entrata in vigore della direttiva 2012/27/UE. Possono invece essere escluse le vendite di energia per i trasporti.



- **Articolo 8:** Obbligo di audit energetico, da effettuarsi ogni 4 anni, per le grandi imprese, mentre sono escluse le piccole e medie imprese. Gli audit dovranno iniziare entro dicembre 2015 ed essere svolti in modo indipendente da esperti accreditati.

## **Direttiva 2018/844/UE**

La legge europea interviene modificando la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. L'obiettivo della nuova direttiva è *“lo sviluppo di un sistema energetico sostenibile, competitivo, sicuro e decarbonizzato”*.

La principale modifica della direttiva UE è l'introduzione di un **“indicatore di predisposizione degli edifici all'intelligenza”**. L'obiettivo dell'indicatore è quello di *“sensibilizzare i proprietari e gli occupanti sul valore dell'automazione degli edifici e del monitoraggio elettronico dei sistemi tecnici per l'edilizia e dovrebbe assicurare gli occupanti circa i risparmi reali di tali nuove funzionalità migliorate”*.

Tale indicatore misura la capacità degli edifici di adattare il consumo energetico alle reali esigenze degli abitanti, migliorando la propria operatività e interazione con la rete. Attraverso l'indicatore dovrebbe essere possibile, oltre che analizzare le caratteristiche di maggior risparmio energetico, anche tener conto di dispositivi intelligenti e connessi. Questo strumento necessita comunque di essere sviluppato dalla commissione europea e la sua redazione è prevista entro la fine del 2019. [8]

## **Norma UNI EN 15232:2017**

Per ridurre i consumi di energia è necessario analizzare il problema attraverso la ricerca dell'Efficienza Energetica negli Edifici. Come già riportato prima gli edifici nel settore residenziale/terziario consumano quasi il 40% dell'energia disponibile e provocano un livello simile di emissioni di CO<sub>2</sub>.

Per massimizzare l'efficienza energetica bisogna quindi implementare dei sistemi di gestione, quali i sistemi di automazione e controllo degli edifici, tenendo sempre in considerazione le condizioni ambientali esterne e i differenti profili di utilizzo e occupazione dei singoli ambienti.

Per la loro implementazione e per stimarne l'impatto sulle prestazioni energetiche è stata istituita la norma UNI EN 15232, che ha introdotto una classificazione delle funzioni di controllo degli impianti tecnici degli edifici. Per ogni funzione sono stati definiti diversi livelli di complessità in relazione alla classe di efficienza energetica. La norma non si occupa solo di dare indicazioni su come realizzare gli impianti di

automazione, ma fornisce anche un metodo per la stima dell'impatto dei sistemi di automazione sulle prestazioni energetiche. [9] [10]

La norma definisce quattro classi di efficienza (A – B – C – D) per i sistemi di automazione degli edifici, valide sia per le applicazioni di tipo residenziale sia per quelle di tipo non residenziale. Questa classificazione permette di individuare chiaramente lo standard energetico di un edificio secondo la seguente tabella:

- Classe D: Non efficiente (impianti non automatizzati)
- Classe C: Standard (Impianti automatizzati con apparecchi di controllo tradizionali o con sistemi *Building Automation and Controls System BACS/ Home and Building Electronic Systems HBES*)
- Classe B: Avanzato (Impianti controllati con un sistema di automazione BACS/HBES ma dotati anche di una gestione centralizzata e coordinata)
- Classe A: Alta efficienza Energetica (come la classe B ma con livelli di precisione del controllo automatico molto elevati).

## **DRAFT prEN 17267**

Per migliorare le performance energetiche di un edificio è necessario adottare un efficiente sistema di misura dell'energia. In mancanza di un'attuale linea guida, questo documento individua le metodologie per un sistema di misure per il monitoraggio e l'analisi delle prestazioni energetiche di un'organizzazione, coinvolgendo nello studio tutti i fattori che influiscono sulle sue operazioni. Il testo è valido per qualsiasi tipo di energia e di organizzazione, ad esclusione delle abitazioni domestiche.

Lo scopo del monitoraggio energetico è quello di mantenere nel tempo un sistema di misurazioni atto a descrivere la performance energetica e confrontarla con gli obiettivi preposti. Permette inoltre di individuare le cause di anormali discostamenti di consumo energetico e di monitorare i parametri più rilevanti dell'installazione. Non sono poi da trascurare i benefici di cui si potrebbe trarre in futuro, come l'individuazione di eventuali migliorie e il sostentamento dell'efficienza nel tempo. [11]

L'organizzazione di un piano di misure si sviluppa in 6 steps:

### **1. Definizione del contesto, obiettivi e limitazioni**

Bisogna definire le motivazioni e le intenzioni dell'organizzazione, evidenziando le caratteristiche principali delle operazioni di misura, analisi, monitoraggio e manutenzione del sistema di misura. Queste caratteristiche sono:

il contesto del piano di monitoraggio, le motivazioni per cui lo si vuole implementare e le sue limitazioni.

Inoltre sono da chiarire tutti gli utilizzatori del piano, dal top manager al consumatore finale. La pianificazione deve procedere con la filosofia del *risk-based thinking* per gestire in modo efficiente il budget e le risorse. Infine l'organizzazione deve delimitare l'appropriatezza del suo sistema di misura in base alle sue necessità. Tre livelli sono definiti in base all'abilità di trattamento dati e alla profondità di ispezione e complessità del sistema.

## **2. Valutazione del contesto**

Inizialmente bisogna censire e analizzare tutti i dati e gli strumenti a disposizione per ottenere il maggior numero di informazioni possibili. In base alla sua attività, l'organizzazione deve delimitare il suo spazio operativo in zone ed effettuare una lista dell'energia consumata dalle installazioni e utilizzata dai dispositivi per ciascuna zona. L'organizzazione deve inoltre evidenziare tutte le variabili che possono influenzare il consumo di energia come ad esempio: il rateo di produzione, condizioni climatiche come la temperatura e l'umidità, la radiazione solare, i gradi giorno, la pressione atmosferica, direzione e velocità del vento. Sono da definire anche i fattori statici che sono propri dell'organizzazione come: dimensioni dell'edificio, orari di apertura, numeri di occupanti, etc. Infine l'organizzazione deve elencare i parametri che influenzano la performance energetica delle installazioni, monitorando i flussi di energia e determinando i sistemi di trasmissione, raccolta e analisi dati.

## **3. Valutazione delle azioni che migliorano il sistema di misurazione**

Per raggiungere gli obiettivi stabiliti dall'organizzazione, bisogna definire tutte le operazioni da intraprendere per lo sviluppo del piano. Le migliorie possono essere raggiunte per esempio installando nuovi punti di misurazione in diverse zone, aumentando la frequenza di campionamento, analizzando più in dettaglio i fattori influenzanti e affinando il sistema di analisi dati. La priorità degli interventi deve essere decisa studiando in contemporanea i costi totali, l'utilizzo di energia e i potenziali perfezionamenti. Il piano d'azione deve essere periodicamente rivisto in accordo con gli obiettivi e i risultati ottenuti.

## **4. Implementazione del sistema di misurazione**

In questo step le azioni dichiarate nel punto precedente vengono messe in atto. La scelta dei dispositivi di misura deve sempre essere consona agli obiettivi e deve inoltre seguire i seguenti criteri: normativa vigente; restrizioni riguardo le proprietà dei fluidi, caratteristiche delle tubazioni, condizioni ambientali,

installazione; budget; accuratezza e performance desiderata; consistenza con un già esistente sistema di misura.

In una catena di misura, il livello di incertezza di un dispositivo è commisurato con il livello di incertezza tollerato sul parametro finale valutato. Per ogni strumento selezionato, l'organizzazione deve fornire tutti i documenti necessari per l'identificazione e la tracciabilità. Infine durante l'installazione bisogna stare attenti a seguire tutte le raccomandazioni fornite dalla casa produttrice e scegliere la posizione di collocamento con cura.

## **5. Utilizzo dei dati misurati**

Le misure acquisite devono permettere di calcolare indicatori che saranno alla base delle azioni di miglioramento della performance energetica. Inoltre i dati ottenuti sono utili per monitorare lo stato operativo del sistema e verificare che non ci siano problemi.

L'architettura del sistema di informazione dovrebbe essere suddivisa in cinque livelli:

- Acquisizione dati:
- Archiviazione dati
- Analisi dati
- Conoscenza delle informazioni in base ai diritti di accesso
- Sicurezza dei dati e delle informazioni

## **6. Mantenimento del sistema di misurazione**

La continuità di funzionamento del sistema di misura deve essere assicurato e ogni malfunzionamento deve essere individuato e gestito. Per raggiungere questi obiettivi, l'organizzazione deve effettuare controlli periodici sui dispositivi di misura e revisioni in base alle caratteristiche. Inoltre i controlli devono essere effettuati sul sistema di misura, assicurando che i dati vengano acquisiti senza perdita di informazioni.

## 1.5 - Indici Microclimatici

L'efficienza energetica negli edifici civili deve andare incontro al comfort termico percepito dagli occupanti. Si definisce benessere termico la condizione mentale umana di soddisfazione per l'ambiente termico circostante. La valutazione degli ambienti termici viene effettuata utilizzando gli indici previsti dalle norme tecniche internazionali di settore. Tali parametri quantificano lo scambio termico che avviene tra soggetto e ambiente secondo modalità fisiche (convezione, conduzione, irraggiamento) e fisiologiche (produzione ed evaporazione del sudore) nei diversi tipi di ambiente termico.

Gli indici di riferimento per ambienti moderati, definiti secondo la norma UNI EN ISO 7730:2006, sono:

- **Voto medio previsto (PMV)**  
Indice che predice il valore medio dei voti di un consistente gruppo di persone su una scala di sensazione termica a 7 punti, da "+3 = molto caldo" a "-3 = molto freddo". Si basa sul bilancio di energia termica del corpo umano, che è verificato quando la produzione interna di energia termica eguaglia la quantità di energia termica ceduta dal sistema.
- **Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD)**  
Indice che fornisce una previsione quantitativa in percentuale del numero di persone insoddisfatte dal punto di vista termico, che sentono o troppo freddo o troppo caldo. Viene ricavata tramite il valore del PMV.
- **Draught Rate (DR)**  
Indice, in funzione della temperatura, della velocità dell'aria e della turbolenza, che permette di valutare la percentuale di persone infastidite dalla corrente d'aria in ambienti moderati. Durante il lavoro di tesi, è stata effettuata una campagna di misure per valutare il comfort termico ambientale ed il DR è stato calcolato direttamente dalla strumentazione utilizzata.

## 2 - Caso studio

### 2.1 - Descrizione Edificio

#### Scelta dell'edificio

L'edificio designato per lo studio oggetto di tesi è l'edificio 26, ubicato in via Golgi 20 e facente parte del Politecnico di Milano. La scelta è ricaduta su questa costruzione dopo aver vagliato attentamente tutti gli stabili del Politecnico ed avere identificato le opportunità per ottenere la maggiore disponibilità di dati energetici.

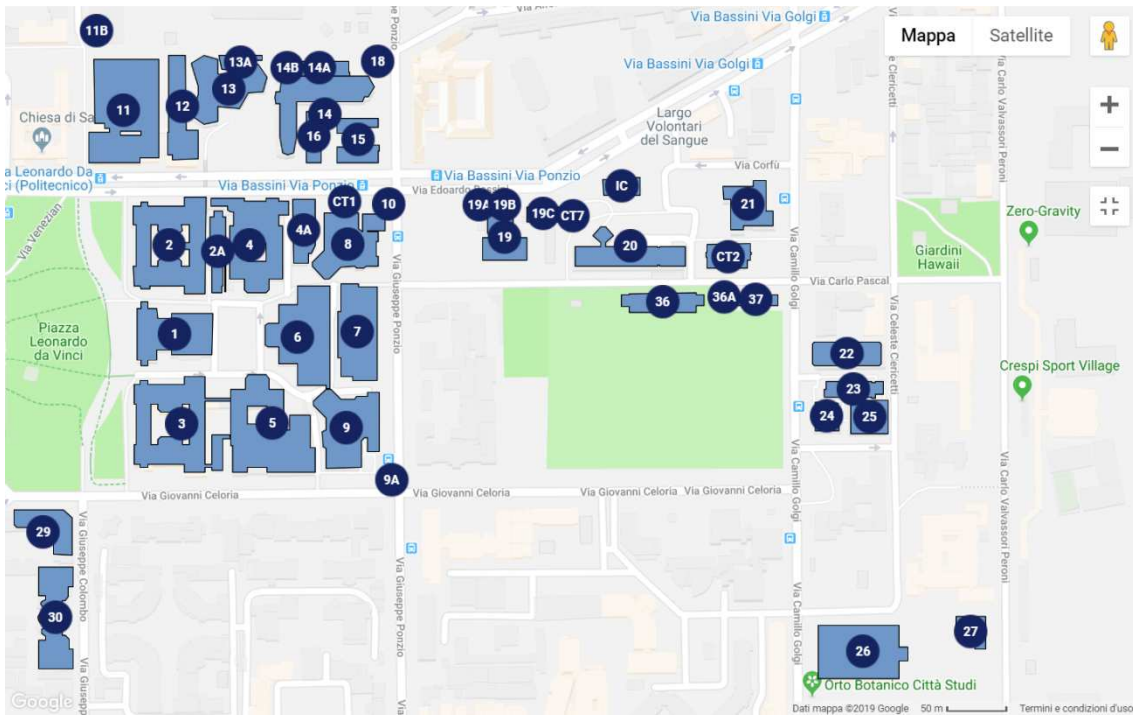
I campus del Politecnico sono alimentati da una centrale termica che riscalda gli edifici tramite teleriscaldamento attraverso una rete di distribuzione sotterranea. I dati riferiti al carico termico possono essere ricavati direttamente dall'ente erogatore del servizio per gli anni precedenti al 2018. In linea con le nuove direttive, che evidenziano l'importanza di un sistema adatto di misurazione, i dati dal 2018 vengono ricavati tramite sensori con un dettaglio ogni dieci minuti e gestiti dall'Energy Team per il Politecnico di Milano.

Analoga la situazione per i consumi elettrici: fino al 2018 le misurazioni venivano effettuate sul POD di distribuzione, mentre successivamente sulla rispettiva cabina del singolo edificio e con una maggiore precisione.

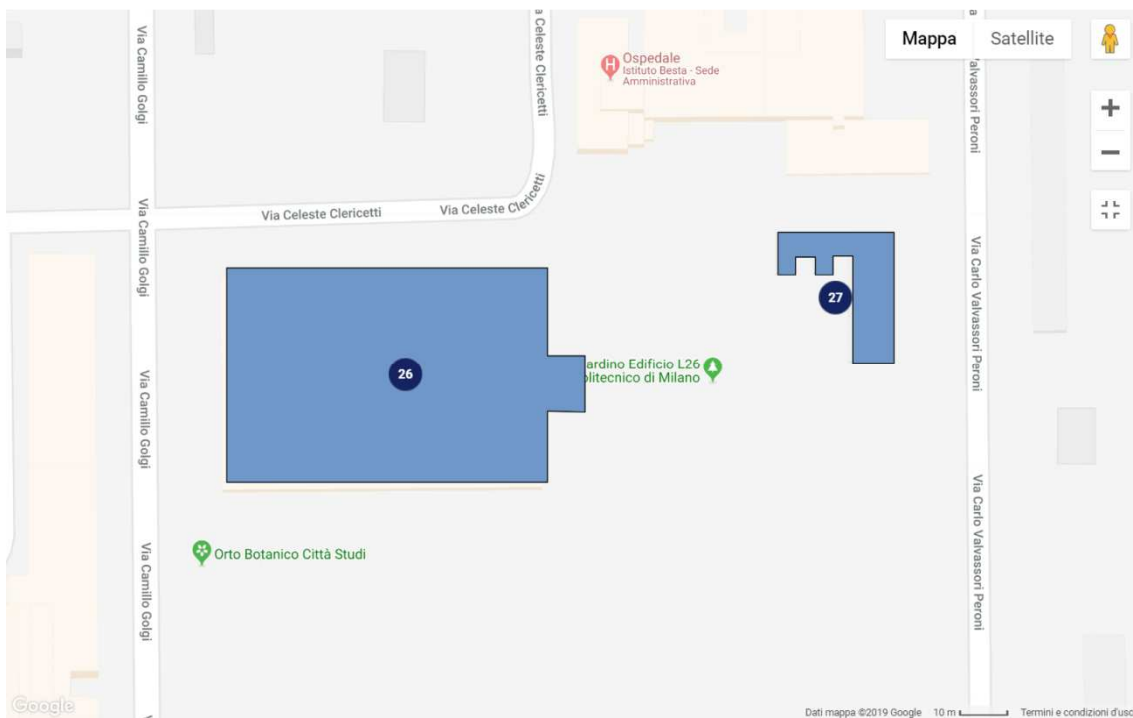
Inizialmente si era scelto l'edificio 14 (o Edificio Nave) collocato nel campus Leonardo in via Bonardi, poiché la stazione meteorologica della Fondazione OMD si trova sulla sommità di esso. L'edificio però ha subito a metà del 2018 dei lavori di riqualificazione che si sono riversati sulla cabina di trasformazione e pertanto i dati energetici per quell'anno non erano disponibili. Inoltre il POD associato ridistribuisce la rete elettrica a tutti e 30 gli edifici del Campus Leonardo, di conseguenza riuscire ad isolare i soli dati elettrici dell'edificio di nostro interesse sarebbe risultato complesso.

Si è scelto quindi di lavorare sull'edificio 26 avendo tutti i dati dei consumi elettrici e termici disponibili per almeno 4 anni; inoltre il POD di riferimento rifornisce solamente gli edifici 26 e 27 il cui contributo, trattandosi di un asilo, può essere facilmente considerato e sottratto dal computo totale.

L'edificio 26 è poco lontano dall'edificio 14 e si colloca in un contesto urbano simile. Nell'analisi dei dati energetici in funzione dei dati meteorologici, possono quindi considerarsi rappresentative le misure meteorologiche effettuate negli anni.



**Figura 2.1** Mappa della Sede di Milano Città Studi



**Figura 2.2** Mappa del Campus di Via Golgi 20

## Caratteristiche strutturali

L'edificio 26, sede della mensa, si colloca a sud rispetto al campus Golgi e Bassini e a sud-est del campus Leonardo. È inserito all'interno di un parco ad uso pubblico e due suoi lati (nord e ovest) sono ombreggiati da alberi a medio e ad alto fusto che ne delimitano il perimetro.

La forma rispecchia un parallelepipedo molto compatto e regolare sia nel suo impianto a terra sia nel suo sviluppo in altezza. La costruzione è costituita da un piano interrato, un piano terra su più livelli, raccordati tramite rampe e gradini, ed un piano primo. Vi sono due mense collocate al piano terra, mentre il piano interrato e il primo piano sono destinati alle aule. I tavoli presenti nei più livelli del piano terra sono frequentemente occupati per studio e lavoro durante tutte le ore di apertura.

Dall'esterno si coglie la facciata in mattone, che viene utilizzato sia come elemento architettonico sia strutturale. Le pannellature colorate e le parti finestrate vengono inserite in un telaio meccanico con pilastri a sezione rettangolare e travi prefabbricate a T accoppiate e utilizzate come elemento architettonico per l'alloggiamento degli impianti di illuminazione.

Infine, per quanto riguarda i serramenti, essi sono per la totalità con vetro singolo e telaio di alluminio, mentre alcuni sono caratterizzati da telaio in legno.

I principali parametri geometrici possono essere riassunti nella seguente tabella:

Superficie lorda riscaldata	3.902 m <sup>2</sup>
Volume lordo riscaldato	18.951 m <sup>3</sup>
Superficie disperdente	8.238 m <sup>2</sup>
Coefficiente di forma S/V	0,43
Superficie complessiva serramenti	667 m <sup>2</sup>
Superficie complessiva pareti verticali opache m <sup>2</sup>	1.389
Superficie disperdente complessiva copertura	3.088 m <sup>2</sup>

**Tabella 2.1 Caratteristiche geometriche edificio 26**

## Impianto di climatizzazione

La climatizzazione di un ambiente consiste in tutte le operazioni atte a consentire le condizioni termoigrometriche adatte per l'ambiente lavorativo in ogni periodo dell'anno. Le operazioni effettuate devono svolgere le seguenti funzioni: riscaldamento, raffrescamento, ventilazione con o senza filtraggio dell'aria, umidificazione o deumidificazione.

L'energia termica richiesta dall'edificio è fornita da due caldaie a gas Hoval Uno 3 da 360kWt ciascuna. Nel circuito finale è presente un collettore verticale a cui si collega un



secondo collettore orizzontale da cui pescano 3 coppie di pompe in parallelo adibite alla distribuzione del fluido termovettore a radiatore, UTA e bollitore.

La climatizzazione viene gestita da 8 UTA situate nel seminterrato, mentre l'acqua refrigerata per il raffrescamento è prodotta da un gruppo frigorifero MTA Galaxy Tech modello GLT135/SSN con condensazione ad aria. I terminali ambiente sono costituiti da radiatori, ubicati nel primo piano e nei servizi del piano terra, e impianto a tutt'aria distribuito per l'interezza dell'edificio.

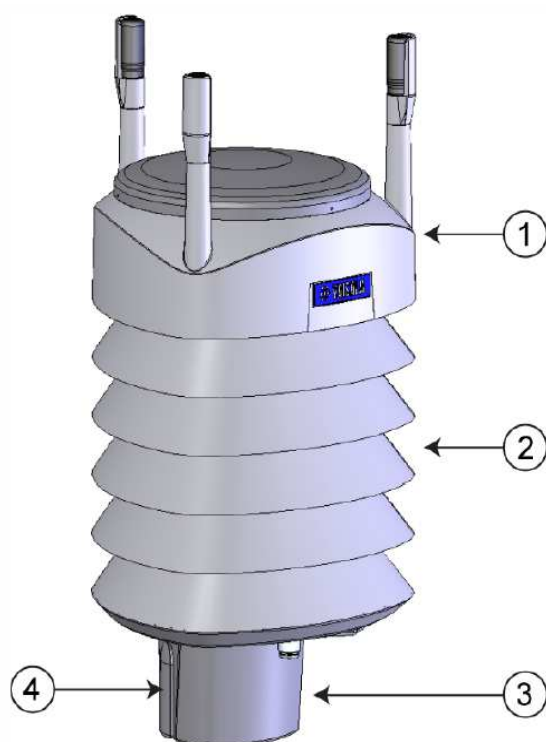
### **Impianto di illuminazione**

Per quanto riguarda l'impianto interno di illuminazione, esso è costituito da lampade fluorescenti compatte e da neon. Ad eccezione dei locali igienici, non vi è un controllo centralizzato automatico dipendente dal grado di illuminamento naturale e dalla presenza di utenti.

## 2.2 - Descrizione stazione meteo

La stazione meteorologica utilizzata per la raccolta dei dati meteorologici e posizionata sulla sommità dell'edificio 14 è del tipo Vaisala WXT520. Si tratta di uno strumento compatto che misura e trasmette al network i seguenti sei parametri meteorologici: velocità del vento e direzione, precipitazione, pressione atmosferica, temperatura e umidità relativa.

Il dispositivo si presenta come in figura:

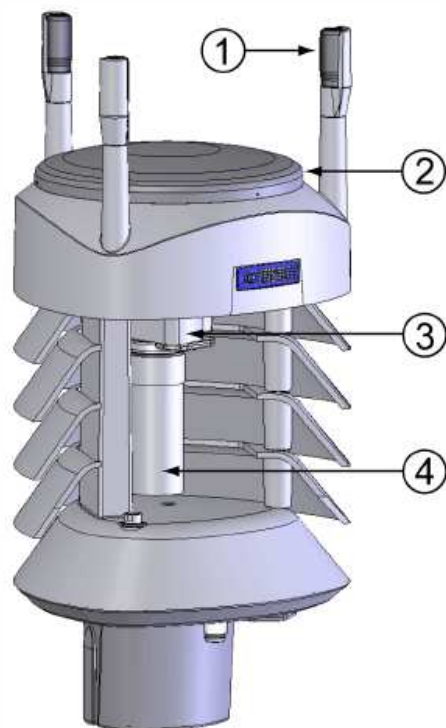


**Figura 2.3 Componenti principali della stazione meteo WXT520**

I numeri rappresentati in figura corrispondono a:

1. Parte superiore del trasmettitore
2. Schermo solare
3. Parte inferiore del trasmettitore
4. Coperchio per la vite di installazione

Lo schermo è fondamentale per il processo di misura, infatti questo protegge le componenti interne dalla radiazione solare e quindi dall'innalzamento di temperatura dei dispositivi; la temperatura e l'umidità relativa misurata non saranno soggetti così ad errori e saranno misure rappresentative dell'aria circostante allo strumento.



