



Politecnico di Torino

Corso di Laurea
Ingegneria meccanica
A.A. 2021/2022
Sessione di Laurea dicembre 2022

**Analisi dei consumi energetici di un ufficio
nella prospettiva delle comunità energetiche:
il caso studio degli uffici ENEA di Bari**

Relatori:

Prof.sa Guglielmina Mutani
Prof. Marco Carlo Masoero

Candidato:

Matteo Miconi

Correlatori:

Dott. Angelo Mariano
Arch. Antonella Tundo

Sommario

1	Introduzione	4
1.1	L'inquinamento ambientale.....	4
1.1.1	Andamento storico delle concentrazioni di gas serra in atmosfera, origine ed effetti ...	6
1.1.2	Situazione presente delle emissioni di gas serra	9
1.2	La domanda di energia e il risparmio energetico	15
1.2.1	Il consumo energetico nel mondo	15
1.2.2	Il consumo energetico degli edifici	18
1.3	La <i>Data Science</i> nell'ambito energetico	21
2	Descrizione della struttura oggetto di studio.....	24
2.1	Uso degli uffici.....	29
3	Monitoraggio energetico e ambientale degli edifici	30
3.1	Perché monitorare.....	30
3.2	Descrizione del sistema di monitoraggio ambientale ed elettrico	30
4	Analisi dei consumi e dei parametri ambientali.....	36
4.1	Programmazione per lo scaricamento dei dati di monitoraggio e l'analisi	36
4.2	Indicatori di prestazione	37
4.3	Analisi consumi.....	37
4.3.1	Visualizzazioni grafiche per l'analisi.....	38
4.3.2	Metodo di elaborazione dei dati.....	38
4.3.3	Consumo elettrico riscaldamento bagni.....	40
4.3.4	Consumo elettrico climatizzazione uffici	43
4.3.5	Consumo elettrico postazioni di lavoro	48
4.3.6	Consumo elettrico illuminazione	50
4.3.7	Consumo elettrico per acqua calda sanitaria e asciugamani elettrici.....	52
4.3.8	Consumo elettrico generale.....	56
4.4	Firma energetica	60
4.5	Previsione dei consumi sulla base della presenza	67

4.5.1	Metodologia, strumenti di lavoro e previsione delle presenze.....	67
4.5.2	Previsione dei consumi sulla base di alcuni scenari di occupazione	73
4.6	Misura dati ambientali con centralina microclimatica	88
5	Modello energetico con software commerciale	94
5.1	Modellazione dell'edificio	94
5.1.1	Stratigrafia e prestazioni dei muri perimetrali	95
5.1.2	Stratigrafia e prestazioni dei solai	97
5.1.3	Stratigrafia e prestazione dei serramenti	98
5.1.4	Ponti termici.....	99
5.1.5	Impianti per la climatizzazione	99
5.1.6	Illuminazione	100
5.2	Prestazioni energetiche.....	100
5.3	Confronto tra i risultati della diagnosi energetica e i dati effettivamente misurati	102
6	Proposta di interventi migliorativi	104
6.1	Logica in cloud per lo spegnimento e l'accensione dei climatizzatori.....	104
6.2	Accensione e spegnimento automatizzato del riscaldamento dei bagni.....	105
6.3	Spegnimento dei boiler durante le chiusure	105
6.4	Sostituzione degli infissi e degli oscuranti	106
6.5	Isolamento a cappotto del tetto.....	107
6.6	Isolamento a cappotto del tetto e sostituzione degli infissi	108
7	Valutazione di massima installazione impianto fotovoltaico	111
7.1	Impianto fotovoltaico	111
7.2	Confronto tra produzione fotovoltaica e consumi	112
7.2.1	Scenario con consumi reali misurati	112
7.2.2	Scenario con consumi ottimizzati attraverso interventi di gestione degli impianti ...	113
7.3	Considerazioni su una eventuale batteria	114
8	La flessibilità energetica	116
9	Proposte di miglioramento e sviluppi	121

10	Conclusioni	123
11	Bibliografia e sitografia	124
12	Allegati.....	125
	A Preventivo di spesa per le lavorazioni sul quadro elettrico	125
	B Scheda tecnica climatizzatore Olimpia Splendid	126
	Ringraziamenti	128

1 Introduzione

In questa tesi si affronta l'argomento del monitoraggio e del risparmio energetico negli edifici per aumentare la cosiddetta flessibilità della domanda di energia guardando alle comunità rinnovabili. La comunità energetica, infatti, si pone tra i vari obiettivi quello di far incontrare la domanda di energia con la produzione da parte della stessa comunità limitando gli scambi di energia con la rete elettrica. Inoltre può verificarsi anche il caso in cui sia la rete elettrica stessa a richiedere di limitare la domanda di energia da parte del consumatore onde evitare sovraccarichi e/o blackout. Si capisce quindi come comprendere quali sono i margini per ridurre temporaneamente il carico in modo da soddisfare i bisogni della comunità energetica e le richieste da parte del gestore della rete elettrica sia necessario. Inoltre, ridurre il consumo di energia porta un vantaggio a prescindere, che il consumatore sia parte di una comunità energetica rinnovabile o autonomo, che partecipi al meccanismo di flessibilità della rete elettrica o meno, per ragioni economiche e ambientali.

Il percorso parte dalla descrizione dell'edificio oggetto di studio, la sede dell'ufficio territoriale di Bari dell'ENEA (Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile) soffermandosi in particolare sul sistema di monitoraggio ambientale ed energetico installato; attraverso algoritmi costruiti allo scopo in Python e svolge una serie di analisi energetiche basate sui dati di consumo reali misurati, prosegue elaborando una modellazione energetica della struttura attraverso un software commerciale e propone degli interventi migliorativi. Si conclude con una valutazione di massima di un impianto fotovoltaico che permetta di soddisfare la domanda di energia guardando alla possibile integrazione in una comunità energetica rinnovabile e definendo il concetto di flessibilità energetica della domanda.

1.1 L'inquinamento ambientale

In anni recenti i temi dell'inquinamento ambientale e del cambiamento climatico hanno ricevuto un'attenzione sempre crescente non tanto da parte della comunità scientifica che già tra gli anni '60 e '70 ha iniziato a discutere di questi temi, ma soprattutto dell'opinione pubblica e dei governi. Recentemente, tuttavia, i temi dell'energia e del cambiamento climatico hanno prepotentemente fatto irruzione nel quotidiano di tutti noi, perché toccati in prima persona. Le ragioni sono molteplici come ad esempio:

- eventi atmosferici estremi e catastrofici come la recente alluvione nell'anconetano avvenuta il 15 settembre 2022;
- eventi ambientali catastrofici come il collasso del ghiacciaio della Marmolada durante l'estate 2022 e precisamente il 3 luglio¹;

¹ «Secondo i ricercatori, l'evento tragico è dovuto alle condizioni anomale, di lungo periodo, delle temperature al di sopra della media, ma è stato accelerato anche dall'ondata eccezionale di calore proveniente dal Nord Africa che si inserisce nel contesto del riscaldamento globale. La perdita di massa glaciale si registra già negli ultimi cento anni, ma a preoccupare gli scienziati è il 70% di perdita avvenuta negli ultimi trent'anni: un'accelerazione che porta a concludere che il ghiaccio delle Alpi è destinato a consumarsi presto.» Da <https://www.cnr.it/it/speciale-crollo-ghiacciaio-marmolada>

- la necessità di preservare il nostro pianeta dall'aumento delle temperature, dall'inquinamento e da catastrofi ambientali future per noi e soprattutto per i nostri figli e nipoti;
- l'aumento fuori controllo del costo dell'energia iniziato con la ripresa post-Covid ed esploso con la guerra tra Russia e Ucraina, che ha visto l'interruzione quasi totale delle forniture di gas naturale attraverso i gasdotti che lo trasportano dalla Russia all'Europa e l'uso delle materie prime energetiche come arma geopolitica;
- la necessità di emancipazione dalle forniture di idrocarburi da paesi esteri per non essere soggetti a ricatti su scala internazionale;
- la necessità di abbattere i costi energetici per le imprese per essere competitivi sui mercati internazionali, dove ci si confronta anche con stati che fanno particolare affidamento sull'energia a basso costo e inquinante prodotta col carbone;
- la necessità sociale di fornire energia a costi accettabili a tutte le famiglie a basso reddito che non possono permettersi di pagare bollette elevate;
- costi assicurativi in crescita a causa dell'aumento della frequenza e dell'intensità di eventi meteo estremi [1][2] e, in alcuni casi l'impossibilità di assicurare i beni a causa del rifiuto da parte delle assicurazioni per gli eccessivi rischi di perdita.

Per questi e per altri motivi, è necessario investire prima di tutto sulla riduzione dei consumi energetici in tutti i settori e sulla produzione di energia da fonti rinnovabili. Preme sottolineare infatti che quanto più bassi sono i consumi finali di energia, tanto minore dovrà essere la produzione della stessa. Ovviamente cercando un optimum economico, un punto di minimo dei costi tale da avere il miglior equilibrio tra efficienza energetica e produzione da fonti rinnovabili.