**Figura 2.4 Dettaglio interno della stazione meteo WXT520**

I numeri rappresentati in figura corrispondono a:

1. Trasduttori per le misurazioni del vento
2. Sensore per la precipitazione
3. Sensore per la pressione all'interno del modulo PTU
4. Sensori di umidità e temperature all'interno del modulo PTU

Per quanto riguarda le misure di velocità e direzione del vento, la stazione WXT520 utilizza sensori Vaisala WINDCAP®. I tre sensori ultrasonici sono posizionati su un piano orizzontale equamente distanziati tra loro. La direzione e la velocità del vento sono determinate misurando la durata che impiega il segnale emesso da un trasduttore per giungere agli altri due. Il tempo viene misurato per entrambe le direzioni e per i tre percorsi disponibili; il tempo di transito dipenderà quindi dalla velocità del vento lungo il percorso. Nel caso di assenza di vento, infatti, il periodo di transito del segnale di andata sarà uguale a quello di ritorno. Invece in presenza di vento, il tempo nella direzione sottovento aumenterà e quello in direzione sopravvento sarà minore.

Le misure di precipitazione vengono realizzate tramite un dispositivo costituito da un piatto di acciaio montato sopra ad un sensore piezoelettrico. Il sensore di precipitazione riesce a determinare l'impatto della singola goccia di pioggia e il segnale trasmesso è proporzionale al volume della goccia. Quindi, attraverso tecniche di filtraggio di rumore esterno, il segnale di ogni singola goccia può essere convertito direttamente in quantità di pioggia cumulata. Oltre a quest'ultimo parametro, vengono anche misurati: intensità media e massima di precipitazione, durata dell'evento. Lo strumento è inoltre capace di distinguere le gocce di pioggia dai chicchi di grandine.

All'interno del dispositivo e schermato dalle radiazioni si trova il modulo PTU che contiene i sensori per le misurazioni di pressione, temperatura e umidità. Il principio di misura si basa su un oscillatore RC che utilizza, oltre che elementi attivi, esclusivamente resistori e condensatori. Tramite due capacitori di riferimento le capacità dei sensori vengono continuamente confrontate per ottenere un ottimale valore in uscita. La temperatura, la pressione e l'umidità vengono direttamente calcolate dal microprocessore del dispositivo a partire dalla capacità misurata. [12]

Il modulo PTU include:

- Sensore capacitivo in silicone BAROCAP® per le misure di pressione
- Sensore capacitivo ceramico THERMOCAP® per le misure della temperatura dell'aria
- Sensore capacitivo con un sottile film polimerico HUMICAP®180 per le misure di umidità



**Figura 2.5** Stazione meteo installata sul tetto dell'edificio 14

## 2.3 - Descrizione della centralina microclimatica

La centralina BABUC per la misura del microclima consiste in un insieme di strumenti, sensori e programmi per l'acquisizione, la visualizzazione, la memorizzazione e l'elaborazione di una grande varietà di dati microclimatici. Si definisce **microclima** il complesso dei parametri climatici dell'ambiente locale che determina gli scambi termici fra l'ambiente stesso e gli individui che vi operano.

La strumentazione è adatta sia per applicazioni di misure campali grazie alla visualizzazione immediata di tutti i valori istantanei, sia nell'ambito di campionamento con periodi molto lunghi in virtù della memorizzazione dei dati in un archivio locale. La versatilità del dispositivo è inoltre dovuta al tipo di alimentazione che può essere da rete, da batteria o da pannello solare. [13]



**Figura 2.6 Dispositivo BABUC in posizione fissa con sonde installate**

Nello specifico, il BABUC utilizzato durante la campagna di misure è caratterizzato da un multiacquisitore a 11 ingressi, con un massimo di 20.000 campioni di memoria. Il rateo di acquisizione, ovvero l'intervallo di tempo fra due campionamenti successivi, è liberamente programmabile e varia da 1 secondo a 24 ore.

I parametri da monitorare per definire la qualità ambientale sono di natura diversa (termici, chimici e luminosi) ed in particolare lo strumento è idoneo nell'acquisizione delle seguenti grandezze:

- Temperatura
- Umidità relativa
- Flusso termico
- Radiazione

- Illuminamento
- Pressione atmosferica
- Velocità dell'aria
- Concentrazione di gas
- Rumore
- Velocità di rotazione
- Livello acqua
- pH
- Spostamento

Ai fini della campagna di misure eseguita all'interno dell'edificio 26, le sonde utilizzate e installate sullo strumento BABUC sono la Sonda psicrometrica BSU102, la Sonda globotermometrica BST131 e la Sonda anemometrica a filo caldo BSV105. [14]

### Sonda psicrometrica BSU102

La sonda LSI LASTEM BSU102 è uno psicrometro ad aspirazione per la misura di temperatura, umidità relativa dell'aria e di altre grandezze derivate. L'apparecchio è costituito da due sensori di temperatura inseriti in un involucro che protegge dall'irraggiamento solare o di altra natura. Il primo è un termometro che misura la temperatura a bulbo secco dell'aria, mentre il secondo è un termometro rivestito da una guaina idrofila, mantenuta bagnata dall'acqua distillata contenuta in una vaschetta, che misura la temperatura a bulbo umido a ventilazione forzata. L'evaporazione dell'acqua sottrae calore, abbassando la temperatura rilevata dalla seconda sonda in misura inversamente proporzionale all'umidità dell'aria.

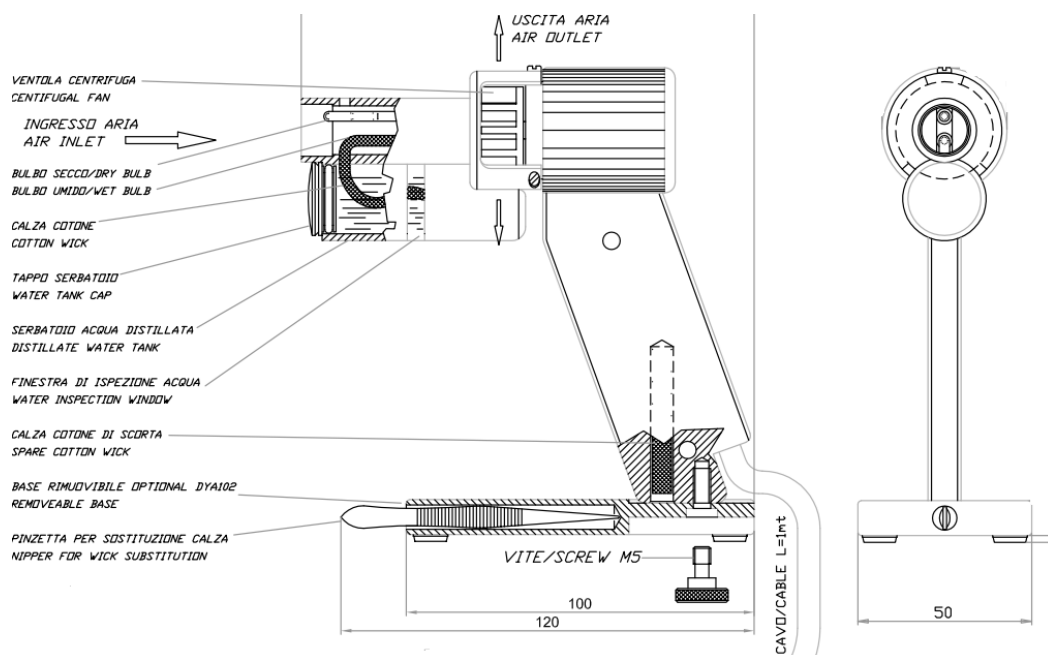


Figura 2.7 Dettaglio interno della sonda psicrometrica BSU102

L'aria ambientale viene forzata all'interno del condotto ove sono alloggiati i due sensori, attraverso una ventola ad una velocità di circa 4 m/s. Questa sonda, mediante le misure delle temperature dell'aria a bulbo secco e umido, consente al dispositivo BABUC di calcolare con elevata precisione ed affidabilità l'umidità assoluta, l'umidità relativa e le altre grandezze derivate come ad esempio la temperatura di rugiada e l'entalpia dell'aria.



**Figura 2.8 Sonda psicrometrica BSU102**

Le caratteristiche tecniche della sonda psicrometrica sono riassunte nella seguente tabella.

Grandezze misurate	Temperatura secca e umida ventilate
Grandezze calcolate	Umidità relativa, punto di rugiada
Rata acquisizione	10 sec
Alimentazione	9 Vcc
Consumo	30 mA
Manutenzione	Sostituzione calza (quando sporca) Aggiunta acqua distillata
Ricalibrazione	ogni 24 mesi
Materiale	Alluminio anodizzato
Ventilazione	$\cong 4,5$ m/s (8000 giri/minuto)
Campo di misura	Temp. Secca $-25 \div +150^{\circ}\text{C}$ Temp. Umida : $0 \div +60^{\circ}\text{C}$ UR%: $0 \div 100\%$ Punto di rugiada: $-20 \div +60^{\circ}\text{C}$
Accuratezza temperatura	$\pm 0,15^{\circ}\text{C}$ a $0^{\circ}\text{C}$ $\pm 0,19^{\circ}\text{C}$ a $20^{\circ}\text{C}$ $\pm 0,23^{\circ}\text{C}$ a $40^{\circ}\text{C}$
Accuratezza UR% (Temperatura: $15 \div 25^{\circ}\text{C}$ )	$70 \div 98\%$ : 0,5% $40 \div 70\%$ : 1% $15 \div 40\%$ : 2%
Risoluzione	0,1% UR
Massima differenza tra i due bulbi (senza acqua)	0,1°C
Tempo di risposta	90 sec. con ventola funzionante

**Tabella 2.2 Caratteristiche tecniche sonda psicrometrica BSU102**

### Sonda globotermometrica BST131

La sonda globotermometrica LSI LASTEM BST131, realizzata in conformità alla norma ISO 7726, è costituita da un globo metallico nero, cavo al suo interno, al centro del quale è montato un sensore termometrico. Note sia la temperatura secca e sia la velocità dell'aria, il dispositivo Babuc riesce a calcolare la temperatura media radiante ( $T_r$ ) attraverso la temperatura rilevata ( $T_g$ ). Il globo ha emissività elevata ( $\geq 0,98$ ) e riflessione bassissima (2%) in modo da essere un corpo nero rispetto alle radiazioni infrarosse. Tramite questa sonda è possibile stimare e esaminare i carichi termici di tipo radiante che sono estremamente importanti per il calcolo degli indici più importanti per l'analisi degli ambienti sia moderati che caldi.



**Figura 2.9 Sonda globotermometrica BST131**

Le specifiche tecniche del globotermometro sono riassunte nella seguente tabella.

Grandezze misurate	Temperatura radiante
Grandezze calcolate	Indici WBGT, PMV, PPD
Rata acquisizione	10 sec
Alimentazione	9 Vcc
Elemento sensibile	Pt100 DIN-A
Ricalibrazione	ogni 24 mesi
Materiale	Rame nero opaco
Limite operativo	-5 ÷ 60°C
Campo di misura	-10 ÷ +100°C
Accuratezza	±0,15°C a 0°C ±0,19°C a 20°C ±0,23°C a 40°C
Tempo di risposta	20 minuti

**Tabella 2.3 Caratteristiche tecniche globotermometro**



## Sonda anemometrica a filo caldo BSV105

Il dispositivo LSI LASTEM BSV105 è una sonda anemometrica portatile a filo caldo omnidirezionale. Tramite l'elevato rateo di acquisizione (un valore ogni 100 ms), la sonda misura la velocità dell'aria, calcola la media ( $v_a$ ) e la deviazione standard (SD) su un periodo di 5 sec, e dal rapporto tra questi due parametri, ricava l'intensità di turbolenza (TU) espresso in percentuale. L'intensità di turbolenza (TU) è un parametro fondamentale per valutare le correnti d'aria, che possono causare disagio alle persone, e l'efficienza del sistema di aerazione.

Lo strumento funziona grazie ad un filamento di tungsteno che viene scaldato per un breve periodo di tempo ad una temperatura maggiore di quella dell'aria. Siccome la resistenza elettrica di alcuni metalli dipende dalla temperatura, il microprocessore misura la potenza elettrica fornita al filo, e da questa viene ricavata la velocità istantanea ( $V_{ai}$ ); successivamente elabora i parametri medi e la turbolenza, trasmettendo le informazioni in formato analogico all'acquisitore Babuc.



**Figura 2.10 Sonda anemometrica a filo caldo BSV105**

Per un corretto rilievo della Velocità dell'aria e della Turbolenza è necessario che il sensore sia posizionato perpendicolarmente alla direzione del vento o al flusso d'aria in modo tale che il reoforo del filo caldo ne venga investito completamente.

Le caratteristiche tecniche dell'anemometro sono riassunte nella seguente tabella.

Grandezze misurate	Velocità media dell'aria ( $v_a$ )
Grandezze calcolate dalla sonda	Indice di turbolenza (TU)
Grandezze calcolate dall'acquisitore	Draught rating
Rata acquisizione	0,1 sec
Alimentazione	9 Vcc
Consumo	max 40mA
Ricalibrazione	ogni 24 mesi
Elemento sensibile	filo di tungsteno $\varnothing$ 9,45 $\mu$ m

Campo di misura di intensità della turbolenza	0÷100%
Campo di misura della velocità media dell'aria	0÷20 m/sec
Accuratezza (Temperatura: 10 ÷ 30°C)	0÷0,5 m/s: ±5 cm/s 0,5÷1,5 m/s: ±10 cm/s >1,5 m/s: ±4 %
Risoluzione	0,01 m/s : 1%
Limite operativo	-30°C +200°C elemento sensibile -30°C +70°C circuiteria elettronica

**Tabella 2.4 Caratteristiche tecniche anemometro BSV105**

## 3 - Raccolta dati

Come indicato dalla normativa ISO 50001:2011, il primo passo nello studio e nella gestione di un sistema di efficienza energetica è la raccolta del maggior numero di dati disponibili che descrivono la situazione operativa dell'impianto e del contesto in cui opera. Verranno quindi riportate le metodologie di come queste informazioni sono state ottenute ed una prima elaborazione di analisi. Le misure riguardano sia i consumi energetici di base (termici ed elettrici), sia i fattori che potrebbero influenzare l'impiego dell'energia (dati meteorologici, numero occupanti, dati microclimatici).

### 3.1 - Consumi Termici

Le misurazioni sulla quantità di gas consumato non sono effettuate dal Politecnico di Milano, ma vengono fornite direttamente dall'ente fornitore del servizio. I dati sono quindi riferiti ad un contatore che segnala quanti metri cubi di miscela gassosa vengono immessi nell'impianto. Per quanto riguarda l'edificio 26, i consumi termici sono riconducibili al riscaldamento durante la stagione invernale e all'utilizzo nelle due mense presenti.

Le misure ottenute, specifiche per il solo edificio 26, ricoprono un arco temporale di tre anni e distinguono i consumi per il riscaldamento dalle altre tipologie di utilizzo. I dati vengono riportati nelle seguenti tabelle:

Anno	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
2015	8170	5690	2142	0	0	0	0	0	2472	5768	15325	22008
2016	11574	10211	4542	392	0	0	0	6,8	0	1992	7781	11520
2017	10880	8509	5444	1575	1175	628	537	377	933	3453	9246	14582

**Tabella 2.5 Consumi Termici edificio 26 per il solo riscaldamento in Smc**

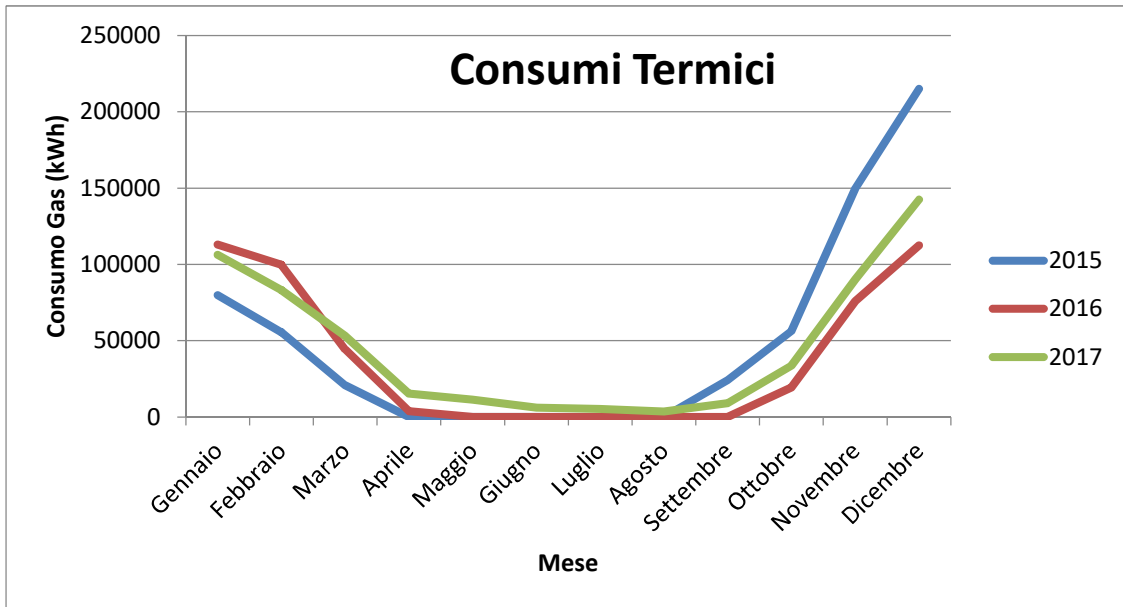
Anno	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
2015	1083	680	1146	1277	1228	1103	750	657	636	1295	1270	1083
2016	783	1236	1215	1165	1310	1022	629	22	790	1042	1063	676
2017	1063	966	2040	718	1017	801	583	24	750	1049	1140	712

**Tabella 2.6 Consumi Termici edificio 26 per utilizzi non dovuti al riscaldamento in Smc**

I valori della tabella impiegano come unità di misura lo standard metro cubo (Smc), ossia un metro cubo nelle condizioni standard di riferimento (temperatura di 15°C e pressione assoluta di 1,01325\*10<sup>5</sup> Pa). Per convertire le unità di misura da Smc a kWh, viene utilizzato un coefficiente che tiene in considerazione il potere calorifico del

combustibile. Nel caso specifico di questo studio viene utilizzato un coefficiente pari a 9,77 (dato fornito dall'Energy Team).

Viene quindi riportato un grafico con l'andamento dei consumi da riscaldamento durante i tre anni in esame:



**Figura 3.1 Grafico Consumi Termici edificio 26**

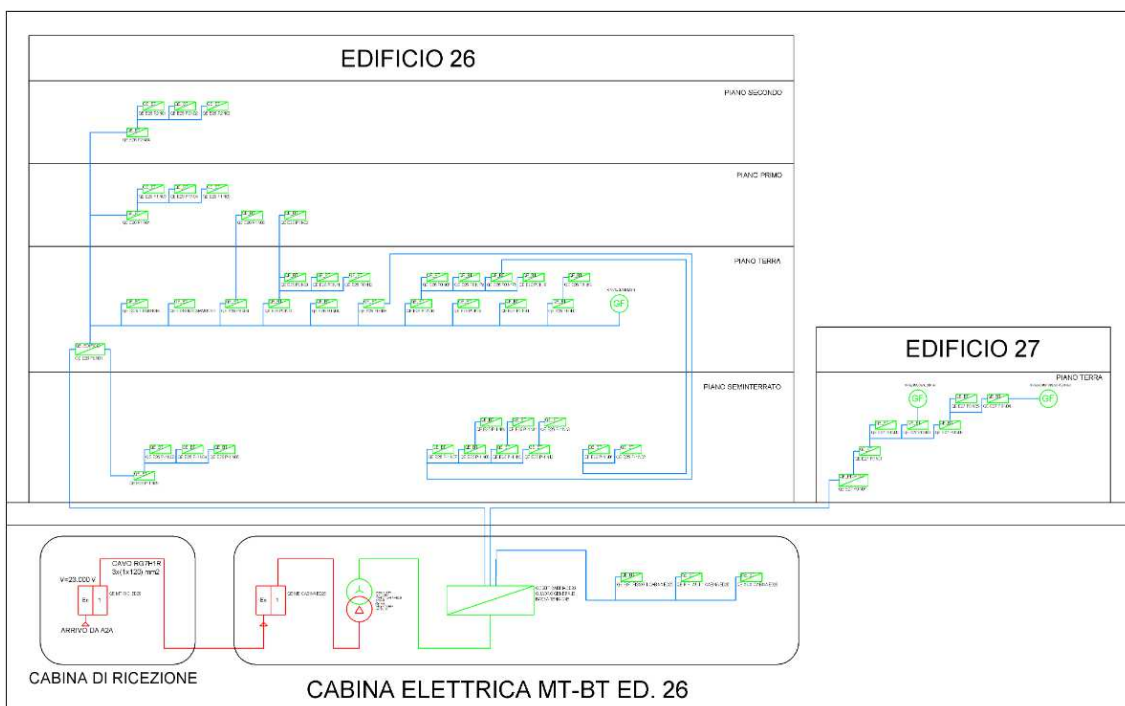
Già da una prima analisi si può notare come vi siano due insiemi di dati che presentano un andamento anomalo. I primi discostamenti si possono osservare nei mesi di Novembre e di Dicembre dell'anno 2015. I consumi di gas in questi due mesi sono molto maggiori rispetto a quelli degli anni successivi; in particolare raggiungono quasi un valore doppio rispetto al 2016. Inoltre non hanno neanche un riscontro dal punto di vista meteorologico, infatti non vi sono state temperature così basse da determinare un aumento dei consumi dovuti al riscaldamento. La seconda anomalia si presenta nei mesi da Maggio ad Agosto del 2017; si possono notare infatti dei consumi dovuti al riscaldamento che non dovrebbero essere presenti durante i mesi estivi.

Per cercare una spiegazione e seguendo le direttive della normativa ISO 50001:2011, sono state eseguite delle verifiche presso l'edificio e negli uffici dell'Energy Team, responsabile della gestione dei consumi energetici del Politecnico. Le citate anomalie però non hanno trovato una spiegazione, proprio perché i dati provengono dalle bollette inviate dall'ente erogatore del servizio. Nel corso delle elaborazioni dei dati presenti in questa tesi, i mesi corrispondenti a queste anomalie non verranno quindi considerati per non compromettere le elaborazioni.

Viene quindi ribadita l'importanza di un sistema di controllo e di misura, in quanto eventuali discostamenti e valori insoliti possano essere prontamente individuati e conseguentemente ottimizzare i consumi.

## 3.2 - Consumi Elettrici

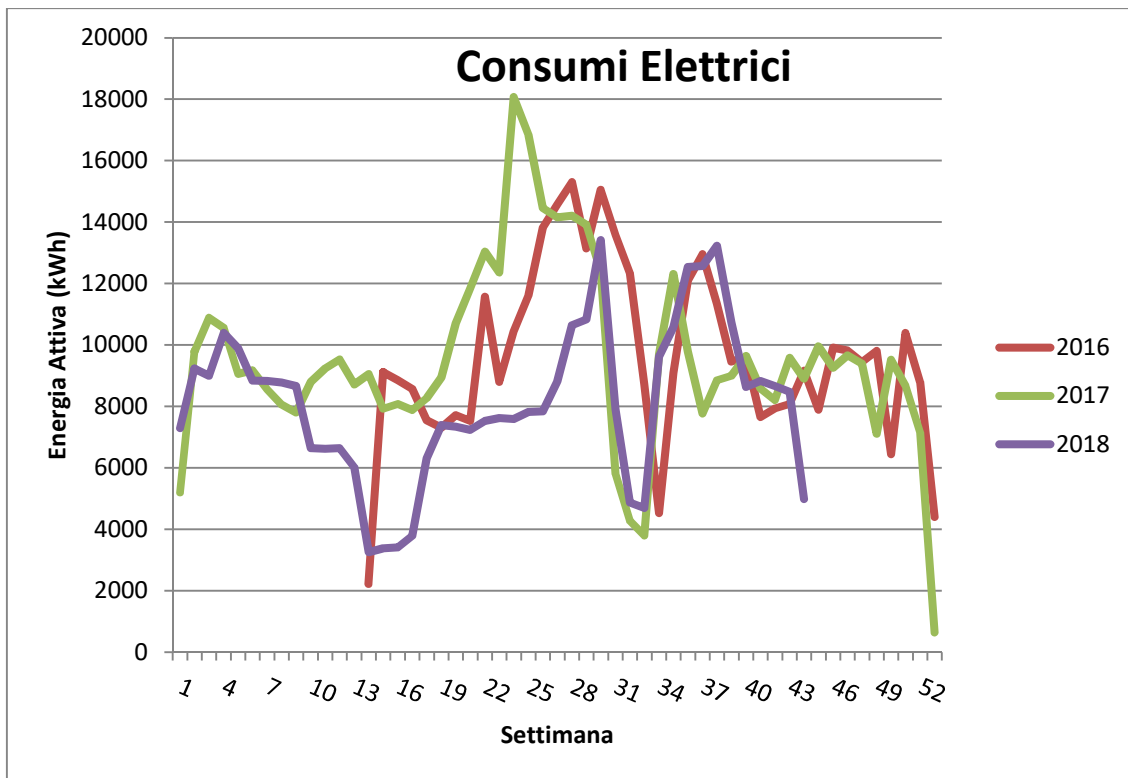
Le misurazioni sui consumi elettrici sono state effettuate attraverso un dispositivo collocato sul Point of Delivery (POD) ovvero il punto fisico di prelievo e di immissione di energia elettrica nelle reti di distribuzione del blocco edifici 26 e 27. I dati ricavati, esprimono quindi tutti i consumi elettrici dei due edifici. Essendo l'edificio 27 un asilo nido di modeste dimensioni e non paragonabile al numero di occupanti e ai consumi della costruzione adiacente, i dati ottenuti possono essere definiti come i consumi reali del solo edificio 26. Ovviamente si tratta di un'approssimazione dovuta alla mancanza di misuratori specifici per costruzione, ma il modello così formato non si discosta molto dalla realtà esistente, proprio per i minori consumi dell'asilo nido.



**Figura 3.2 Schema elettrico campus via Golgi 20**

I dati vengono inviati e archiviati in un software gestito dall'Energy Team per il Politecnico di Milano. Le misure disponibili ed utilizzate nel corso di lavoro di tesi sono datate 2015 e 2016 con un intervallo mensile, mentre da aprile 2016 a fine 2018 con un dettaglio orario.

Affinché le misure siano più facilmente interpretabili e interpolabili, sono state aggregate a livello settimanale e poi riportate nel seguente grafico:



**Figura 3.3 Grafico Consumi Elettrici edificio 26**

Si possono subito notare dei cali di energia attiva durante le prime e ultime settimane dell'anno e durante il mese di Agosto; questo è riconducibile al fatto che durante questo periodo l'edificio è chiuso per le ferie invernali ed estive. Le anomalie che più sono degne di attenzione sono:

- Elevato valore durante la 24esima settimana del 2017 (Giugno)
- Drastico calo durante la 37esima settimana del 2017 (Settembre)
- Valori ben al di sotto della media dalla settimana 14 (Aprile) alla settimana 26 (Giugno) del 2018

Queste irregolarità verranno tenute in considerazione durante il prosieguo dello studio e dell'elaborazione dei dati.

Ulteriormente si nota una traslazione verso sinistra dei grafici dopo il 2016; infatti a partire da quest'anno, il calendario accademico è stato modificato e il periodo di lezioni e di appelli degli esami anticipato di alcune settimane.

### 3.3 - Numero degli occupanti edificio

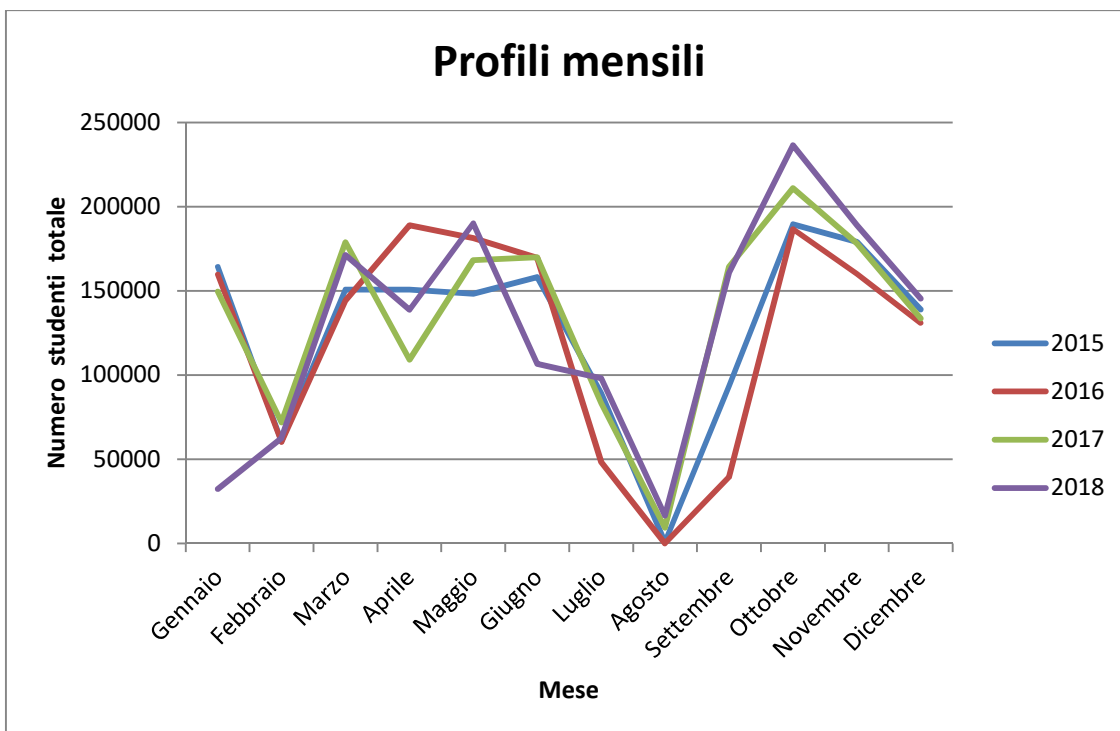
I profili dello stato occupazionale dell'edificio 26 sono stati ricavati a partire dallo studio dell'uso orario di ciascuna aula presente. In totale le classi presenti sono dieci e sono caratterizzate dalle seguenti capienze massime:

- **AULA L.26.01** Capienza: 70
- **AULA L.26.02** Capienza: 76
- **AULA L.26.03** Capienza: 70
- **AULA L.26.04** Capienza: 107
- **AULA L.26.11** Capienza: 207
- **AULA L.26.12** Capienza: 138
- **AULA L.26.13** Capienza: 122
- **AULA L.26.14** Capienza: 130
- **AULA L.26.15** Capienza: 167

Dal sito del Politecnico di Milano, è stato possibile scaricare i programmi orari e l'attività svolta per ciascuna aula nel periodo di interesse, ovvero dal 2015 al 2018. In questo modo è stato possibile ricavare una stima di massima del numero di studenti presenti ad una specifica ora nell'edificio. Sono state formulate le seguenti ipotesi nella costruzione del modello:

- Presenza costante per tutto il periodo considerato nelle zone adibite per lo studio e della mensa
- L'unica variabilità nel numero di occupanti deriva dalla presenza o meno di esami e/o lezioni

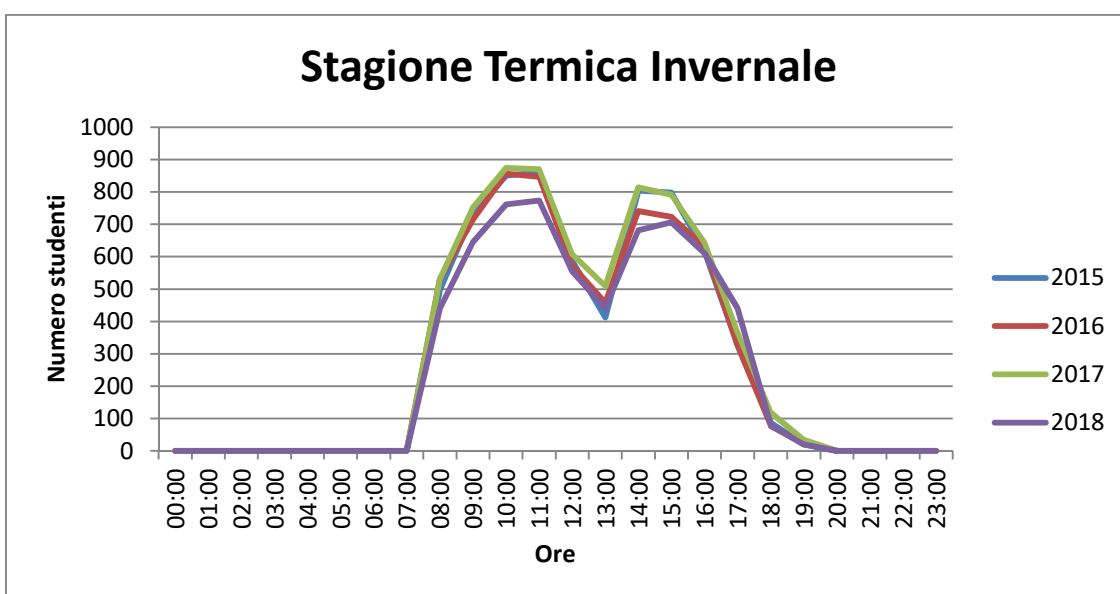
Nella costruzione di un modello il più conservativo possibile, sono quindi state sommate, per ogni ora e per ogni aula, il numero massimo di studenti attesi, corrispondenti alla capienza massima. Tutto ciò ha portato alla costruzione di un database e alla realizzazione del seguente grafico, che raffigura il numero di studenti massimi totali per ogni ora in cui le aule sono state occupate.



**Figura 3.4 Grafico numero di studenti mensile ricavato dal dettaglio orario Edificio 26**

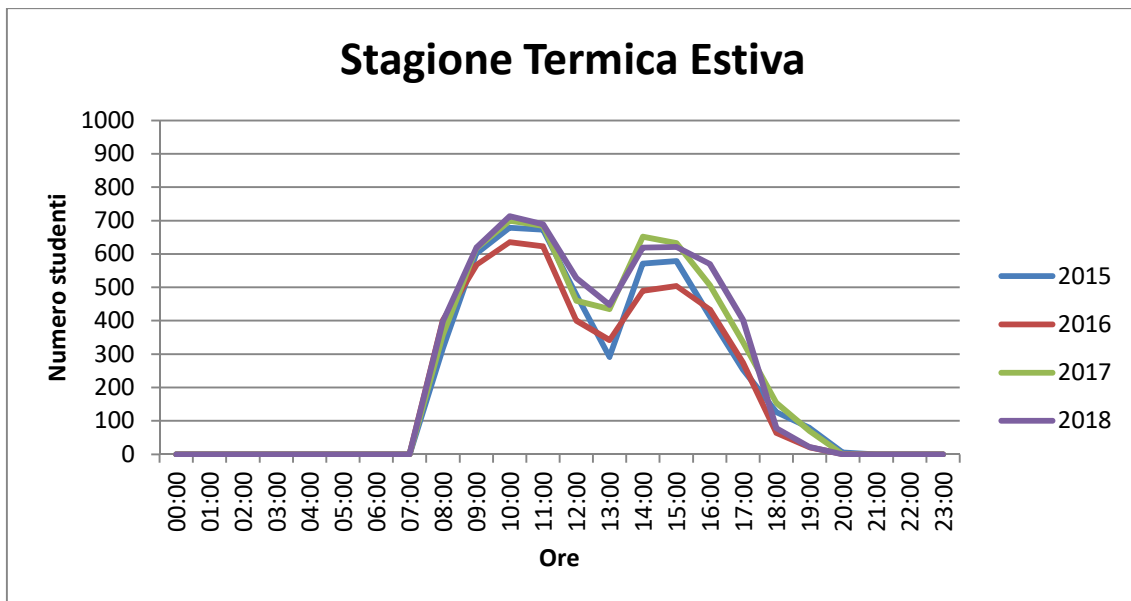
Sono stati calcolati successivamente gli andamenti della giornata tipo lavorativa (esclusi quindi sabato e domenica) per le due diverse stagioni termiche che coincidono con l'accensione e lo spegnimento dell'impianto di riscaldamento. Sono definite in questo modo:

- Stagione termica estiva: da metà Aprile a metà Ottobre
- Stagione termica invernale: da metà Ottobre a metà Aprile



**Figura 3.5 Grafico giorno tipo Edificio 26 per la stagione termica invernale**





**Figura 3.6** Grafico giorno tipo Edificio 26 per la stagione termica estiva

Come si può facilmente notare, è presente un calo degli occupanti durante le ore centrali della giornata. Anche sommando il contributo degli studenti rimasti nell'atrio e nella zona edifici, il profilo rimane identico, evidenziando ancora una volta che il parametro fondamentale è lo stato occupazionale delle aule.

### 3.4 - Dati meteorologici

Le misure che riguardano le variazioni fisiche dell'atmosfera, provengono dalla stazione meteorologica situata sulla sommità dell'edificio 14 del Politecnico di Milano e facente parte di Climate Network di FOMD. Considerando gli anni dal 2015 al 2018, sono stati scelti intervalli orari di misurazione, per avere più precisione e accuratezza nella gestione dei dati.

Le variabili meteorologiche considerate sono:

- Temperatura
- Umidità relativa
- Radiazione solare

Dalle misure sono stati poi calcolati tre ulteriori parametri:

- Gradi giorno (GG)
- Indice Humidex (H)
- Gradi giorno estivi (GGE)

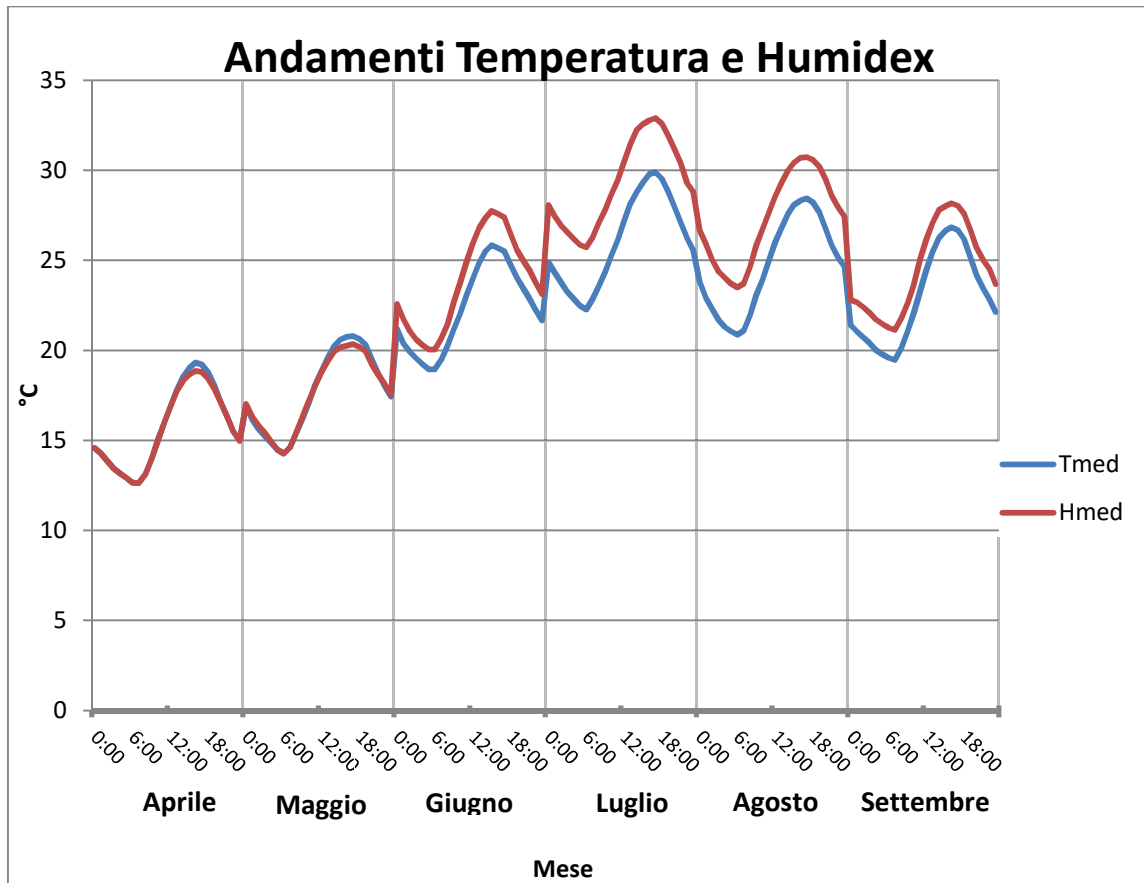
Il **grado giorno** (GG) viene definito come la somma estesa a tutti i giorni dell'anno, delle sole differenze positive giornaliere tra una temperatura fissata convenzionalmente (in questo caso studio pari a 20°C) e la temperatura media esterna giornaliera. Il GG può essere interpretato come un indicatore della potenza energetica necessaria al raggiungimento della temperatura di comfort (20°C). [15]

Nell'affrontare il problema dell'efficientamento energetico in rapporto al raffrescamento, il solo parametro della temperatura non è sufficiente per una stima corretta del fabbisogno energetico; infatti la sensazione di caldo che viene avvertita è la risultante di una combinazione di più condizioni ambientali. La temperatura percepita è però un indice difficilmente definibile, poiché deve tenere conto delle condizioni climatiche differenti da paese a paese e anche la sensibilità della popolazione nei confronti della temperatura può essere molto diversa. Ulteriori fattori che possono influenzare la percezione del caldo sono età, sesso, abbigliamento e condizioni fisiche.

In Italia, viene prevalentemente utilizzato l'**indice Humidex** che, nonostante non risolva il problema di soggettività, è applicabile in condizioni di temperatura e umidità più vicine a quelle dell'area mediterranea (temperature comprese tra 20°C e 55°C e tutti i valori di umidità relativa) ed è così definito tramite relazione empirica:

$$H = T + \frac{5}{9} \left( 6,11 \frac{UR}{100} 10^{\frac{7,5 T}{237,7+T}} - 10 \right)$$

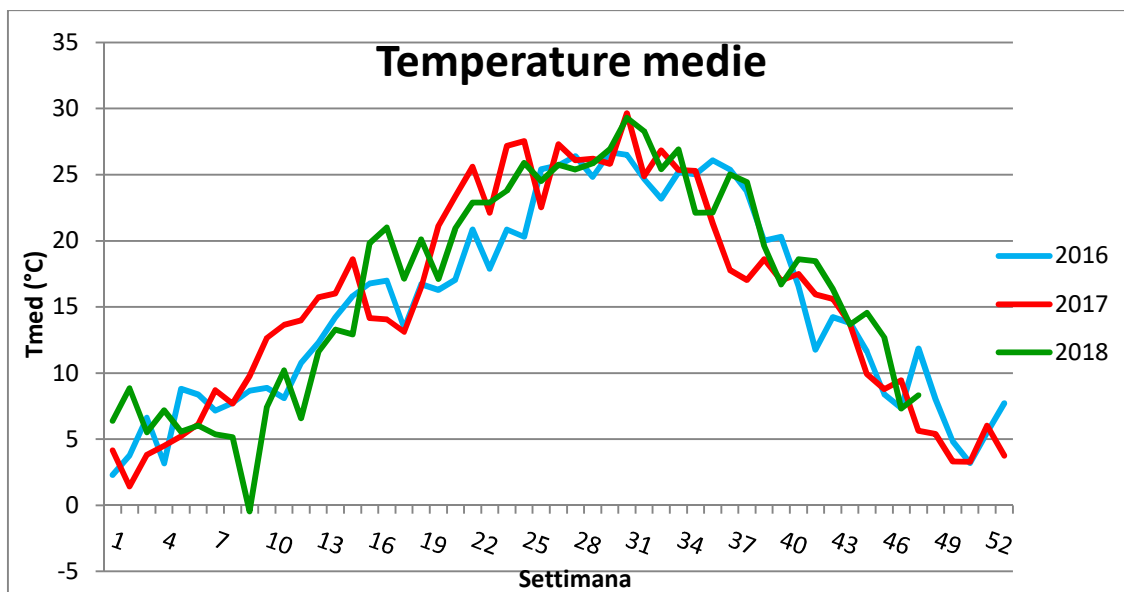
Quindi, attraverso le misure di temperatura e di umidità relativa, è stato calcolato l'indice Humidex per ogni ora e poi mediato per l'intero giorno. A titolo di esempio viene mostrato l'andamento delle giornate tipo, per i mesi da Aprile ad Agosto dell'anno 2016, della Temperatura media (Tmed) e dell'Humidex medio (Hmed).



**Figura 3.7 Andamento giornata tipo della Temperatura e dell'Humidex per l'anno 2016**

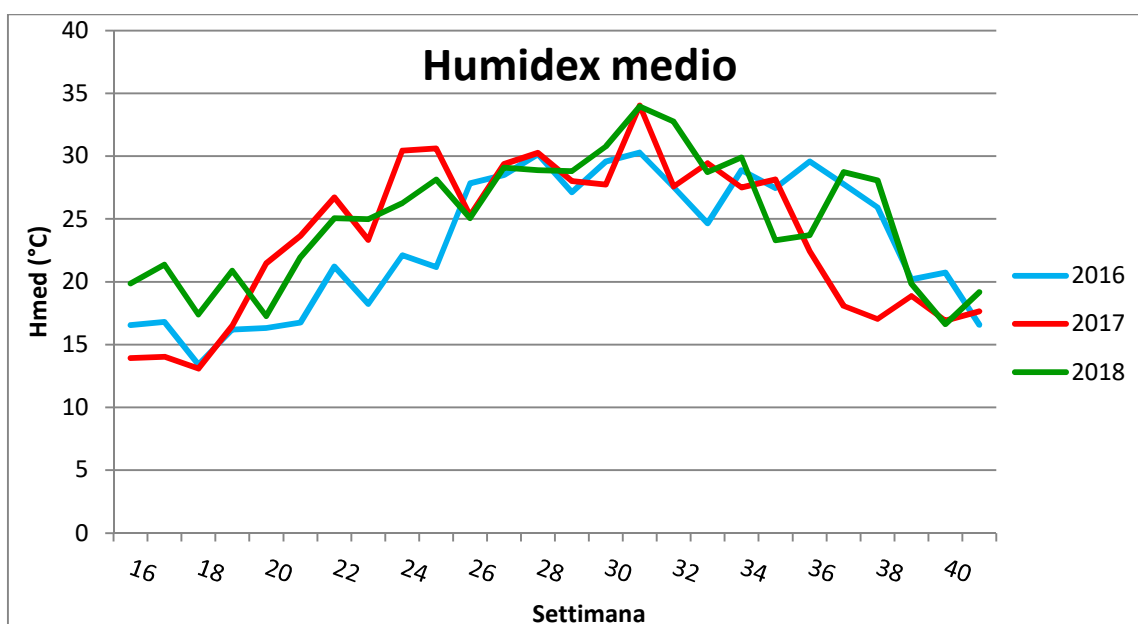
Come si può facilmente notare, le differenze tra i due parametri si hanno in prevalenza nei mesi estivi quando l'umidità dell'aria influisce sulla temperatura percepita dalla persona e poiché negli altri mesi essa è quasi sempre sotto i 20°C e quindi l'Humidex non calcolabile. Il fabbisogno energetico per il raffrescamento dovrà quindi essere dimensionato in rapporto all'indice Humidex, in quanto di valore maggiore rispetto alla temperatura.