L'Unione Europea e l'ONU sostengono in modo deciso l'adozione di misure per la riduzione dell'impatto ambientale delle attività umane e dei consumi energetici con politiche mirate come tra cui:

- il Green Deal europeo proposto per la prima volta l'11 dicembre 2019;
- il Next Generation EU, varato il 14 dicembre 2020 per favorire la ripresa post-Covid-19, in cui molte risorse sono destinate a politiche ambientali ed energetiche;
- il pacchetto Fit for 55, presentato il 14 luglio 2021, che prevede di ridurre entro il 2030 le emissioni europee del 55% rispetto a quelle del 1990;
- il Repower EU, proposto il 18 maggio 2022 per favorire l'indipendenza energetica anzitutto dalla Russia attraverso la riduzione dei consumi, la diffusione accelerata della produzione rinnovabile e una diversificazione degli approvvigionamenti energetici;
- gli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDG, Sustainable Development Goals) presentati dall'ONU il 25 settembre 2015, alcuni dei quali specificamente dedicati agli aspetti del clima e dell'energia.

Queste direttive e questi obiettivi, insieme a molti altri, condividono lo scopo di limitare il riscaldamento del clima al massimo a +1,5°C rispetto al periodo pre-industriale, secondo quanto indicato nell'accordo di Parigi firmato durante la COP 21 del 2015.

Il settore dell'energia è quello più impattante sul riscaldamento del clima a causa delle emissioni di gas climalteranti, CO₂ in primis, ma anche di altri gas ad effetto serra. I principali consumi di energia provengono dai settori della produzione industriale, della climatizzazione degli edifici e dei trasporti, oltre ad altri con un peso minore.

1.1.1 Andamento storico delle concentrazioni di gas serra in atmosfera, origine ed effetti

La concentrazione di anidride carbonica nel corso della storia è variata in modo considerevole, come si può osservare dal grafico della Figura 1 realizzato dal NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration degli Stati Uniti). Si osserva che fino al periodo pre-industriale, l'anidride carbonica nell'aria ha avuto concentrazioni comprese tra circa le 170 ppm (parti per milione) e le 300 ppm. Ricostruire le concentrazioni di CO₂ per periodi così antichi è stato possibile all'analisi delle bolle d'aria intrappolate nei ghiacci polari principalmente al polo sud.

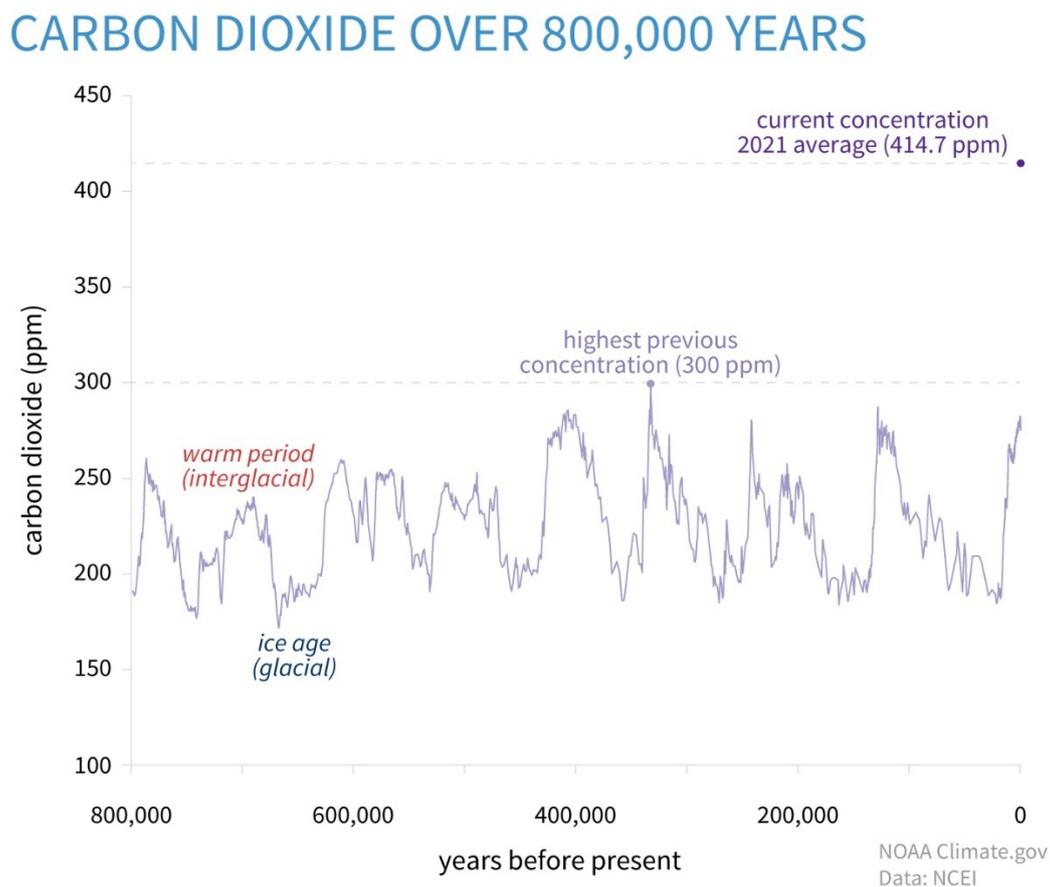


Figura 1: Andamento storico delle emissioni negli ultimi 800000 anni (Fonte: NOAA).