I consumi energetici elencati precedentemente erano stati gestiti a base settimanale; per un diretto confronto, è stato eseguito il medesimo lavoro anche per la Temperatura media giornaliera (Tmed) e i risultati sono stati riportati nel successivo grafico:



**Figura 3.8 Andamento Temperatura media nella località Città Studi**

Come visto dalle differenze tra Temperatura e Humidex, non ha senso definire Hmed durante il periodo invernale, perché coincide con Tmed. L'Humidex viene quindi considerato durante la stagione termica estiva, come riportato nel grafico:



**Figura 3.9 Andamento indice Humidex durante la stagione termica estiva nella località Città Studi**

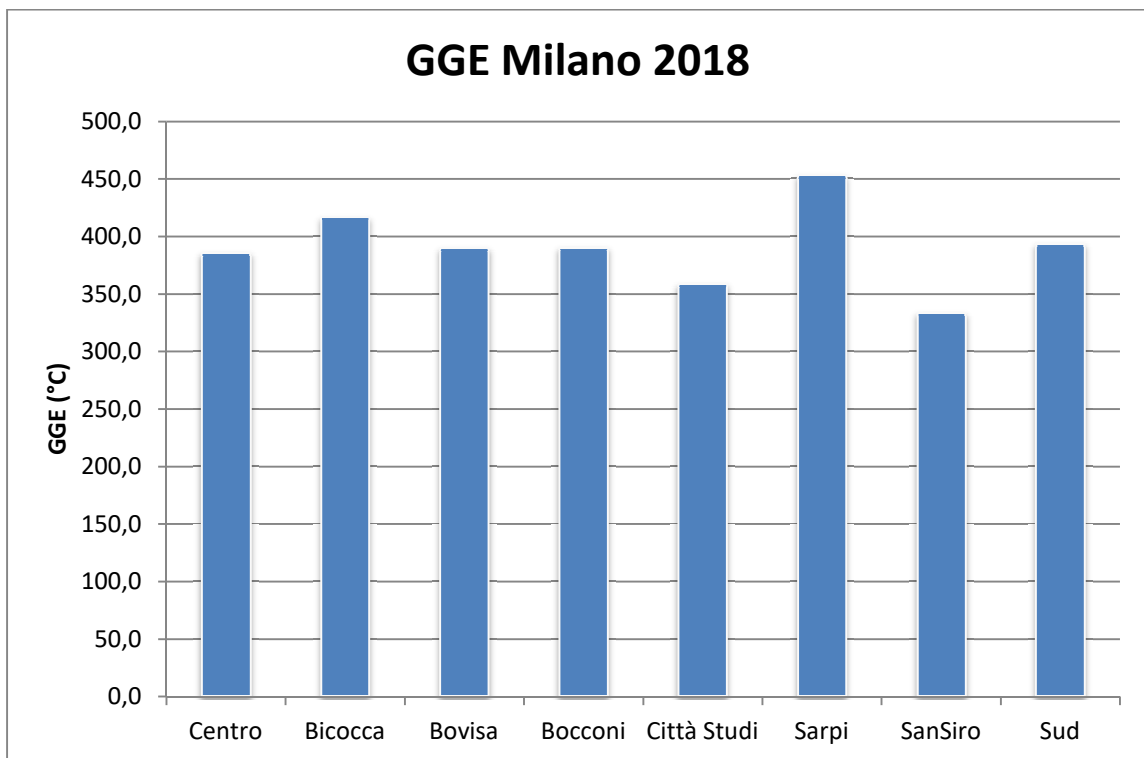
L'unica importante differenza viene evidenziata durante la nona settimana del 2018, con un rapido picco della temperatura media giornaliera. In corrispondenza di questa settimana non vengono però ritrovati altrettante differenze per quanto riguarda i consumi elettrici. Il fatto può essere spiegato in quanto questi ultimi non riguardano il

riscaldamento dell'edificio; quindi, durante la stagione termica invernale, l'energia elettrica è indipendente dalle condizioni meteorologiche. Inoltre in un contesto di edifici civili, i consumi derivati da illuminazione possono avvenire anche quando la luce solare esterna non ne richiede l'utilizzo.

Il secondo parametro calcolato a partire dai dati meteorologici sono i Gradi Giorno Estivi (GGE). Così come nell'indice Humidex, vengono tenuti in considerazione sia la temperatura sia l'umidità relativa, i quali influiscono sulla temperatura percepita. I GGE sono definiti come la somma positiva, estesa per il trimestre estivo (da Giugno ad Agosto), delle differenze tra la temperatura percepita media giornaliera dell'ambiente esterno (Hmed) e la temperatura degli ambienti interni di set point pari a 25°C (temperatura di set point secondo norma di riferimento UNI 10339 e 10349).

$$GGE = Hmed - 25^{\circ}C$$

Come già specificato precedentemente, il clima urbano è influenzato dal contesto del conglomerato cittadino e si possono quindi presentare situazioni microclimatiche differenti in aree della città diverse, come viene evidenziato nella figura 3.10, dove vengono mostrati i GGE corrispondenti alla stagione estiva del 2018 nelle diverse stazioni cittadine afferenti alla rete Climate Network.



**Figura 3.10 Gradi Giorno Estivi di diverse zone di Milano per l'estate 2018**

Analogamente ai GG invernali, i GGE rappresentano anche un indicatore di quanta energia serve per raggiungere la temperatura ottimale di set point attraverso il raffrescamento.

Ulteriori indici, utilizzati soprattutto nei paesi anglosassoni, sono gli Heating Degree Days (HDD) e Cooling Degree Days (CDD) così definiti:

- $HDD = T_{\text{set point}} - T_{\text{med}}$
- $CDD = T_{\text{med}} - T_{\text{set point}}$

Poiché per il nostro caso studio  $T_{\text{set point}} = 20^{\circ}\text{C}$ , i Gradi Giorno coincidono con gli HDD, ma lo stesso non vale per i CDD e i Gradi Giorno Estivi

Infine sono stati raccolti anche i dati riguardanti la radiazione solare oraria per tutti i quattro anni analizzati. La luce solare può essere considerata anch'essa un fattore influenzante, in quanto potrebbe determinare l'impiego dell'impianto di illuminazione durante i periodi dell'anno particolarmente bui.

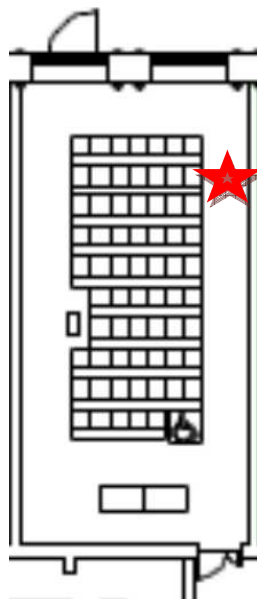
### 3.5 - Dati microclimatici

Le condizioni microclimatiche degli ambienti di lavoro costituiscono uno dei fattori di rischio che bisogna tenere in considerazione. La serie di misurazioni, avvenuta il giorno 26 Febbraio 2019, è stata strutturata in una serie di tre campionamenti durante la mattina e tre nel pomeriggio nei medesimi luoghi. Sono stati scelti un'aula relativamente piccola nel seminterrato, un'aula ampia al primo piano e la sala mensa. In questo modo è stato possibile ricoprire il maggior numero di situazioni possibili e descrivere la realtà dell'edificio al meglio.

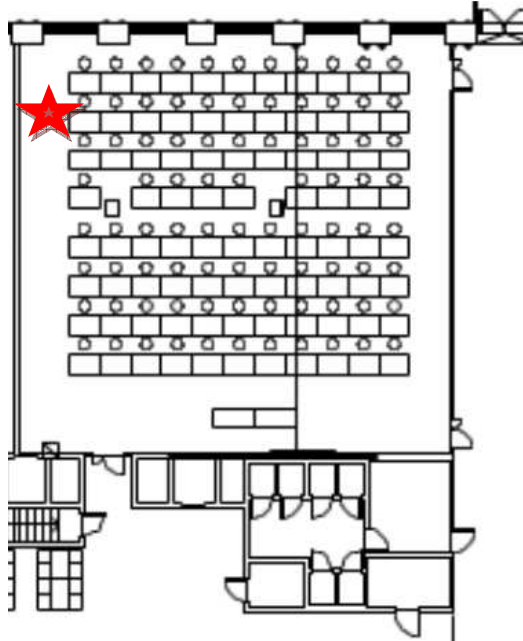
La scaletta del piano di lavoro è stata la seguente:

- **9:30 – 10:30**, aula 26.03
- **10:30 – 11:30**, aula 26.14
- **11:30 – 12:30**, sala comune della mensa
- **13:30 – 14:30**, aula 26.03
- **14:30 – 15:30**, aula 26.14
- **15:30 – 16:30**, sala comune della mensa

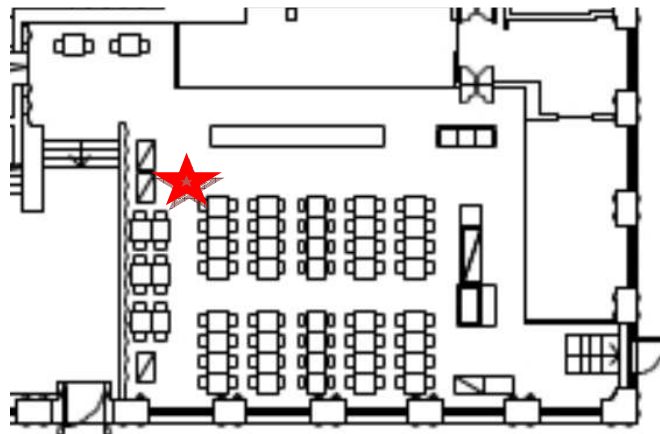
Lo strumento utilizzato è stato il BABUC-A e le sonde (psicrometro, globotermometro e anemometro a filo caldo) descritte nel capitolo precedentemente dedicato. Il posizionamento nelle aule viene riportato nelle seguenti figure.



**Figura 3.11** Posizionamento dispositivo Aula 23.03



**Figura 3.12 Posizionamento dispositivo Aula 23.14**



**Figura 3.13 Posizionamento dispositivo sala mensa**

Durante tutte le misurazioni sono state eseguite le seguenti misure con le relative frequenze di acquisizione, fondamentali per il calcolo degli indici microclimatici:

- Temperatura aria secca (°C), 00:01:00 (Tas)
- Temperatura aria umida (°C), 00:01:00 (Tau)
- Umidità Relativa (%) 00:01:00 (UR)
- Temperatura Punto Rugiada (°C) 00:01:00 (Tpr)
- Temperatura Globotermometro (°C) 00:10:00 (Tg)
- Velocità Aria (m/s) 00:01:00 (Va)
- Turbolenza (%) 00:01:00 (TU)
- Draught Rate (%) 00:01:00 (DR)



Le misure sono state effettuate a livello addominale, ovvero a 0,6 m da terra, per rispettare la normativa UNI EN 7726:1998 per la rappresentatività dei campioni. Inoltre è stato utilizzato un tempo di acquisizione di 45 minuti, in modo da aspettare almeno un intervallo di tempo pari al tempo di risposta dello strumento. Nello specifico il tempo di risposta dello psicrometro è di 2 minuti e 15 secondi, mentre per il globotermometro bisogna aspettare 22 minuti. I dati acquisiti durante la fase non stazionaria sono stati eliminati nel corso dell'elaborazione che ha portato allo sviluppo della seguente tabella di valori medi:

Rilievo	Area	Tas (°C)	Tau (°C)	UR (%)	Tpr (°C)	Tg (°C)	Va (m/s)	TU (%)	DR (%)
1	26.03	21,8	12,5	29,0	3,0	22,4	0,0	0,0	0,0
2	26.14	24,0	14,6	32,2	6,4	24,2	0,0	7,1	0,5
3	mensa	21,0	11,8	28,6	2,1	21,5	0,1	49,4	6,5
4	26.03	23,2	12,9	25,2	2,3	23,8	0,0	1,6	0,1
5	26.14	24,4	13,3	23,2	2,1	24,5	0,0	0,0	0,0
6	mensa	23,2	13,2	26,9	3,2	23,8	0,0	6,3	0,7

**Tabella 3.1 Risultati delle misure di microclima edificio 26**

Da una prima analisi si può notare come non vengono raggiunti i valori ottimali di Umidità Relativa, i quali si devono attestare tra il 40% e il 60%.

Per completezza e confronto sono stati recuperati i dati della stazione Climate Network sita presso il Politecnico, durante i periodi di campionamento:

Rilievo	Periodo	UR esterna (%)	Testerna (°C)
1	9:47-10:32	39,7	11,7
2	10:51-11:35	33,3	13,6
3	11:55-12:39	29,1	15,5
4	13:20-14:04	24,3	18,2
5	14:20-15:04	24,1	18,8
6	15:20-16:04	24,1	19,2

**Tabella 3.2 Misure meteorologiche durante i periodi di campionamento**

Infine, per lo sviluppo successivo dei dati, sono stati osservati le attività degli occupanti e il vestiario indossato.

Il metabolismo energetico, definito come conversione di energia chimica in energia meccanica e termica, misura il costo energetico del carico muscolare e fornisce un indice numerico dell'attività. Nel nostro caso questo corrisponde ad un valore di 1,2 met, ovvero associato ad un carico di lavoro leggero sedentario (secondo normativa UNI EN ISO 8996:2005).

La resistenza termica dell'abbigliamento viene fornita, secondo la norma UNI EN ISO 9920:2009, da tabelle che raggruppano classi di vestiario tipici. Tramite osservazione sono stati identificati tre diversi casi di abbigliamento, che vengono sintetizzati nelle seguenti tabelle:

A	
<b>Descrizione degli indumenti</b>	<b>Iclu(clo)</b>
Boxer	0,04
Calzini	0,02
T-shirt	0,09
Pantaloni normali	0,25
Scarpe (suola sottile)	0,02
<b>Tot</b>	<b>0,42</b>

B	
<b>Descrizione degli indumenti</b>	<b>Iclu(clo)</b>
Boxer	0,04
Calzini	0,02
T-shirt	0,09
Pantaloni normali	0,25
Scarpe (suola sottile)	0,02
Maglione classico	0,28
<b>Tot</b>	<b>0,70</b>

C	
<b>Descrizione degli indumenti</b>	<b>Iclu(clo)</b>
Boxer	0,04
Calzini	0,02
T-shirt	0,09
Pantaloni normali	0,25
Scarpe (suola sottile)	0,02
Maglione classico	0,28
Cappotto	0,60
<b>Tot</b>	<b>1,30</b>

**Tabelle 3.3 Resistenza termica dell'abbigliamento nei tre casi rilevati**

## 4 - Applicazione modelli Indici di Prestazione Energetica

I consumi energetici da soli non comunicano alcuna informazione sull'efficienza dei sistemi energetici. La normativa ISO 50001:2011 suggerisce quindi l'utilizzo di indici che rapportano i consumi con i parametri influenzanti del processo. Gli Indici di Prestazione Energetica (IPE) o Energy Performance Indicators (EnPI) sono quindi definiti come misure di intensità energetica utilizzati per aumentare l'efficacia del Sistema di gestione dell'energia.

Un IPE descrive l'energia specifica per compiere uno o più processi, associato solitamente per singolo vettore energetico. In una qualsiasi azienda industriale, il parametro fondamentale sono i kWh impiegati per produrre una tonnellata di prodotto piuttosto che i kWh totali consumati in un qualsiasi periodo. I consumi specifici dipenderanno quindi dalla quantità di materiale prodotto e dal tipo di produzione: per ogni processo deve essere quindi trovata l'efficienza caratteristica. [16]

Punto di partenza per la definizione degli IPE è l'analisi del processo per analizzare e misurare come varia l'energia consumata per unità di prodotto in funzione di tutti i fattori influenzanti rilevanti. La scelta e definizione degli IPE dipende dal tipo di lavoro, ma in generale deve avere le seguenti caratteristiche:

- Semplice, ma rappresentativo del tipo di processo o servizio che si vuole andare a misurare
- Calcolabile, ovvero facilmente determinabile tramite formule matematiche, i cui parametri devono essere tutti misurabili
- Raffrontabile con altri IPE calcolati in più anni (benchmark interno dell'organizzazione)
- Raffrontabile con altri IPE di organizzazioni simili (benchmark settoriale)

Gli Indici possono suddividersi in:

- Indici generali: ad esempio Energia/tonnellata di prodotto o kWh/m<sup>2</sup>
- Indici specifici per processi o per servizi: ad esempio Energia/prestazioni erogate

Nonostante vi sia una certa libertà nella scelta e nell'individuazione degli IPE, i seguenti passaggi per il loro calcolo devono essere rispettati:

- Attraverso l'analisi energetica identificare i processi più significativi, i vettori energetici, i relativi consumi e i parametri principali che determinano o influenzano tali consumi
- In base ai risultati ottenuti nello step precedenti, formulare le equazioni più semplici possibili per il calcolo del modello analitico degli IPE

- Misurare consumi e parametri influenzanti per calcolare gli IPE reali
- Calcolare il valore medio o la funzione analitica dell'IPE

Gli Indici di Prestazione Energetica vengono utilizzati soprattutto all'interno di un sistema di gestione e di monitoraggio dell'efficienza energetica. Dopo l'adempimento degli interventi ritenuti necessari dalla diagnosi energetica, il calcolo degli IPE viene effettuato per vedere se c'è stato un miglioramento. Verranno quindi monitorati nel tempo per assicurarsi il mantenimento delle prestazioni e che, anche a valle di operazioni sull'impianto, non ci siano successivi peggioramenti. [17]

Per edifici civili, il problema della definizione e del calcolo degli IPE non è di facile risoluzione, proprio per la libertà e della soggettività date dalle norme. Una prima approssimazione può essere effettuata utilizzando degli indici generali e andando quindi a normalizzare i consumi termici ed energetici per la superficie lorda riscaldata e raffreddata. Il metodo è molto superficiale e non considera tutti i fattori influenzanti.

Questo lavoro di tesi propone tre diversi tipi di approccio alla caratterizzazione dell'efficienza energetica per gli edifici civili, al fine di trovare degli IPE utilizzabili per la costruzione di un benchmark interno. Per focalizzarsi maggiormente sull'influenza dei parametri meteo-climatici rispetto ai fattori influenzanti statici, durante alcuni approcci i consumi non sono stati divisi per la superficie lorda condizionata. In questi casi gli IPE trovati saranno adeguati solamente per benchmark interno e non settoriale.

I principali usi energetici individuati sono consumi termici dovuti a riscaldamento e consumi elettrici totali, ovvero per il raffrescamento, per l'illuminazione e per le utenze. Per quanto riguarda invece i principali fattori influenzanti, sono stati raccolti dati sulle caratteristiche strutturali dell'edificio 26, il numero di occupanti e le condizioni meteo-climatiche esterne per tutti gli anni in cui i dati energetici erano disponibili.

Infine bisogna ricordare che non era presente un sistema di gestione in tempo reale dell'energia e che si valuta la situazione a posteriori dei consumi stessi. L'obiettivo è verificare coerenza rispetto al principale fattore influenzante, ovvero le condizioni meteo-climatiche, trovare un benchmark iniziale interno e proporre un sistema di monitoraggio.

## 4.1 - 1° Metodo

Nel primo metodo si è cercato di individuare una formula per la definizione degli IPE di riferimento sulla base dei dati disponibili [18]. Attualmente non esistono linee guida specifiche per il calcolo degli IPE per edifici civili; l'efficienza energetica viene valutata solamente in rapporto con la superficie lorda riscaldata. La novità di questo lavoro di tesi è di cercare una relazione tra i vari vettori energetici e le variabili influenzanti (in particolar modo focalizzandosi su quelli di tipo meteorologico), descritti nel capitolo precedente. Il modello energetico che si ottiene in questo modo ha il pregio di restituire, mediante l'utilizzo di una formula analitica, un IPE di riferimento in funzione del dato meteorologico, fornendo un quadro rappresentativo della realtà esistente.

Schematicamente, le fasi di tale processo possono essere così suddivise:

### 1. Aggregazione dei dati

Per vedere se i consumi energetici sono allineati ai fattori influenzanti meteo-climatici, come atteso trattandosi sostanzialmente di usi HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), le varie grandezze sono state messe in correlazione in un grafico a dispersione. Nello specifico sono stati correlati i consumi di gas mensili con i dati delle diverse variabili meteorologiche mediati nel mese corrispondente e con il numero di studenti totali presenti. Medesimo lavoro è stato eseguito per i consumi elettrici, ma in questo caso è stato sfruttato il maggior numero di dati e la correlazione è avvenuta a livello settimanale.

Già da una prima interpolazione è stato possibile definire su quali parametri concentrarsi per la definizione degli IPE, in quanto, come si può notare dalla figura 4.1, i punti del grafico si possono indicativamente interpolare con una retta. Contrariamente, in figura 4.2, ci sono casi in cui non è possibile trovare un andamento preciso e i dati sono dispersi per tutto il piano.

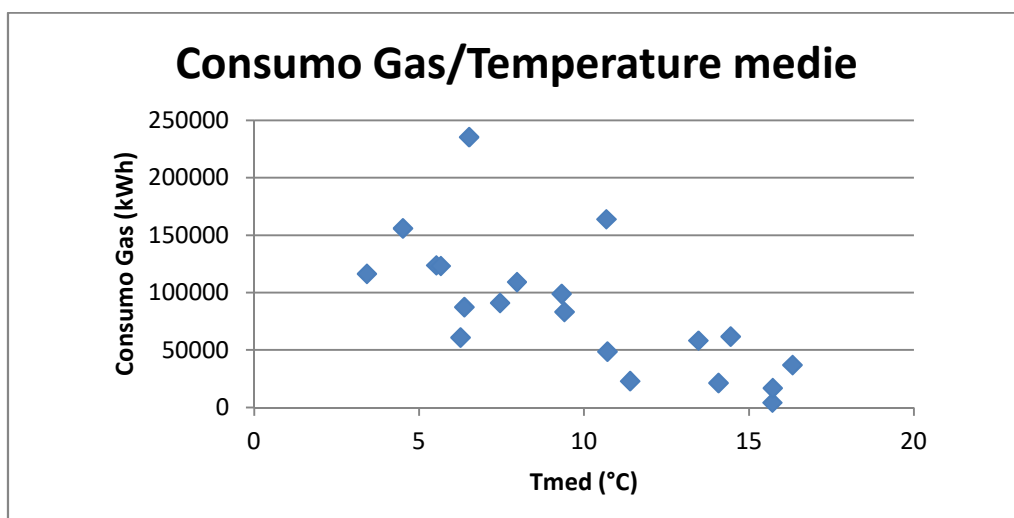
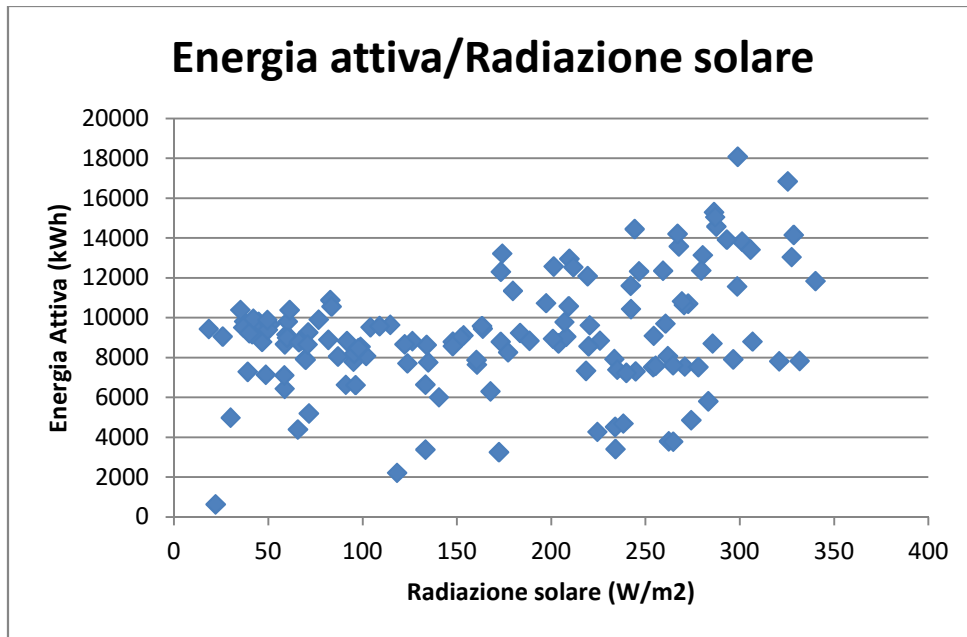
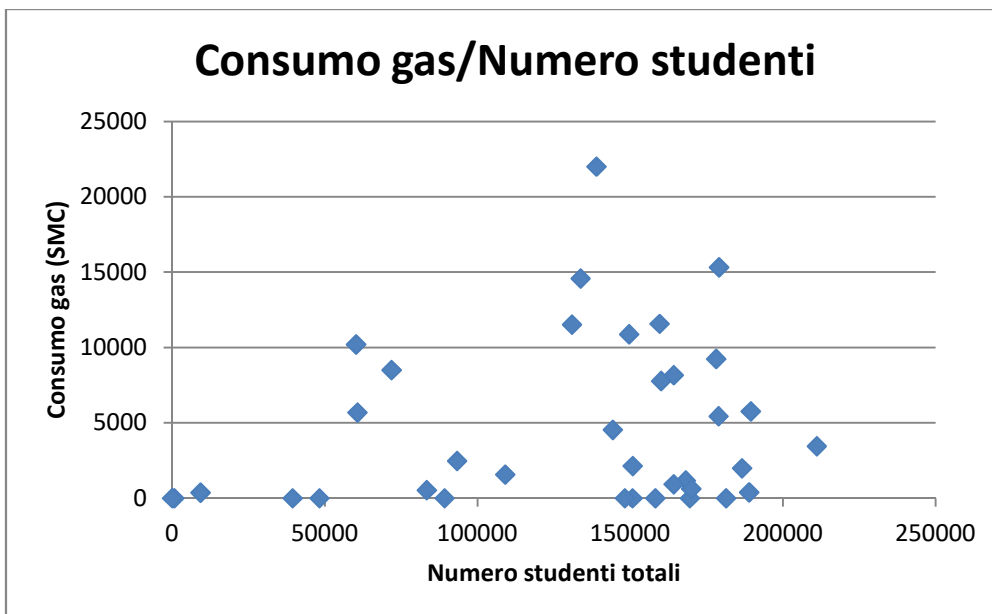


Figura 4.1 Correlazione mensile Consumi termici e Temperatura

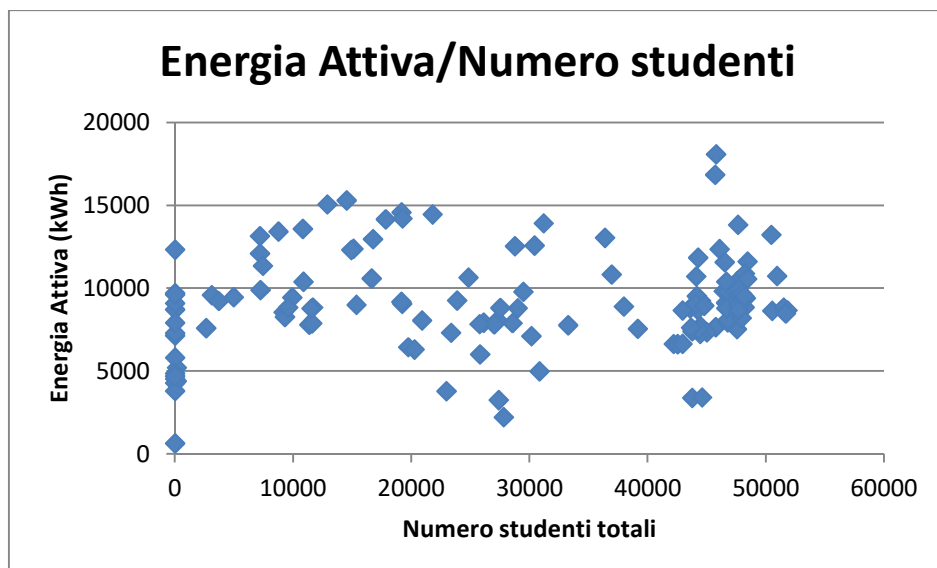


**Figura 4.2 Correlazione settimanale Consumi elettrici e Radiazione solare**

Un primo risultato parziale può essere evidenziato grazie alle figure 4.3 e 4.4. Sembra infatti che il numero di studenti all'interno dell'edificio non sia uno dei parametri che influenzano i consumi energetici totali.



**Figura 4.3 Correlazione mensile Consumo Termici e numero studenti**



**Figura 4.4 Correlazione settimanale Consumi elettrici e numero studenti**

Il calcolo è stato ripetuto anche considerando solo il 30% della capienza massima indicata, insieme ad una distribuzione normale del numero di studenti nella sala comune e nella mensa. Anche in questo caso non vi è nessuna correlazione tra i due domini. I grafici possono essere esaminati nell'Appendice 1.

## **2. Ricerca di un legame tra le grandezze rappresentate nel grafico a dispersione**

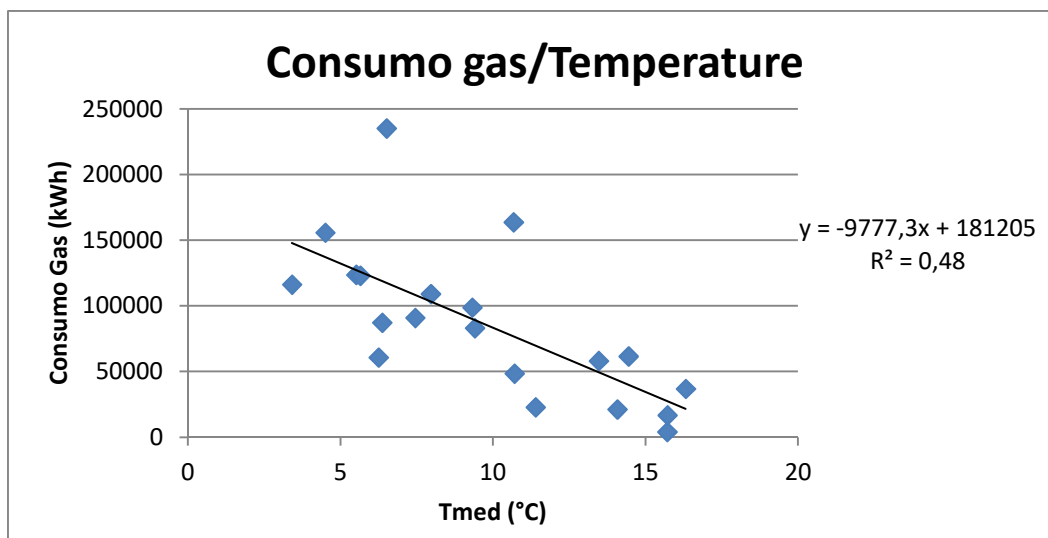
Una volta trovati i parametri che sono correlati linearmente con i consumi energetici, è stata ricavata la retta di regressione lineare e, attraverso il metodo dei minimi quadrati, il fattore  $R^2$ . Questo indice raffigura la bontà della correlazione tra i dati, nello specifico più si avvicina al valore 1 e più i dati appartengono alla stessa retta.

Per meglio indagare il grado di correlazione, sono stati eliminati i picchi di energia non giustificabili e gli andamenti anomali che erano stati evidenziati nel capitolo precedente riguardante la raccolta dei dati. La retta è stata nuovamente ricalcolata in funzione dei nuovi dati per vedere se la correlazione fosse migliorata. Le misure eliminate sono state utili per approssimare meglio il modello, ma nell'ottica di un monitoraggio ambientale, questi valori non devono essere assolutamente trascurati perché devono essere visti come possibili guasti.

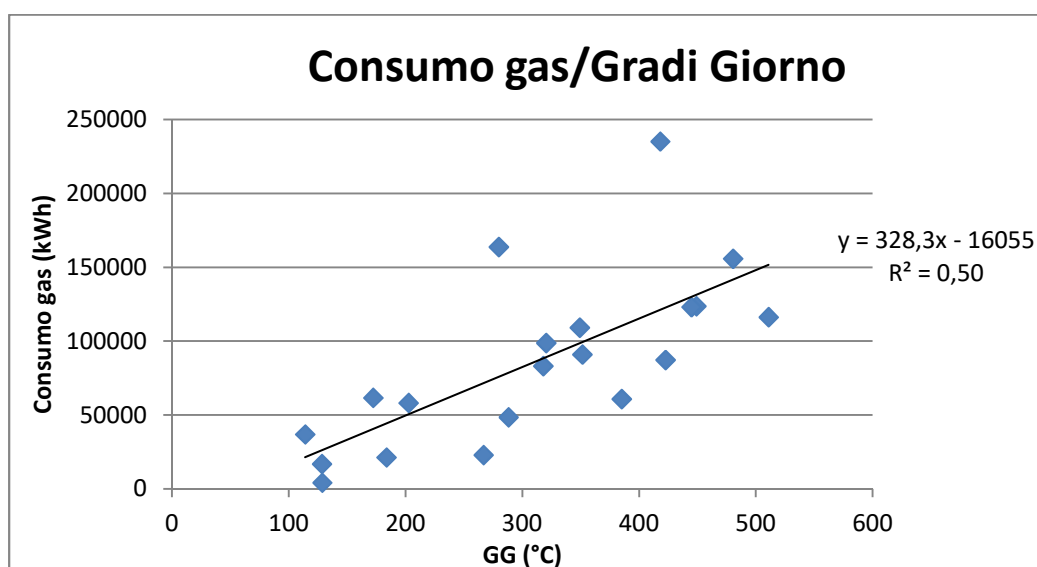
Il procedimento appena spiegato è stato effettuato con tutti i parametri influenzanti e i grafici possono essere consultati nell'Appendice 2. A titolo di esempio vengono illustrati i procedimenti e le strade intraprese per l'analisi dei consumi termici ed elettrici.

## Consumi Termici

In questo caso ci si è focalizzati sulla stagione termica invernale (da metà ottobre fino a metà aprile), escludendo i dati e i mesi al di fuori di questo periodo. I parametri influenzanti considerati sono la temperatura media e i Gradi Giorno.



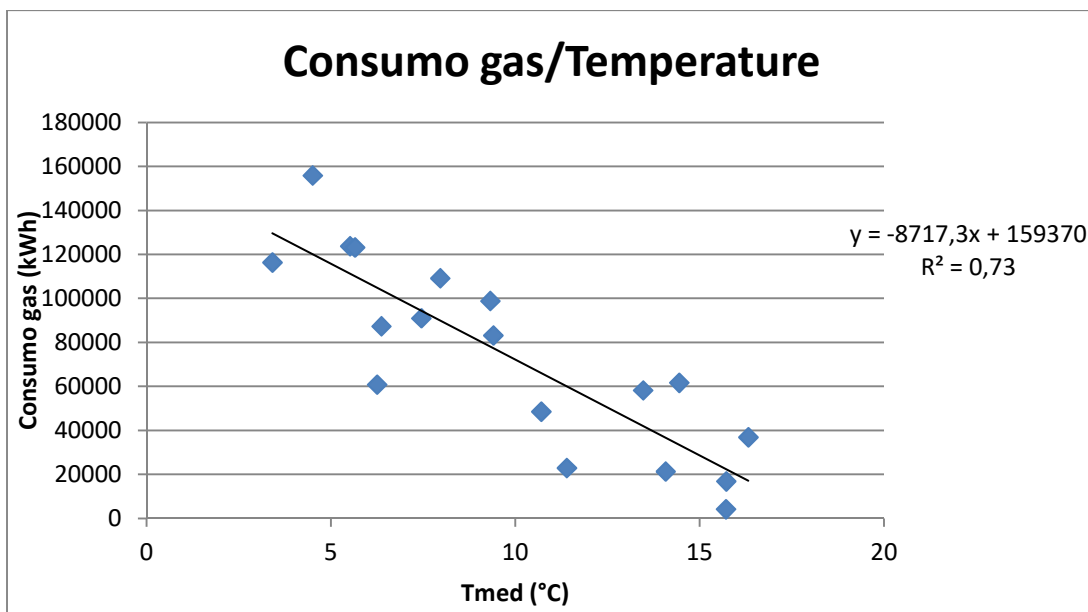
**Figura 4.5** Relazione mensile Consumi Termici e temperature utilizzando tutti i dati disponibili, outlier inclusi



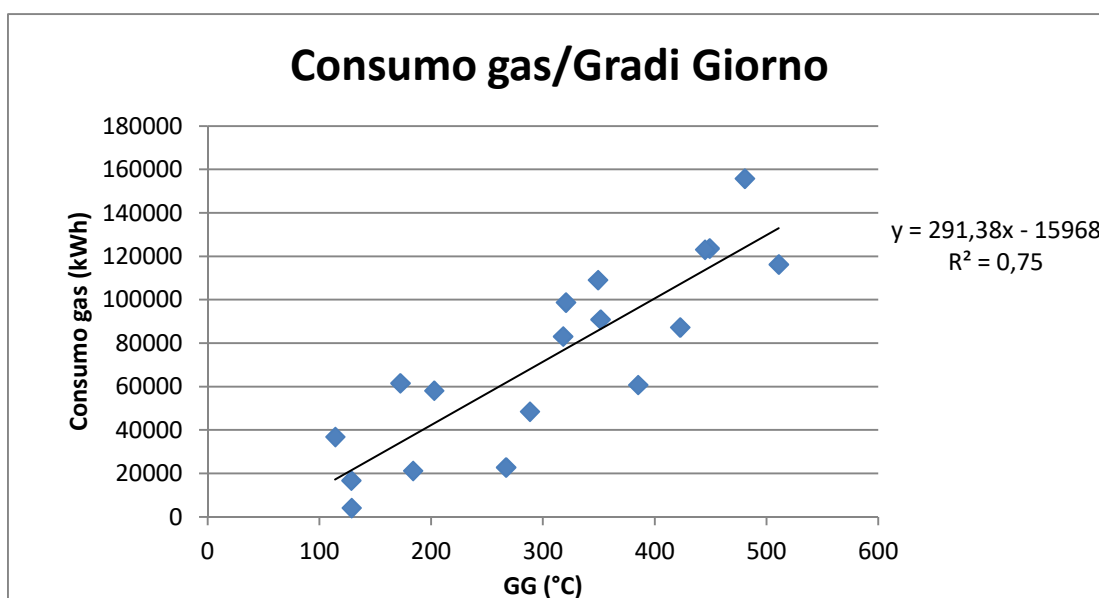
**Figura 4.6** Relazione mensile Consumo Termici e Gradi Giorno, utilizzando tutti i dati disponibili, outlier inclusi

Nei grafici mostrati in figura 4.5 e 4.6, si può notare la scarsa correlazione dei dati, che però risentono ancora delle incertezze riscontrate negli andamenti dei consumi energetici. Sono stati quindi eliminati i picchi anomali di fine 2015 e i nuovi grafici sono presentati nelle seguenti figure:





**Figura 4.7** Correlazione mensile Consumo Termici e temperature, escludendo fine 2015



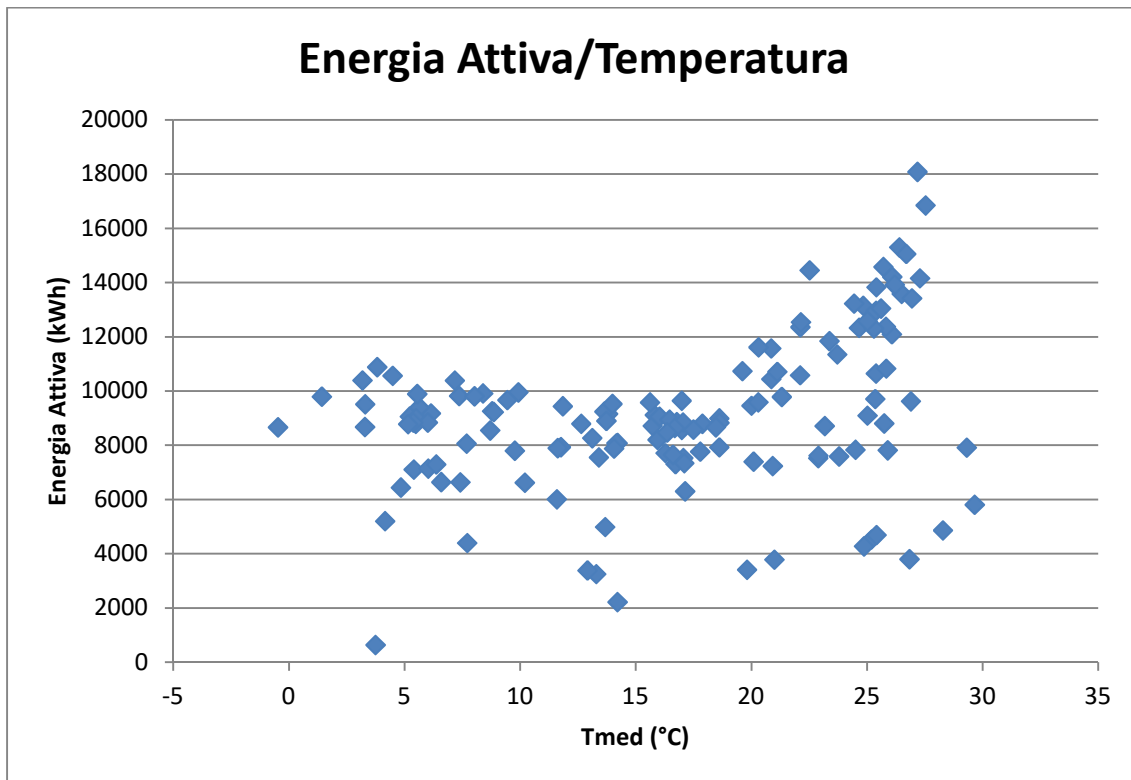
**Figura 4.8** Correlazione mensile Consumo Termici e GG, escludendo fine 2015

In entrambe le figure si può notare come l'indice  $R^2$  sia più alto e significativo rispetto a quello calcolato precedentemente, a riprova del miglioramento della correlazione tra i due domini, che viene esplicitato dall'equazione della retta di tendenza.

### Consumi elettrici

Come evidenziato dalla figura 4.9, l'inserimento di tutti i dati settimanali ha creato la formazione di un grafico a dispersione con due andamenti ben precisi: una prima raccolta di valori costanti seguiti da un incremento nella pendenza. Per separare i due

domini di dati sono stati utilizzati due approcci: nel primo la discriminante è stata la temperatura, nel secondo si è ragionato per stagioni termiche.

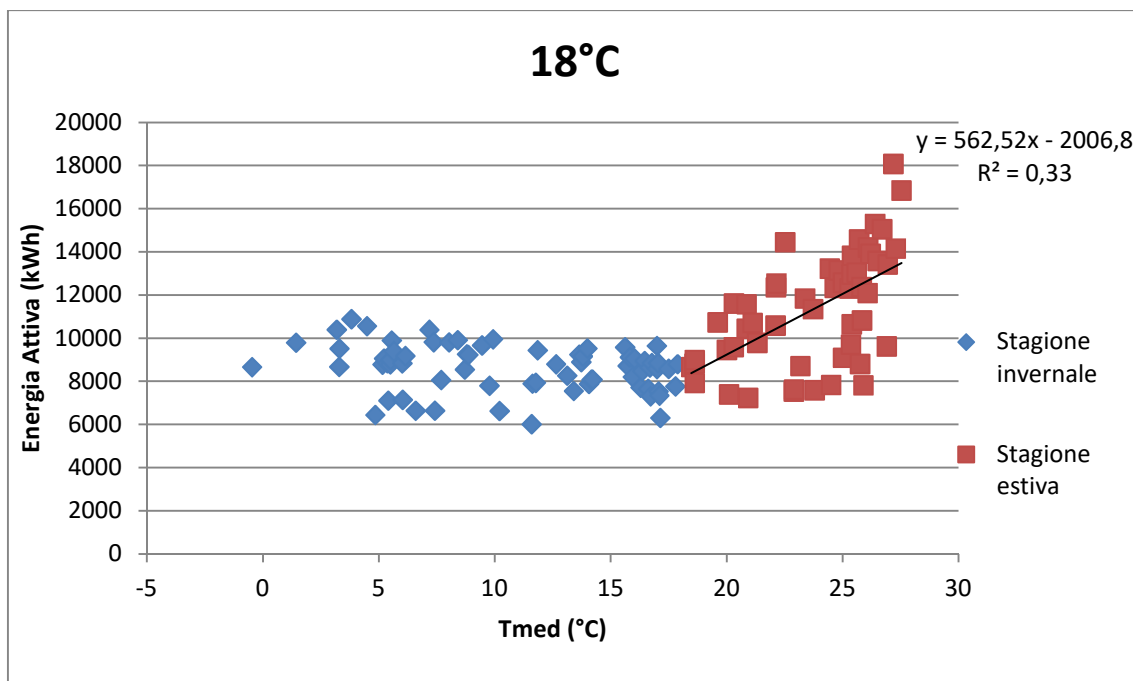


**Figura 4.9** Relazione settimanale Consumi elettrici e Temperatura

### 1° Approccio

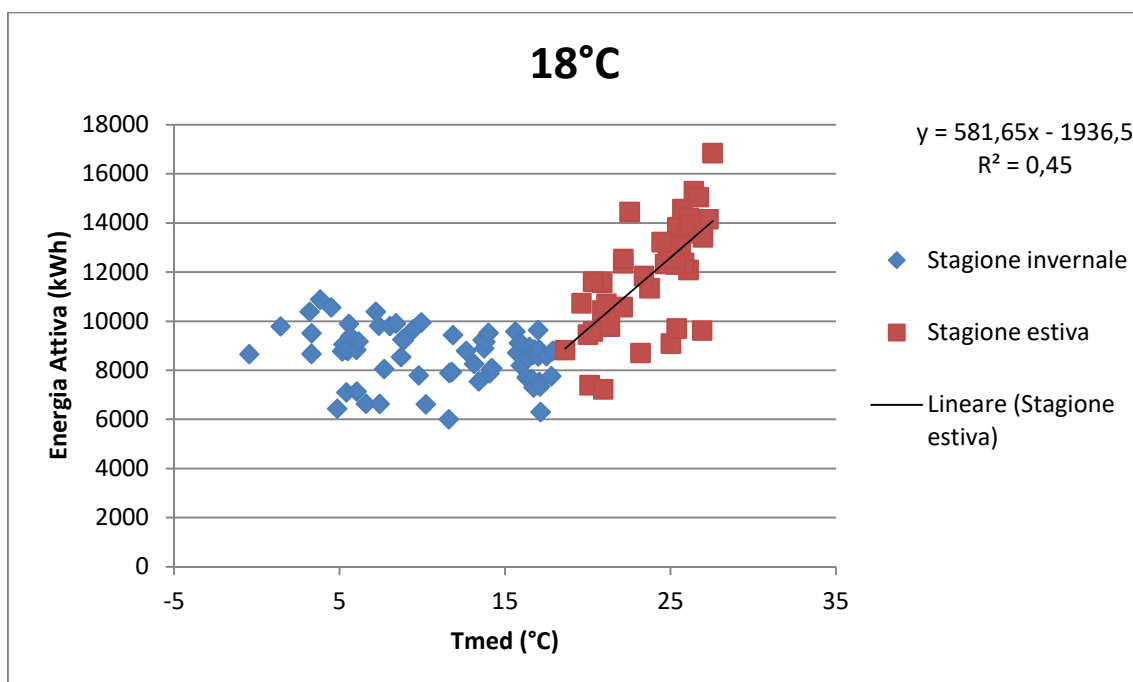
Sono state quindi analizzate tutte le settimane di tutti gli anni considerati, escludendo quelle di chiusura invernali ed estive dell'edificio. Poiché sono stati riscontrati due differenti tipi di tendenze, sono state inserite due diverse serie di dati discriminati da un valore soglia di temperatura che quindi distingue la stagione estiva da quella invernale. Come nel caso precedente il lavoro è proseguito, calcolando la retta di regressione e l'indice  $R^2$ . La separazione ottimale dei domini si verificherà alla temperatura con l'indice  $R^2$  maggiore.

Attraverso varie prove che sono riportate in Appendice 3, la temperatura ottimale ottenuta corrisponde a 18°C.



**Figura 4.10 Relazione settimanale Consumi elettrici e Temperatura, utilizzando 18°C come temperatura soglia**

Analogamente per i consumi termici, sono state eliminate le anomalie riscontrate, per migliorare il modello e avere una correlazione superiore. L'esclusione di tutti i punti corrispondenti agli andamenti anomali riportati nel capitolo raccolta dati ha portato alla costruzione del seguente grafico:

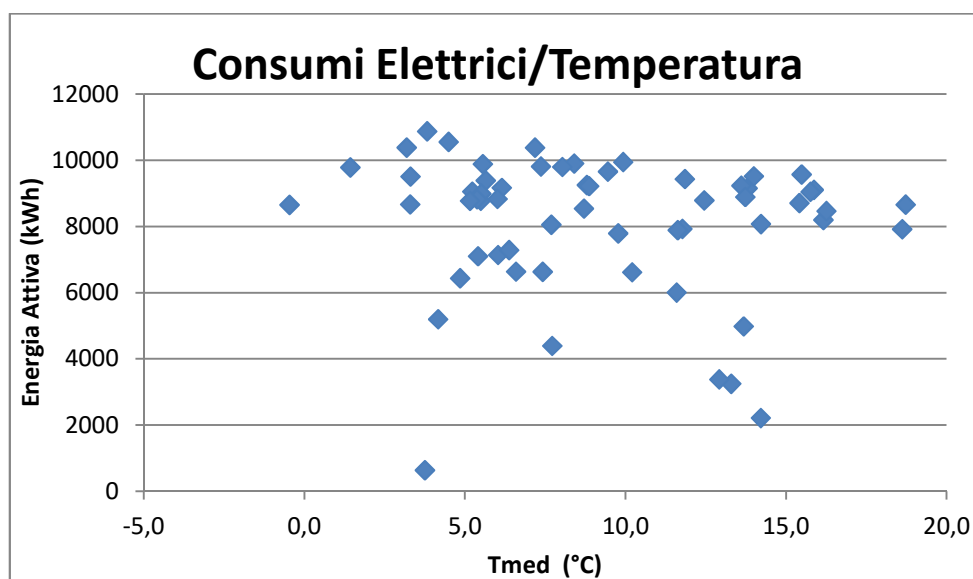


**Figura 4.11 Relazione settimanale Consumi elettrici e Temperatura con soglia fissata a 18°C e escludendo anomalie**

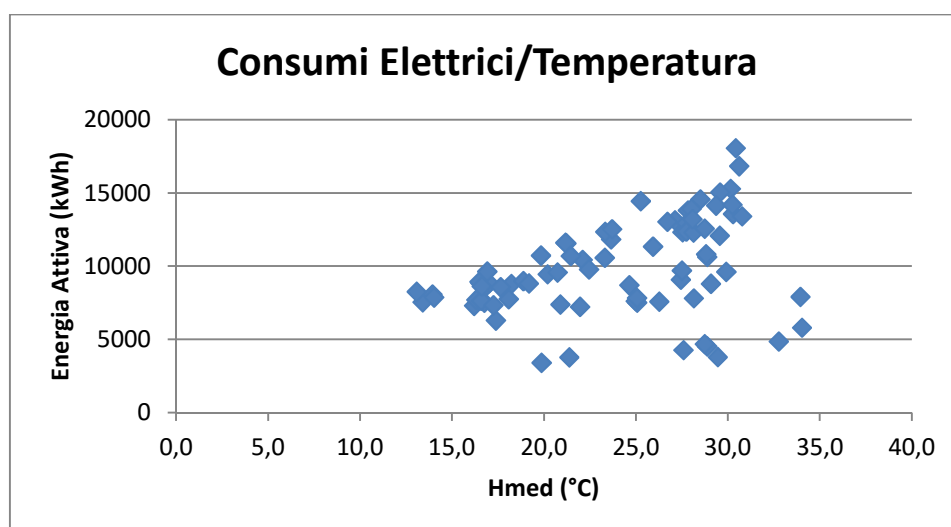
Dalla figura si può notare come a basse temperature si ha un consumo elettrico quasi costante, dovuti all'impianto di illuminazione e al numero di studenti. Nella seconda parte si nota come a temperatura più elevata corrisponda un consumo di energia maggiore. Ovviamente questo descrive il bisogno di più energia da parte dell'impianto di raffrescamento per condizionare l'ambiente durante le giornate afose.

## 2° Approccio

La discriminante tra stagione termica estiva ed invernale non viene più calcolata tramite temperatura, ma fissata secondo normativa DPR 412/93, ovvero dal 15 ottobre al 15 aprile per quella invernale. I dati settimanali sono stati quindi separati in due diversi insiemi, per poi realizzare i seguenti grafici:

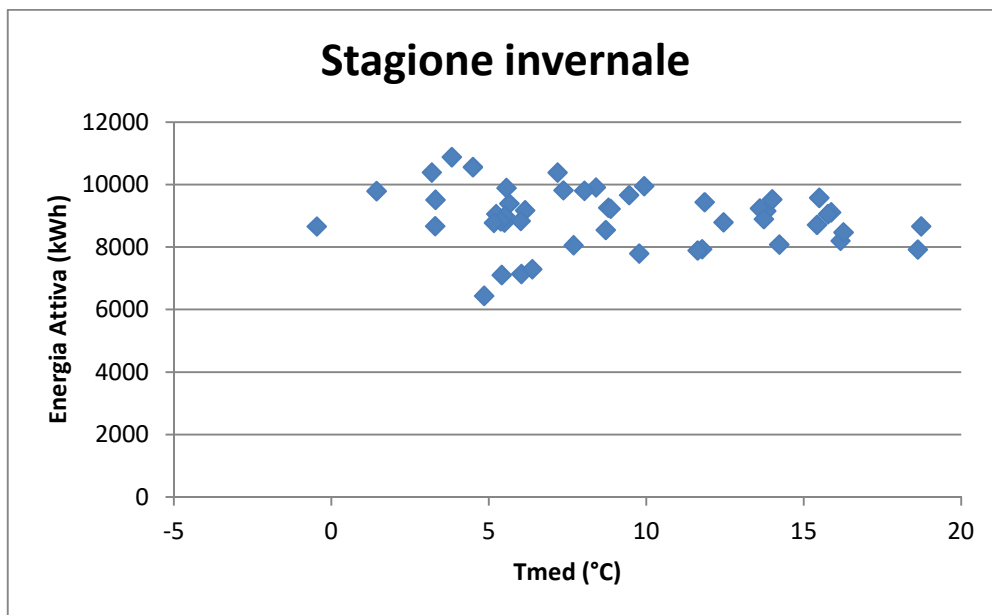


**Figura 4.12** Relazione settimanale Consumi elettrici e Temperatura per la stagione invernale

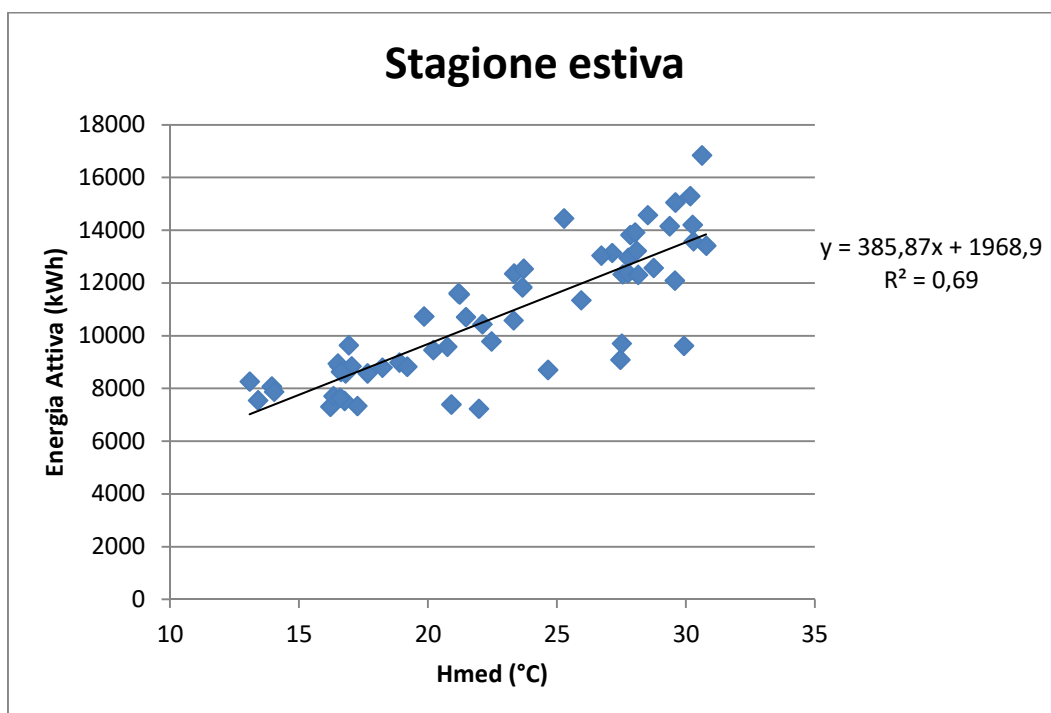


**Figura 4.13** Relazione settimanale Consumi elettrici e Humidex per la stagione estiva

Successivamente per un affinamento del modello sono state eliminate le stesse settimane non considerate nel primo approccio. Infine si è ricavata l'equazione della retta di tendenza e l'indice  $R^2$  per la sola stagione termica estiva.



**Figura 4.14** Relazione settimanale Consumi elettrici e Temperatura per la stagione invernale, escludendo settimane con anomalie



**Figura 4.15** Relazione settimanale Consumi elettrici e Humidex per la stagione estiva, escludendo settimane con anomalie

Rispetto al primo metodo e ad un  $R^2 = 0,45$ , il secondo approccio presenta un  $R^2$  maggiore e pari a 0,69.

Sia per quanto riguarda i consumi elettrici che termici, sono stati calcolati tutti gli  $R^2$  riferiti alle varie combinazioni con i fattori influenzanti. Quelli elencati precedentemente sono i casi con gli indici di correlazione più alti e quindi oggetti di studio per la definizione degli IPE. La correlazione migliore viene raggiunta analizzando i consumi termici con i Gradi Giorno.

### 3. Costruzione della curva dell'IPE

Successivamente viene individuata la curva dell'IPE, rappresentata da una funzione del tipo seguente:

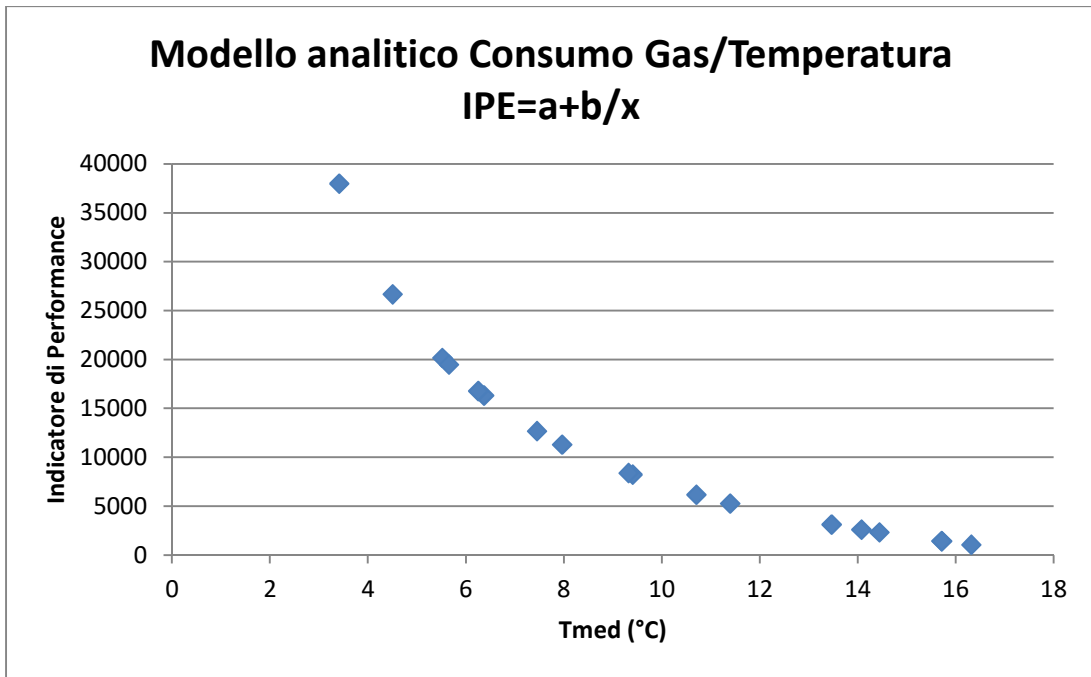
$$IPE = \frac{y}{x} = \frac{ax + b}{x} = a + \frac{b}{x}$$

dove a e b rappresentano rispettivamente la pendenza e la intercetta della retta di regressione lineare ricavata dai dati sperimentali correlati al paragrafo precedente, nella quale y corrisponde al consumo energetico e x al fattore influenzante.

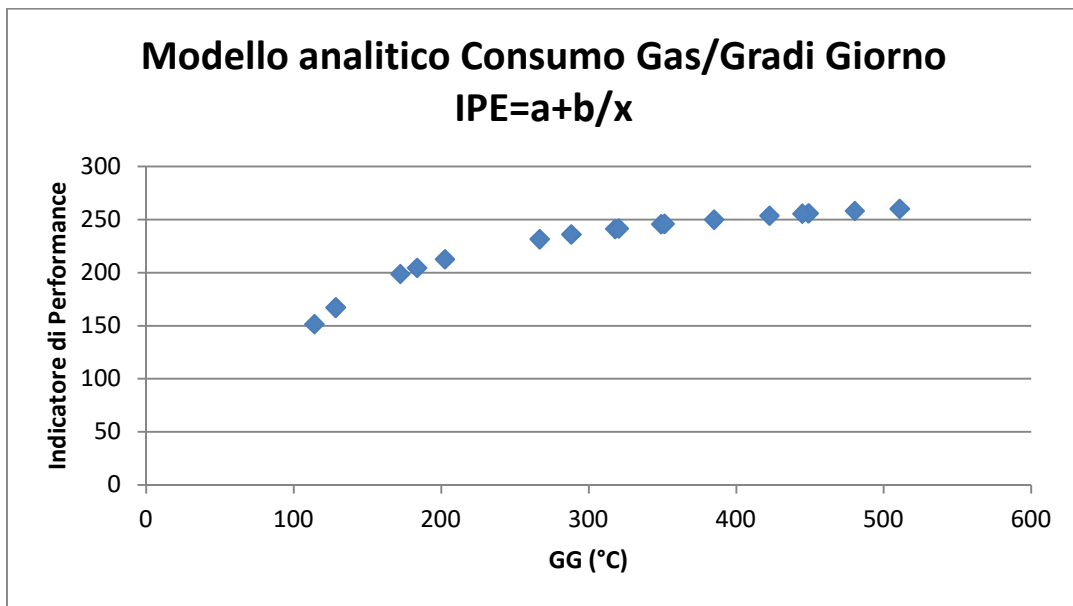
I casi analizzati provenienti dalle considerazioni fatte nel punto precedente possono essere riepilogati nella seguente tabella:

- Consumi Termici (y) e Temperatura media (x):  
 $y = -8717,3x + 159370$   
 $R^2 = 0,73$
- Consumi Termici (y) e Gradi Giorno (x):  
 $y = 291,38x - 15968$   
 $R^2 = 0,75$
- Consumi elettrici (y) e Humidex medio (x):  
 $y = 385,87x + 1968,9$   
 $R^2 = 0,69$

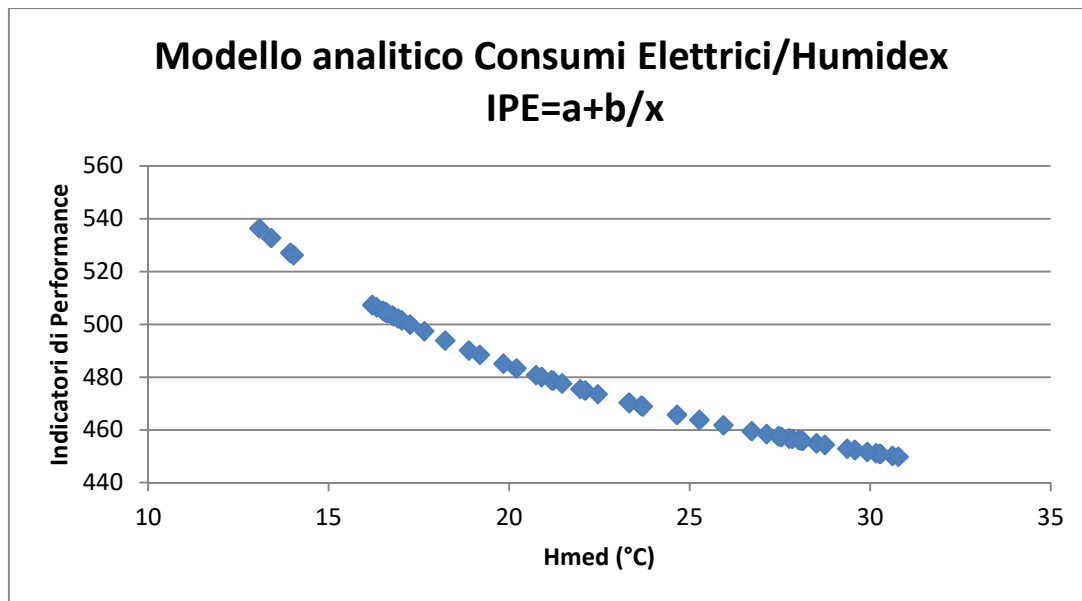
Esplicitando la formula della retta rispetto a  $y/x$  è stato possibile ricavare il modello matematico per gli IPE nei casi considerati:



**Figura 4.16** Modello analitico Consumo gas/Temperatura



**Figura 4.17** Modello analitico Consumo gas/Gradi Giorno



**Figura 4.18 Modello analitico Consumi elettrici/Humidex**

Il modello energetico che si ottiene in questo modo ha fornisce un IPE di riferimento in funzione del fattore influenzante, fornendo un quadro rappresentativo della realtà esistente. Deve essere quindi verificata la validità di questo modello.

**4. Valutazione dell'affidabilità del modello analitico**

Per ogni coppia di valori “consumo energetico e parametro influenzante” riscontrato nelle diagnosi si effettua il rapporto tra il valore reale ed il valore teorico dell'IPE corrispondente. Secondo le linee guide dell'ENEA [18], valgono le seguenti affermazioni:

- Se il 90% degli IPE reali risultano lontani meno del 30% dal valore del modello, quest'ultimo viene definito affidabile
- Se più del 10% degli IPE reali risultano lontani più del 30% dal valore del modello, quest'ultimo viene ritenuto poco affidabile

Il discostamento tra valore del modello e gli IPE reali viene espresso sotto forma di errore relativo ( $\epsilon$ ) ovvero:

$$\epsilon = \frac{|IPE_{mod} - IPE_{real}|}{IPE_{real}}$$

Vengono quindi riportate le tabelle rappresentative degli Indicatori di Performance calcolati analiticamente, gli IPE reali e il loro errore:



### **IPE: Consumo Gas/Temperatura media**

IPE modello	IPE reali	Errore Relativo
16313	13718	19%
16781	9731	72%
5269	2009	162%
2318	4270	46%
20171	22428	10%
11296	13708	18%
6171	4536	36%
1428	267	435%
2605	1513	72%
8231	8845	7%
19477	21787	11%
37994	34089	11%
12675	12210	4%
3119	4322	28%
1422	1071	33%
1049	2262	54%
8383	10606	21%
26676	34618	23%

**Tabella 4.1 Valori IPE reali, IPE modello e loro errore relativo considerando i parametri consumo gas e temperatura**

Il modello viene ritenuto poco affidabile perché più del 10% degli IPE reali risultano lontani più del 30% dal valore del modello.

### **IPE: Consumo Gas/Gradi Giorno**

IPE modello	IPE reali	Errore Relativo
254	207	23%
250	158	58%
232	86	170%
199	358	44%
256	276	7%
246	313	21%
236	168	40%
167	33	413%
204	116	76%
241	262	8%
255	277	8%
260	228	14%
246	259	5%
213	287	26%

167	131	27%
151	324	53%
242	308	22%
258	324	20%

**Tabella 4.2 Valori IPE reali, IPE modello e loro errore relativo considerando i parametri consumo gas e Gradi Giorno**

Anche in questo caso il modello viene definito poco affidabile.

**IPE: Consumi Elettrici/Humidex**

IPE modello	IPE reali	Errore Relativo	IPE modello	IPE reali	Errore Relativo
505	535	6%	478	499	4%
503	510	1%	469	501	6%
533	563	5%	460	488	6%
507	451	12%	470	530	11%
506	472	7%	450	550	18%
503	449	12%	464	572	19%
479	545	12%	453	482	6%
494	483	2%	451	470	4%
475	472	1%	456	497	8%
479	548	13%	457	446	2%
457	497	8%	457	353	30%
455	511	11%	456	437	4%
451	507	11%	474	436	9%
458	484	5%	501	519	3%
452	509	11%	490	476	3%
451	448	1%	502	570	12%
457	448	2%	497	486	2%
466	353	32%	480	354	36%
458	331	38%	500	425	18%
452	409	11%	476	329	44%
457	467	2%	450	436	3%
462	438	6%	452	322	40%
483	468	3%	470	454	4%
481	462	4%	469	529	11%
505	461	9%	454	438	4%
527	579	9%	456	471	3%
526	562	6%	485	541	10%
536	632	15%	504	520	3%
505	542	7%	488	460	6%

**Tabella 4.3 Valori IPE reali, IPE modello e loro errore relativo considerando i parametri consumi elettrici e Humidex**

In questo caso il modello analitico può essere definito affidabile, in quanto i discostamenti non sono significativi.

### **5. La costruzione del grafico “valore medio $\pm$ deviazione standard”**

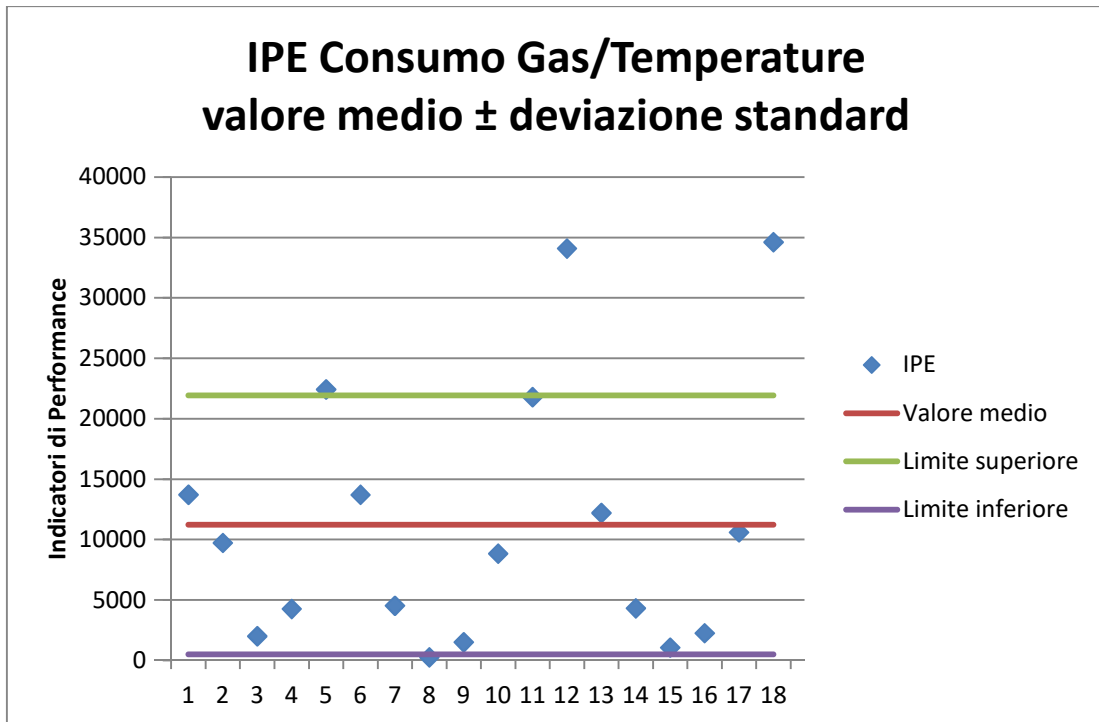
Quando non è possibile realizzare il modello in forma analitica o non risulta affidabile, l'indicatore di riferimento si costruisce mediante la formula “valor medio  $\pm$  deviazione standard” utilizzando i valori reali di IPE ricavati dalle diagnosi.

L'indicatore di riferimento «valor medio  $\pm$  deviazione standard» viene valutato:

- «Affidabile» se il rapporto tra la deviazione standard e il valore medio risulta minore del 20%;
- «poco Affidabile» se il rapporto tra deviazione standard e valore medio risulta compreso tra il 20% ed il 50%;
- «non Affidabile» se il rapporto tra la deviazione standard e il valore medio risulta maggiore del 50%;

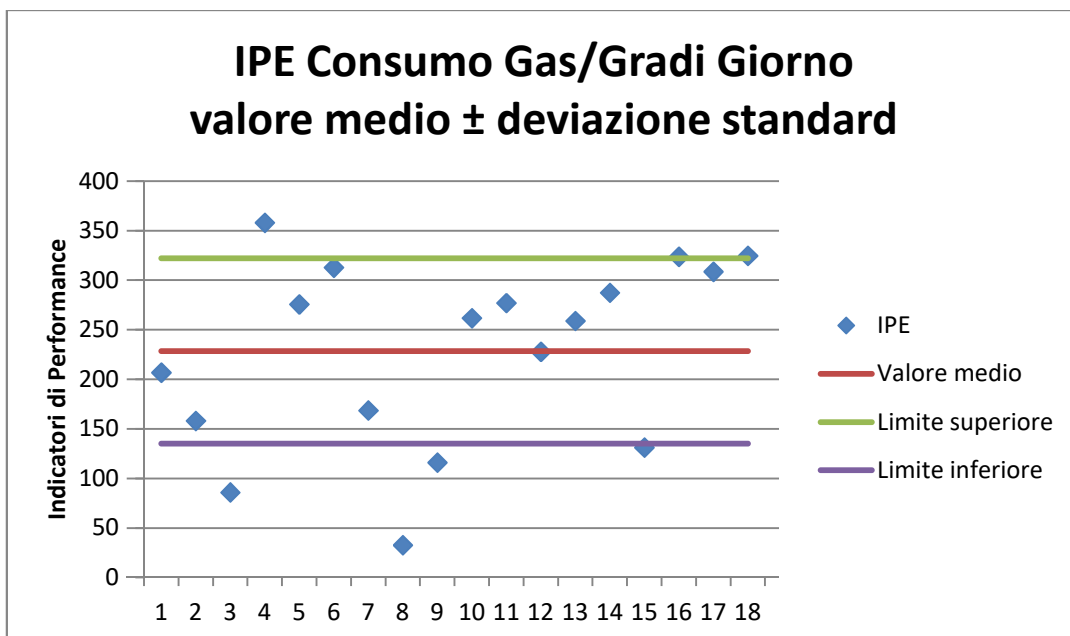
Per quanto riguarda gli Indici di Prestazione Energetica Consumo Gas/Temperatura media, sebbene i dati a disposizione abbiano una buona correlazione tra loro ( $R^2 = 0,73$ ), non essendo stato possibile individuare un modello analitico rappresentativo della realtà, si è preferito utilizzare il modello “valore medio  $\pm$  deviazione standard”.

Tuttavia ha prodotto un risultato non affidabile, in quanto il rapporto deviazione standard e valor medio è pari al 95%, ovvero ricade all'esterno dell'intervallo ritenuto accettabile.



**Figura 4.19** Esempio di modello “valor medio ± deviazione standard” riferito all'IPE Consumo Gas/Temperature

Anche nel caso degli indici Consumo Gas/Gradi Giorno, i dati sono fortemente correlati ( $R^2 = 0,75$ ), ma il modello analitico non è abbastanza rappresentativo della situazione reale. Nel calcolo del modello “valor medio ± deviazione standard” si è ottenuto un risultato poco affidabile, in quanto il rapporto tra deviazione standard e media è pari al 41%.



**Figura 4.20** Esempio di modello “valor medio ± deviazione standard” riferito all'IPE Consumo Gas/Gradi Giorno

## 4.2 - 2° Metodo

Nel secondo approccio al problema, l'energia totale consumata viene normalizzata in funzione delle osservazioni meteorologiche avvenute in un periodo di trent'anni, intervallo di tempo utilizzato per definire il clima di una particolare regione [19]. Sempre attraverso le stazioni meteorologiche e il database della Fondazione, sono state analizzate le misure appartenenti al trentennio 1981/2010 e provenienti dalla stazione situata a Milano Centro (CN). Non sono stati utilizzati come riferimento i sensori presso Milano Città Studi poiché non era disponibile un database di dati trentennali.

L'influenza dell'ambiente atmosferico sui consumi totali è stata quantificata tramite gli indici Heating Degree Days (HDD) e Cooling Degree Days (CDD) così definiti per il nostro caso studio:

- $HDD = 20^{\circ}C - T_{med}$
- $CDD = T_{med} - 20^{\circ}C$

Per il trentennio studiato, la media dei seguenti parametri ha portato alla costruzione della seguente tabella di riferimento:

	<b>CN</b>	<b>1981/2010</b>	
	HDD	CDD	Somma Totale
Gennaio	509	0	509
Febbraio	406	0	406
Marzo	301	0	301
Aprile	191	1	192
Maggio	66	26	92
Giugno	15	93	108
Luglio	1	165	166
Agosto	3	142	145
Settembre	35	35	70
Ottobre	174	1	175
Novembre	349	0	349
Dicembre	485	0	485
<b>Total</b>	<b>2535</b>	<b>463</b>	<b>2998</b>

**Tabella 4.4 Degree Days riferiti a Milano Centro per il trentennio di riferimento**

Successivamente sono stati calcolati i medesimi indici per la stazione meteorologica di riferimento dell'edificio 26, ovvero quella presente nella località Città Studi (CS). Gli anni selezionati sono stati quelli dove si era a conoscenza sia dei consumi elettrici sia termici. Infine si è calcolato il rapporto con i parametri del trentennio di riferimento e di conseguenza ricavato la percentuale di quanto dovranno essere normalizzati i consumi.

Località	Anno	HDD	CDD	Total	Adjustment
CN	1981/2010	2535	463	2998	
CS	2015	2148	601	2750	109%
CS	2016	2259	512	2770	108%
CS	2017	2228	624	2852	105%

**Tabella 4.4 Fattori di normalizzazione dei consumi energetici rispetto ai dati climatici**

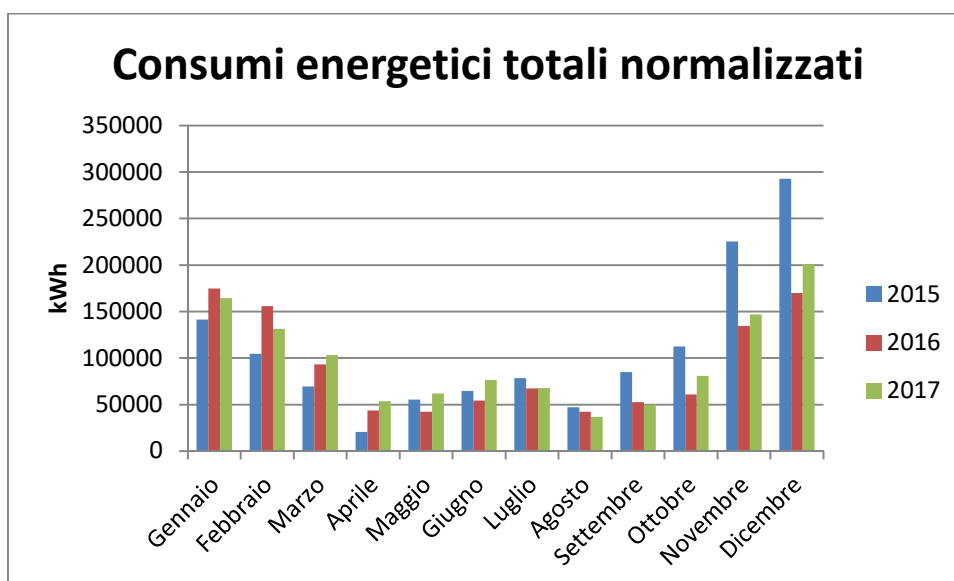
A titolo d'esempio viene applicato il metodo per quanto riguarda l'anno 2015. I consumi energetici vengono prima divisi per la superficie totale riscaldata pari nel nostro caso a 3902 m<sup>2</sup>:

- Consumi Termici per unità di superficie = 169 kWh/m<sup>2</sup>
- Consumi Elettrici per unità di superficie = 136 kWh/m<sup>2</sup>
- Consumi energetici totali per unità di superficie = 305 kWh/m<sup>2</sup>

I dati vengono quindi normalizzati in base agli scostamenti climatici in tabella 4.4, ottenendo un IPE rispetto alla superficie e al clima:

- IPE termico = 169 kWh/m<sup>2</sup> \* 109% = 184 kWh/m<sup>2</sup>
- IPE elettrico = 136 kWh/m<sup>2</sup> \* 109% = 148 kWh/m<sup>2</sup>
- IPE totale = 332 kWh/m<sup>2</sup>

Attraverso questo metodo è possibile creare un database di benchmark utile per tenere sotto controllo i consumi totali in un edificio e monitorare l'efficacia di eventuali lavori sugli impianti di riscaldamento o raffrescamento nonché di gestione e manutenzione. Viene mostrato in figura un esempio di benchmarking interno dettagliato mensilmente attraverso il metodo appena illustrato.



**Figura 4.21 Esempio di benchmarking attraverso i consumi totali mensili normalizzati**

### 4.3 - 3° Metodo

Infine l'ultimo approccio normalizza l'energia relativa ai consumi energetici non attraverso lo studio del clima, ma riferendosi alle variazioni atmosferiche caratteristiche di ogni singolo anno.

Per attuare ciò, bisogna dividere i kWh totali utilizzati per il riscaldamento e il raffrescamento per rispettivamente gli Heat Degree Days e Cool Degree Days se gli impianti di climatizzazione sono separati (come nel nostro caso studio) o viceversa la somma di essi. [20]

Le metodologie di monitoraggio energetico attraverso i Degree Days si dividono in due rami.

#### **Normalizzazione dei consumi energetici attraverso semplice rapporto**

La via più semplice per normalizzare i consumi energetici è calcolare i kWh per Degree Days di ciascun vettore energetico considerato. Si prenda per esempio i consumi termici a cui sono stati eliminati le anomalie riscontrate precedentemente e i corrispettivi mesi. La seguente tabella riassume il primo approccio utilizzando una temperatura di riferimento pari a 20°C

	Energia Termica Totale (kWh)	HDD totali	kWh per Degree Days
2015	259148	1259	206
2016	513334	2088	246
2017	612954	2014	304

**Tabella 4.5 Consumi elettrici normalizzati per Degree Days**

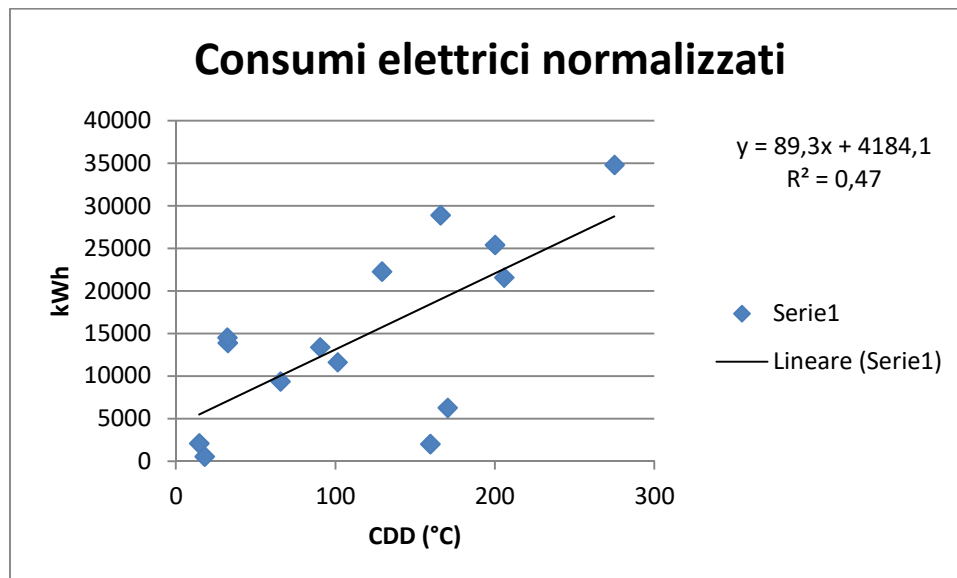
#### **Normalizzazione dei consumi energetici attraverso regressione lineare**

Analogamente al primo metodo visto precedentemente, vengono aggregati i dati energetici con i corrispettivi Degree Days. Successivamente verrà calcolata la retta che approssima meglio l'andamento dei punti nel grafico. Risulta però fondamentale separare i dati dalla così detta "baseline".

Le misure dei consumi elettrici fornite hanno una componente dipendente dal tempo meteorologico e una non dipendente. Per esempio i dati possono essere riferiti al consumo di energia elettrica per l'illuminazione, per i computer e per l'impianto di raffrescamento. Nell'analisi con i Degree-days i consumi che non dipendono dalle variabili atmosferiche costituiscono la "baseline", un valore costante che deve essere tenuto in considerazione.

I consumi da inserire nel calcolo della regressione lineare dovranno quindi essere sottratti da quest'ultimo. Un metodo per valutare la "baseline" è calcolare la media dei consumi elettrici durante il periodo invernale: durante questo intervallo di tempo,

l'edificio è riscaldato tramite gas e quindi i consumi elettrici riscontrati saranno circa costanti per tutto il periodo e indipendenti dai parametri ambientali esterni. In figura 4.22 viene mostrato il procedimento appena spiegato, applicato al nostro caso, dove ai consumi elettrici sono già stati sottratti il consumo medio durante il periodo invernale e pari a 37503 kWh.



**Figura 4.22 Relazione mensile Energia attiva dovuta a solo raffrescamento e Cooling Degree Days**

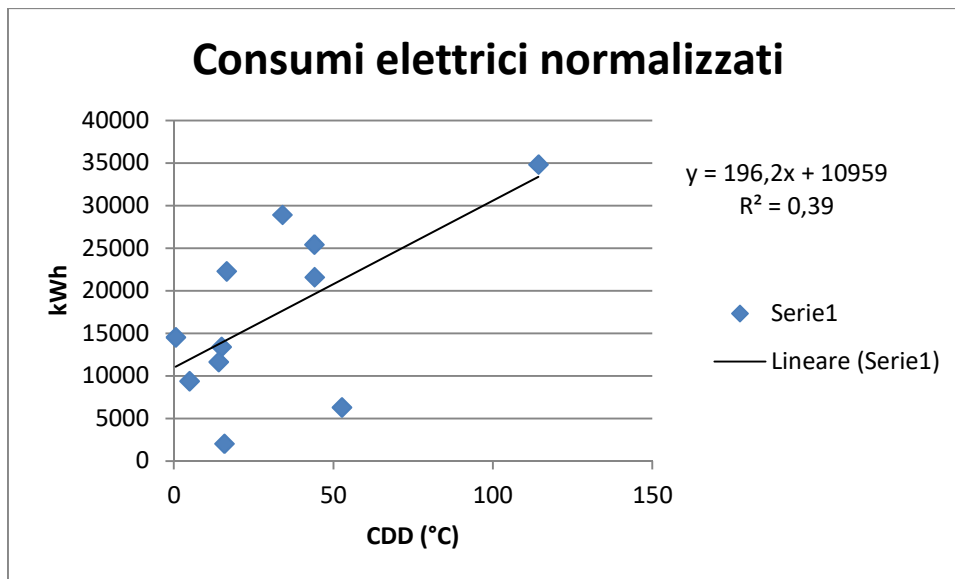
Attraverso l'equazione della retta, si può calcolare mensilmente, tramite i DD, il consumo elettrico medio atteso, confrontarlo con quello reale e stimare l'efficienza del sistema energetico.

Sfortunatamente per questo metodo, applicandolo a casi di edifici reali, possono sorgere problemi che portano a risultati non corretti:

- 1. La temperatura di set-point per cui vengono definiti i Degree Days.** Questa temperatura può essere intesa come il limite per cui la costruzione non ha più bisogno di essere riscaldata. Perciò quest'ultima dipenderà dal tipo di edificio, ma anche costruzioni simili hanno necessità differenti in base al numero di occupanti e al tipo di attività. Inoltre la temperatura di set-point può variare durante l'anno a causa della radiazione solare, il vento e il grado di occupazione; tutti parametri che cambiano durante il tempo. Sarà quindi fondamentale utilizzare la temperatura che più approssima meglio la situazione reale.

A titolo di esempio, in figura 4.23 viene mostrato lo stesso tipo di calcolo visto precedentemente ma con una temperatura di set-point pari a 25°C.





**Figura 4.23 Correlazione mensile Energia attiva dovuta a solo raffrescamento e Cooling Degree Days con Tset=25°C**

2. **Definizione della "baseline".** Come visto precedentemente, la misura dei consumi energetici costanti e che non dipendono dalle condizioni atmosferiche, deriva da un'approssimazione. Inoltre dipenderà direttamente dalla temperatura di set-point e si porterà i problemi visti precedentemente. Bisogna inoltre considerare che i mesi non hanno tutti gli stessi giorni e che alcuni fattori influenzanti (ad esempio la radiazione solare) variano nell'arco di un anno. Tutto ciò andrà ad influenzare profondamente il calcolo della media.
3. **Accensione e spegnimento degli impianti.** Gli edifici civili sono solitamente soggetti a chiusura e di conseguenza gli impianti di riscaldamento e raffrescamento seguono degli orari ben precisi; questi sono informazioni che in molti casi possono non essere a disposizione.

Per far fronte a tutti questi problemi e per migliorare l'accuratezza dei risultati ottenuti attraverso la normalizzazione tramite Degree Days, sono consigliate le seguenti azioni:

1. **Utilizzare dati appropriati.** I dati meteorologici devono essere misurati da una stazione meteorologica il più vicina al sito di interesse. Inoltre bisogna scegliere con accortezza la temperatura di set-point in base alla tipologia di edificio e alla località.
2. **Effettuare analisi stagionali, specificatamente riferiti ad un determinato uso energetico.** Bisogna ignorare i periodi con una temperatura esterna "ideale", ovvero quando la temperatura esterna è tale che l'edificio ha bisogno di una minima parte di energia per il riscaldamento e il raffrescamento. Poiché il metodo sarebbe inaccurato in queste circostanze, è meglio escludere questi periodi nell'analisi.
3. **Utilizzare intervalli di misura adeguati.** Più il periodo che intercorre tra una misura e l'altra è basso, più l'analisi sarà dettagliata, perché saranno più

facilmente individuabili sia picchi anomali di consumi energetici sia la "baseline".

- 4. Ricordare il livello di precisione.** Solitamente i risultati ricavati utilizzando i metodi basati sui Degree Days sono in genere solo approssimativi. Nonostante ciò, sono utili per dare un'indicazione di cosa potrebbe accadere con il consumo di energia analizzato. Tra l'altro, qualsiasi monitoraggio, per quanto semplificato, probabilmente porterà comunque a risparmi energetici: è quasi sempre possibile trovare uno spreco di energia se si va a cercarlo, e tutto ciò che crea consapevolezza energetica è generalmente buono.

## 5 - Analisi dati microclimatici

Gli indici PMV e PPD sono stati successivamente calcolati nella fase di analisi di comfort termico indoor, attraverso i dati input di: indice abbigliamento, indice metabolismo, temperatura aria, umidità relativa, velocità aria e temperatura globotermometro. La seguente tabella riassume gli indici calcolati per i rilievi e per le situazioni osservate.

Rilievo	Area	Abbigliamento (clo)	Metabolismo (met)	PMV	PPD
1	26.03	0,7	1,2	-0,4	9,0%
2	26.14	0,42	1,2	-0,5	9,1%
2	26.14	0,7	1,2	0,1	2,2%
3	mensa	0,7	1,2	-0,7	13,9%
3	mensa	1,3	1,2	0,2	5,8%
4	26.03	0,7	1,2	-0,1	5,2%
5	26.14	0,42	1,2	-0,4	8,3%
5	26.14	0,7	1,2	0,1	5,3%
6	mensa	0,7	1,2	-0,1	5,1%
6	mensa	1,3	1,2	0,6	13,1%

**Tabella 5.1 Indici microclimatici ricavati dalle misurazioni presso edificio 26**

Poiché in alcuni casi vi sono state due popolazioni con vestitari diversi, è stata calcolata una media ponderata in base alle proporzioni dei due domini.

Rilievo	Area	Abbigliamento	Metabolismo	PMV	PPD
1	26.03	100% B	1,2	0,0	9,0%
2	26.14	20% A, 80% B	1,2	0,0	3,6%
3	mensa	50% B, 50% C	1,2	-0,2	9,8%
4	26.03	100% B	1,2	-0,1	5,2%
5	26.14	20% A, 80% B	1,2	0,0	5,9%
6	mensa	90% B, 10% C	1,2	0,0	5,9%

**Tabella 5.1 Indici microclimatici mediati ricavati dalle misurazioni presso edificio 26**

I valori ottenuti dagli indici microclimatici PMV e PPD identificano gli ambienti dell'edificio 26 come ambiente termico moderato neutro. La percentuale di persone insoddisfatte non raggiunge il 30% e non sono stati riscontrati disagi termici localizzati.

## 6 - Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro era di proporre un caso studio per la definizione e il calcolo degli IPE per gli edifici civili. La partenza di ogni analisi è la diagnosi energetica, effettuata tramite sopralluoghi e la raccolta di tutti i dati e le informazioni necessarie per la caratterizzazione totale dell'edificio. In fase di scelta della costruzione adeguata per il caso studio sono sorti molti problemi, i quali non dovrebbero emergere in un sistema ideale di gestione energetica: i consumi elettrici e termici infatti non erano disponibili per alcuni edifici oppure inglobati in una voce che accorpava l'intero Campus.

L'importanza di un buon sistema di misura e di monitoraggio è fondamentale, in quanto essi sono potenziali strumenti:

- Durante le fasi di audit energetico
- Per valutare i costi energetici
- Nelle azioni di benchmarking atte a valutare le prestazioni energetiche rispetto ad opportuni valori di riferimento
- Nel ridurre i rischi legati alla diminuzione delle prestazioni energetiche e a proporre azioni per migliorarle
- Per facilitare la valutazione dei contratti di prestazione energetica

La scelta è quindi ricaduta sull'edificio 26, il quale presenta un database di consumi energetici abbastanza significativo e i misuratori sono specifici della singola costruzione. Analizzando più in dettaglio i consumi, si sono però riscontrate delle anomalie, che durante la modellizzazione sono state eliminate per avere una correlazione più esatta, ma non devono essere ignorate in fase di monitoraggio in quanto possibili indicatori di guasti e malfunzionamenti.

Le correlazioni riscontrate durante il lavoro di tesi hanno rimarcato come le condizioni atmosferiche hanno un impatto sui consumi energetici deputati alle funzioni cosiddette HVAC (climatizzazione degli ambienti indoor) e ciò non deve essere trascurato nella valutazione degli IPE.

Nel corso del lavoro di tesi sono stati definiti e confrontati tre metodi per l'individuazione degli IPE in funzione dei dati disponibili. Nel **primo metodo** sono stati costruiti i modelli analitici che caratterizzano il legame tra i consumi energetici e i fattori influenzanti più significativi (ovvero Temperatura, Humidex e Gradi Giorno), questi ultimi determinati attraverso l'indice  $R^2$  di correlazione lineare. Il modello fornisce un'equazione di previsione del valore di IPE ideale, da confrontare con il valore reale per avere una chiara idea del grado di efficienza energetica dell'edificio. In questo primo metodo di calcolo si è evidenziato come il modello analitico non risulti affidabile quando si hanno problemi nella raccolta delle informazioni e i dati sono pochi significativi. Nel nostro caso, nonostante la correlazione con i fattori influenzanti fosse elevata, i modelli IPE risultavano inaffidabili per i consumi termici. Questi valori non

vengono monitorati e la contabilizzazione avviene mensilmente tramite bollette fornite dall'ente erogatore.

Nel **secondo metodo** i consumi sono stati normalizzati attraverso i dati desunti dalla climatologia urbana, ovvero tramite i valori medi di alcune variabili meteorologiche, i Degree Days, per il trentennio di riferimento 1981/2010. L'iter operativo è molto semplice, ma in questo periodo di veloce trasformazione del clima e del layout urbano trent'anni come riferimento climatico potrebbe non rispecchiare la situazione attuale. Inoltre i dati climatici vengono solitamente ricavati dalla stessa stazione meteorologica per ogni zona della città (come nel nostro caso), rendendo il confronto con la situazione dell'area analizzata poco significativo.

Infine nel **terzo metodo** i consumi sono stati normalizzati tramite i valori annuali dei Gradi Giorno. Il maggior problema di questo metodo è l'individuazione della baseline da sottrarre ai consumi energetici totali, ovvero quei consumi che sono costanti per tutto l'anno e non dipendono dai parametri meteo esterni. Una possibile soluzione per risolvere la questione è l'inserimento di misuratori direttamente sulle linee elettriche dei dispositivi destinati alla climatizzazione dell'ambiente interno.

Visti i risultati ottenuti, il metodo migliore rilevato per entrambi i vettori e usi energetici è il primo, ovvero la definizione dell'IPE attraverso la correlazione analitica tra consumi energetici e parametri meteo. Nello specifico sono stati ricavati i seguenti valori di benchmark:

- IPE consumi elettrici / Humidex [450 – 540 kWh/°C]
- IPE consumi gas / GG [150 – 260 kWh/°C]

Per concludere, per poter valutare l'efficienza energetica di un sistema adeguatamente e senza troppi margini di incertezza, occorre dotarsi di un sistema di monitoraggio dell'energia consumata e dei principali fattori influenzanti. Questo è imprescindibile per l'ottimizzazione energetica, il miglioramento del comfort (rilevato tramite campagna di misure come nel caso presentato in questa tesi) e per aumentare la consapevolezza dell'uso dell'energia in quanto anche il comportamento degli occupanti determina l'efficienza energetica dell'edificio.

# Bibliografia

- [1] Fundamentals of Weather and Climate, by Robin McIlveen, Oxford University Press
- [2] Urban Climates, by T.R. Oke, Cambridge University Press
- [3] <https://www.fondazioneomd.it>
- [4] DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 26 agosto 1993, n. 412 Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10.
- [5] Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 maggio 2010 , sulla prestazione energetica nell'edilizia
- [6] [https://www.casaclima.com/ar\\_14120\\_\\_ITALIA-DA-NON-PERDERE-201031ce--direttiva--attestatao-prestazione-energetica-II-Governo-recepisce-la-direttiva-201031UE-sugli-edifici-ad-energia-quasi-zero.html](https://www.casaclima.com/ar_14120__ITALIA-DA-NON-PERDERE-201031ce--direttiva--attestatao-prestazione-energetica-II-Governo-recepisce-la-direttiva-201031UE-sugli-edifici-ad-energia-quasi-zero.html)
- [7] Direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 25 ottobre 2012 , sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE
- [8] Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica
- [9] Guida Schneider Electric alla EN15232
- [10] <https://www.schneider-electric.it/it/work/insights/uni-en-15232.jsp>
- [11] DRAFT prEN 17267: Energy measurement and monitoring plan for organisations - Design and implementation
- [12] USER'S GUIDE Vaisala Weather Transmitter WXT520
- [13] Manuale Babuc A/M
- [14] Sonde microclimatiche LSI LASTEM – Manuale utente
- [15] [https://www.casaclima.com/ar\\_18958\\_\\_ITALIA-Il-parere-di...-condizionamento-gradi-giorno-Condizionamento-estivo.-Limportanza-di-usare-il-parametro-dei-gradi-giorno-.html](https://www.casaclima.com/ar_18958__ITALIA-Il-parere-di...-condizionamento-gradi-giorno-Condizionamento-estivo.-Limportanza-di-usare-il-parametro-dei-gradi-giorno-.html)
- [16] <http://www.encorecompany.it/diagnosi-energetica>

[17] La centralità delle Misure per la gestione dell'Efficienza Energetica, articolo tratto dal numero 4/2018 di Tutto Misure a cura di L. Cristaldi, F. Bua, G. Grigis, C. Lavecchia, L. Mongiovì, L. Martirano, E. Tironi

[18] Guida ENEA: VALUTAZIONI PRELIMINARI SUGLI INDICI DI PRESTAZIONE ENERGETICA NEL SETTORE DELLA PRODUZIONE DEL VETRO

[19] Benchmarking EPA Portfolio Manager and Energy Star Certification  
<https://maeep.org/sites/default/files/MAEEP%20PPT%206%20Benchmarking%20and%20Energy%20Star.pdf>

[20] <https://www.energylens.com/articles/degree-days>

## **Immagini**

*Figura 1.1* [https://www.researchgate.net/figure/Sketch-of-the-urban-boundary-layer-structure-indicating-the-various-sub-layers-and-their\\_fig1\\_281142266](https://www.researchgate.net/figure/Sketch-of-the-urban-boundary-layer-structure-indicating-the-various-sub-layers-and-their_fig1_281142266)

*Figure 2.1; 2.2; 3.11; 3.12; 3.13* Polimaps

*Figure 2.3; 2.4* <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/M210906EN-C.pdf>

*Figura 2.5* Archivio Fondazione OMD

*Figure 2.6; 2.7; 2.8; 2.9; 2.10* <http://www.lsi-lastem.it>

# Appendice 1

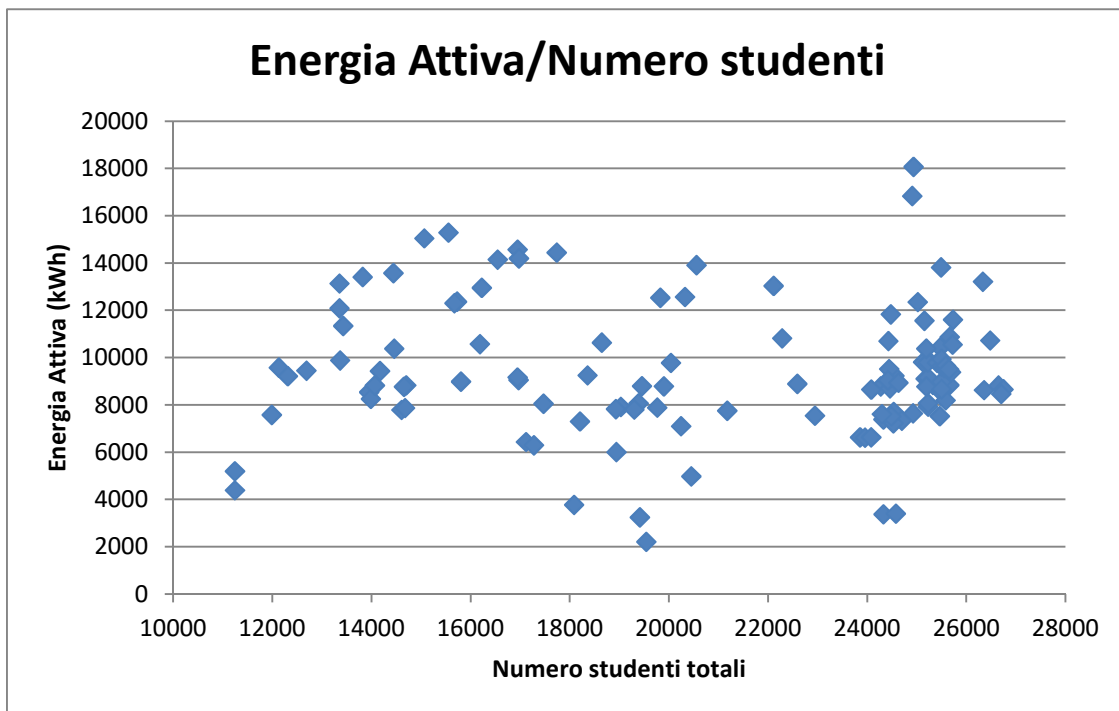


Figura A.1 Correlazione settimanale Consumi elettrici e numero occupanti al 30%

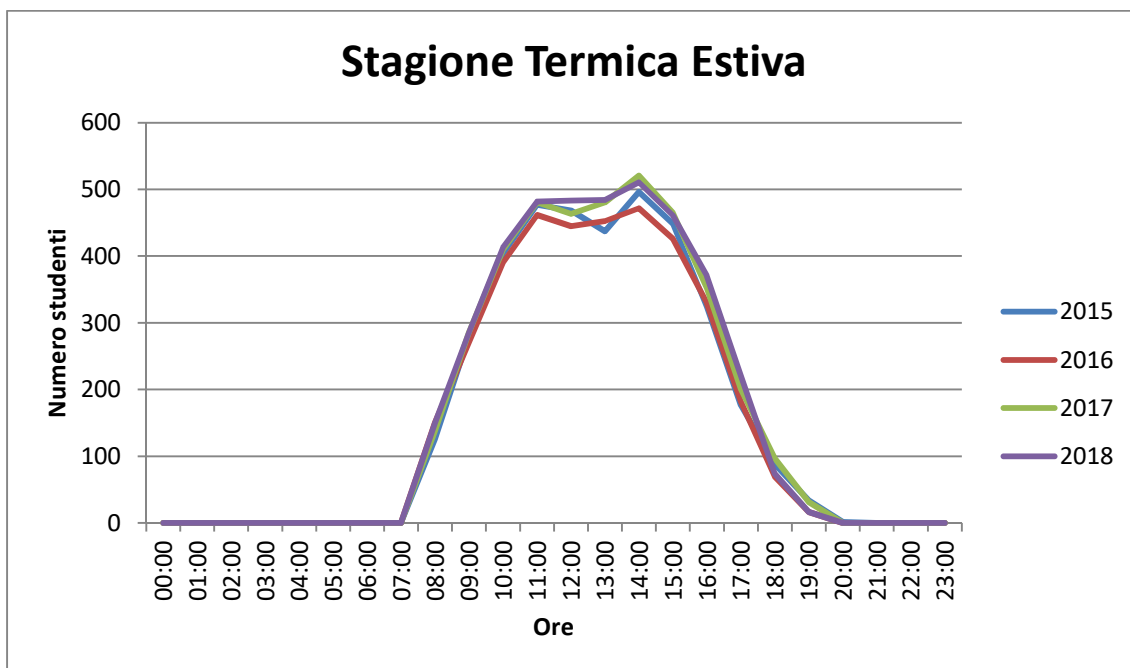
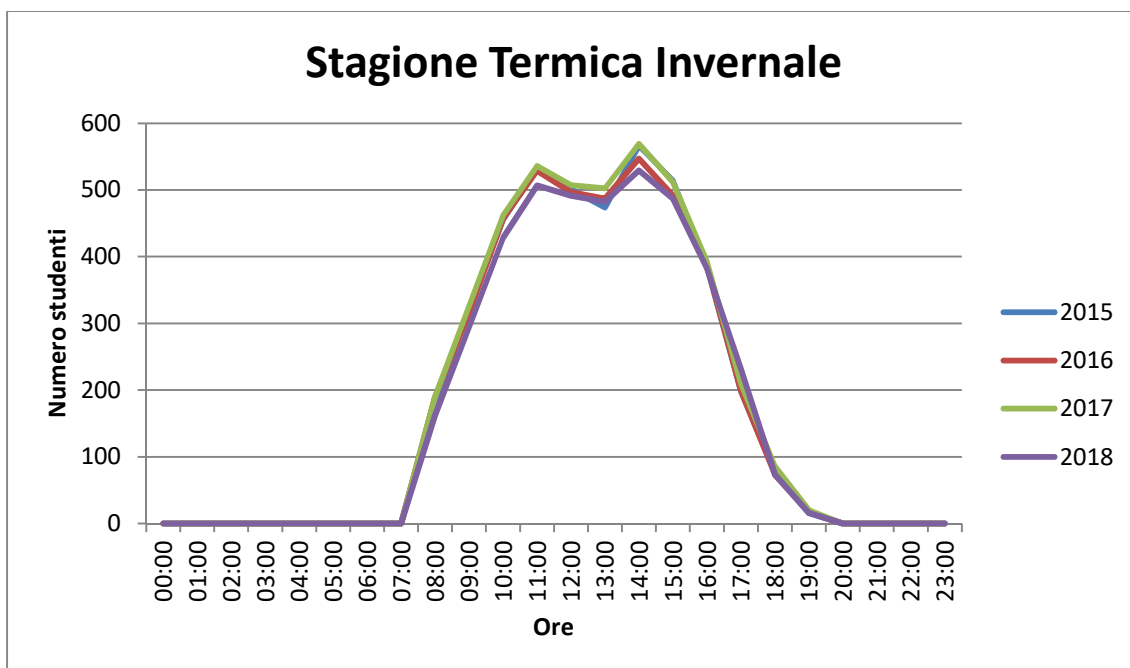


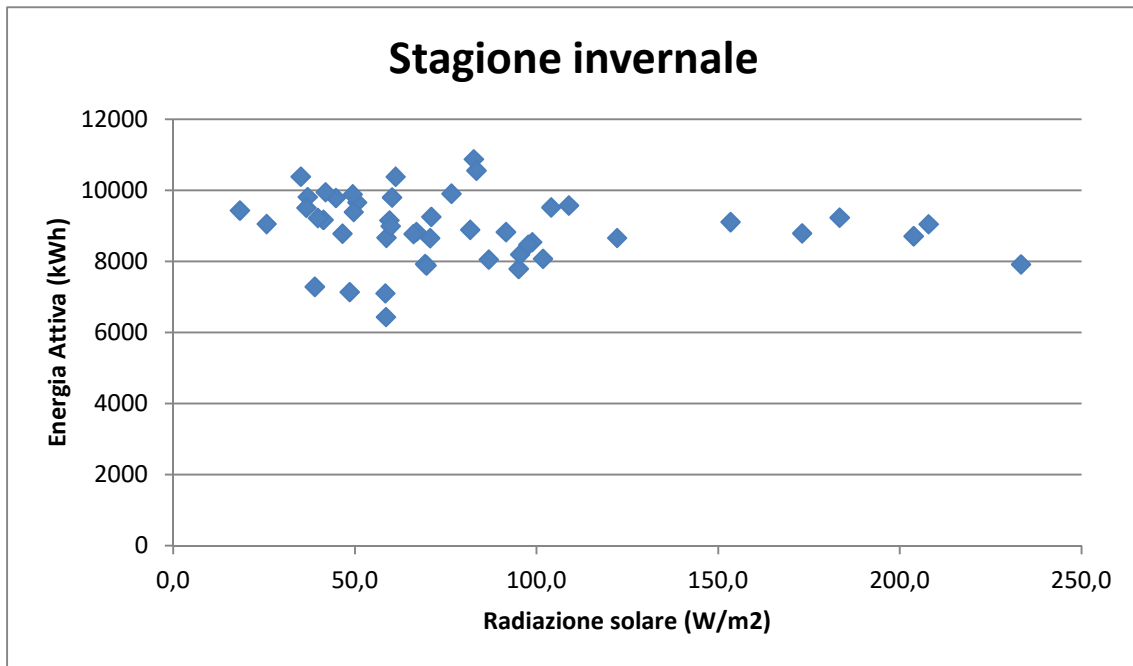
Figura A.2 Grafico giorno tipo Edificio 26 per la stagione termica estiva con numero occupanti al 30%



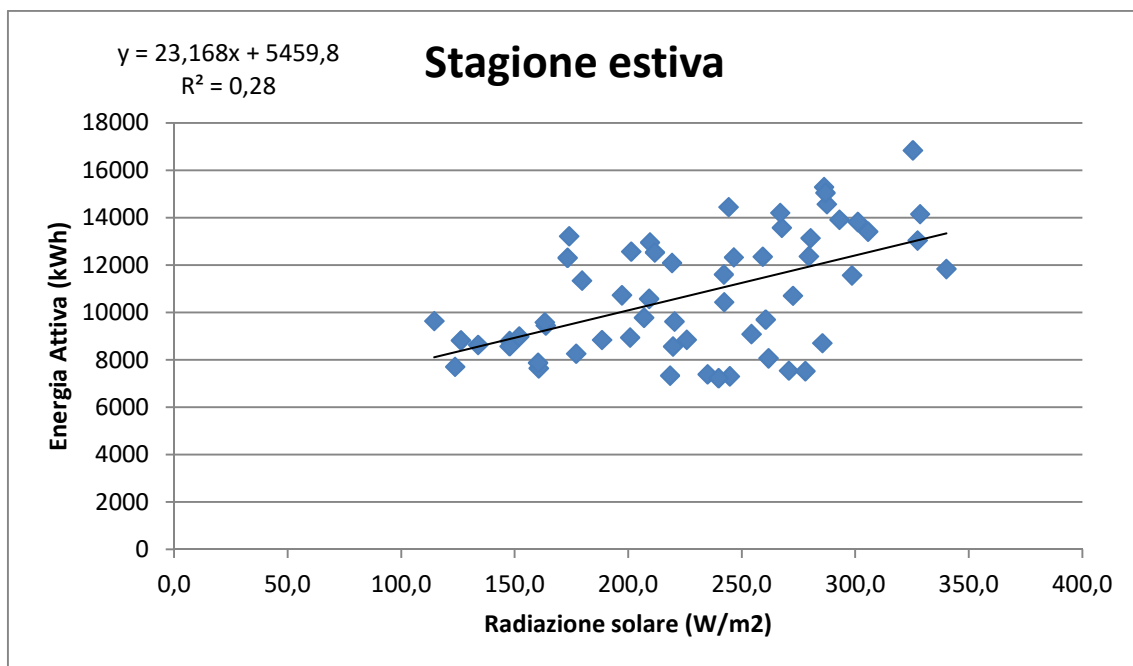


**Figura A.3 Grafico giorno tipo Edificio 26 per la stagione termica invernale con numero occupanti al 30%**

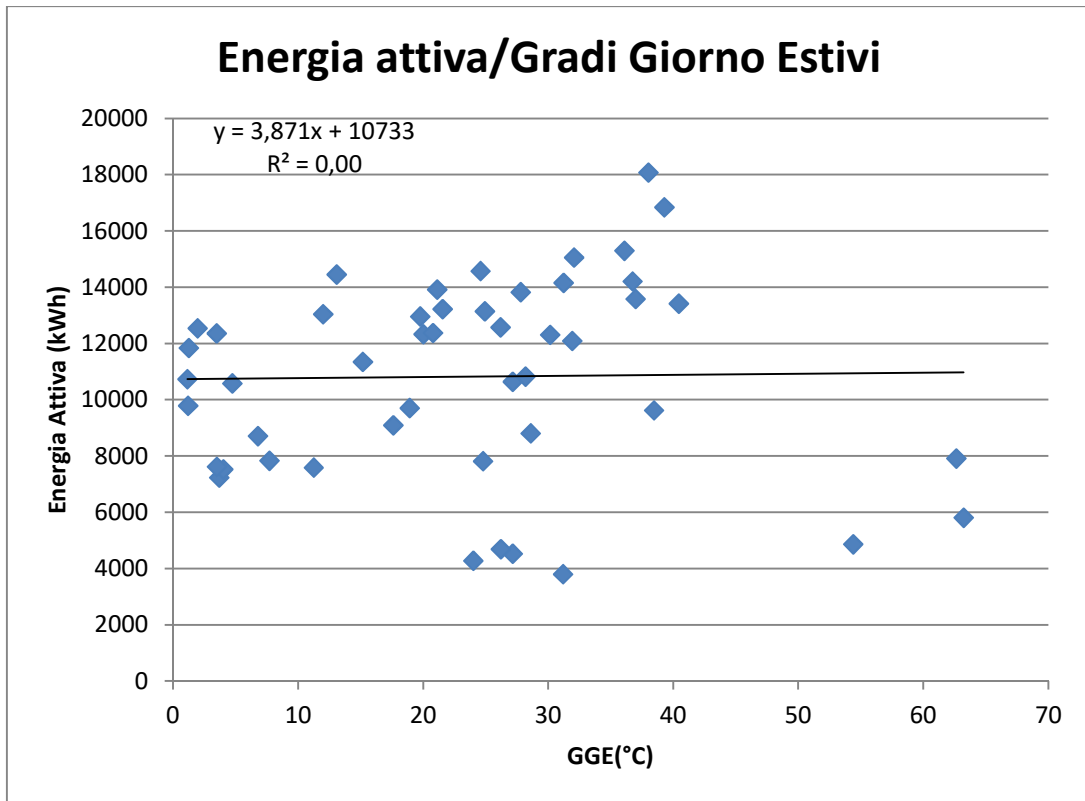
## Appendice 2



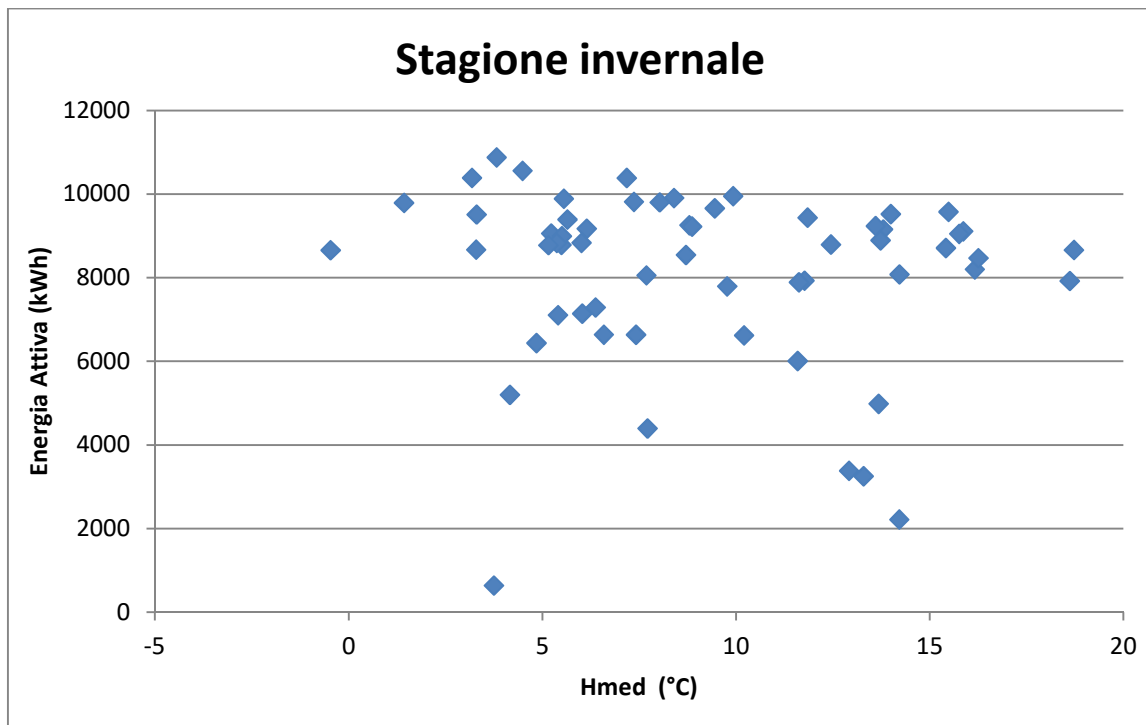
**Figura A.4** Correlazione settimanale Consumi elettrici e radiazione solare per la stagione termica invernale



**Figura A.5** Correlazione settimanale Consumi elettrici e radiazione solare per la stagione termica estiva



**Figura A.6** Correlazione settimanale Consumi elettrici e Gradi Giorno Estivi



**Figura A.7** Correlazione settimanale Consumi elettrici e Humidex medio per la stagione termica invernale

## Appendice 3

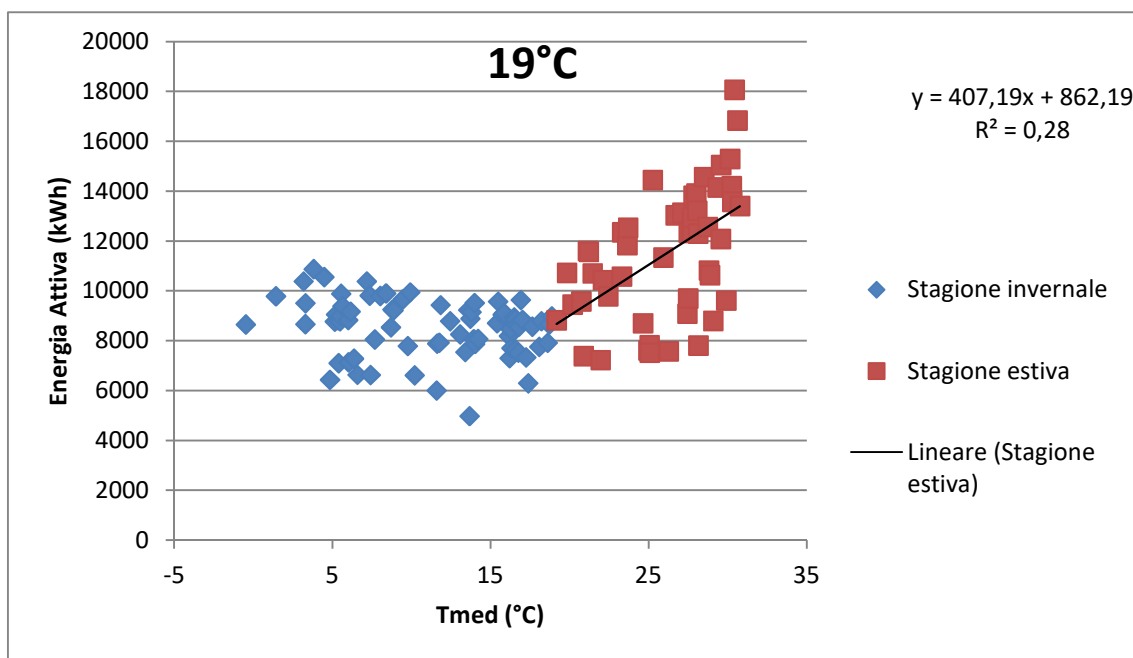


Figura A.8 Correlazione settimanale Consumi elettrici e Temperatura, utilizzando 19°C come temperatura soglia

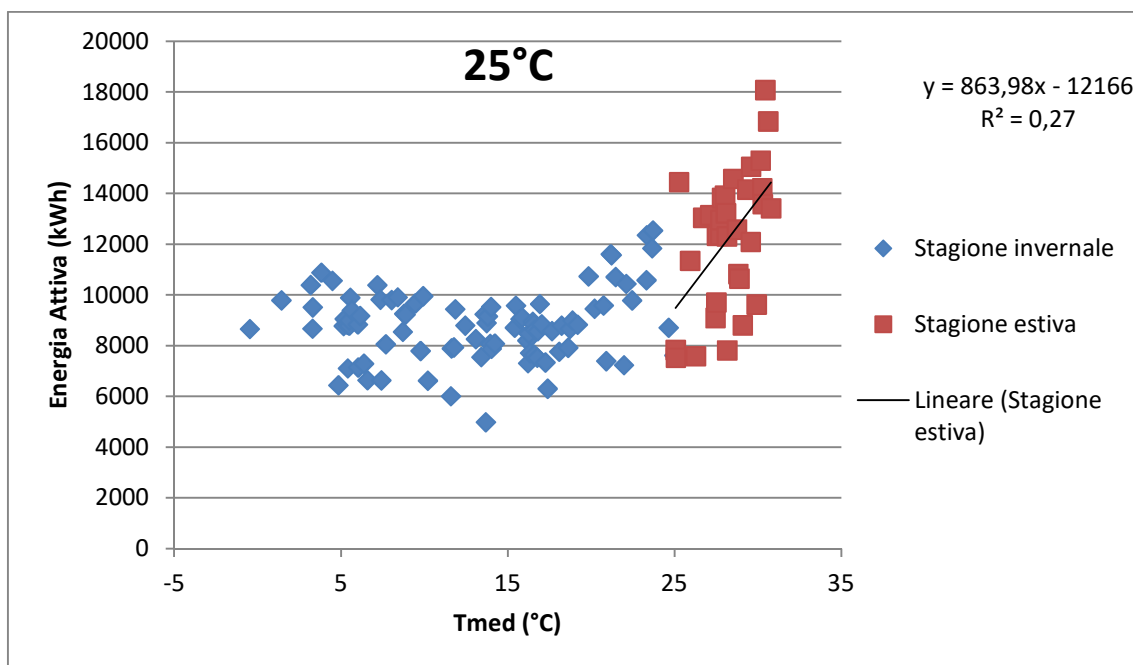


Figura A.9 Correlazione settimanale Consumi elettrici e Temperatura, utilizzando 25°C come temperatura soglia