A partire dalla Rivoluzione Industriale, la concentrazione è iniziata a crescere da un valore di circa 270 - 280 ppm fino al record registrato nel 2022 di oltre 420 ppm a Mauna Loa, alle Hawaii, in un osservatorio del NOAA. L'andamento è visibile in Figura 2, che mostra le variazioni negli ultimi

2000 anni. La CO₂ è il principale prodotto della combustione di sostanze contenenti carbonio, necessaria per la produzione “tradizionale” di energia termica ed elettrica per le attività umane, fondamentalmente dei combustibili fossili originatisi dalla decomposizione anaerobica in particolari condizioni, di organismi animali e vegetali. Questi ultimi, infatti, nella loro vita hanno sottratto anidride carbonica dall’atmosfera attraverso la fotosintesi e ora, a distanza di centinaia di migliaia o milioni di anni, viene nuovamente liberata.

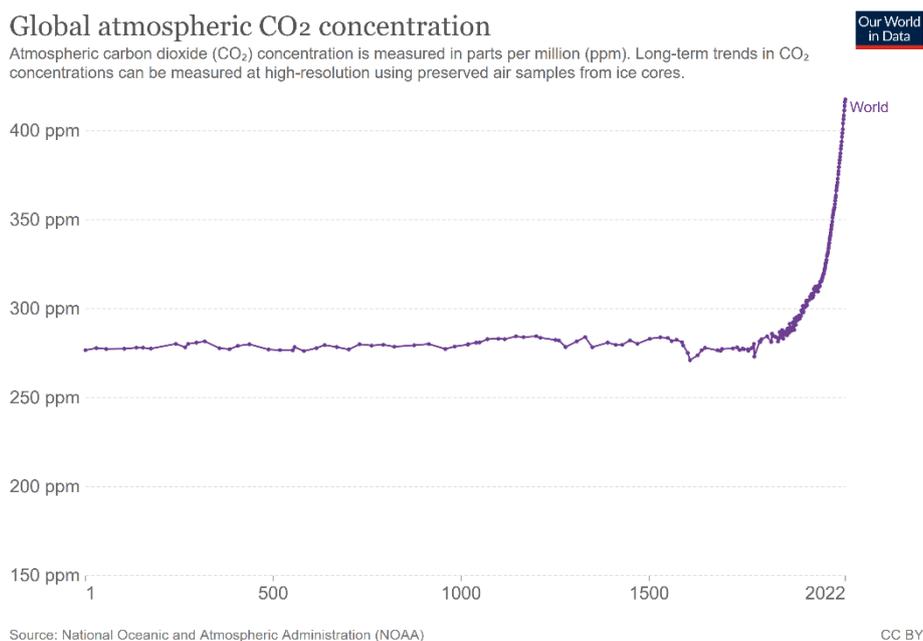


Figura 2: Andamento della concentrazione atmosferica di CO₂ negli ultimi 2000 anni (Fonte: Our World in Data, NOAA).

Sono inoltre cresciute considerevolmente le emissioni di altri gas climalteranti quali il gas metano, CH₄, e l’ossido di diazoto o protossido di azoto, N₂O, che presentano un potenziale di effetto serra molto maggiore rispetto alla CO₂ (vedi Tabella 1), ma che sono presenti in concentrazioni molto inferiori.

Il metano è emesso principalmente durante le attività estrattive degli idrocarburi attraverso fuoriuscite dai pozzi, attraverso il terreno nelle discusse attività di “fracking” e dalle perdite degli impianti di trasporto del gas e di lavorazione degli idrocarburi. È emesso anche in quantità considerevoli dall’allevamento bovino, essendo prodotto durante la digestione degli animali, e, in misura un po’ minore, dalla fermentazione dei rifiuti nelle discariche. Le sue emissioni, come si vede nella Figura 3, ha visto le emissioni crescere in modo simile alla CO₂.

L’IPCC, il gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici nato in seno all’ONU, stima che circa la metà del riscaldamento climatico cumulato dal 1850 ad oggi sia dovuto alle emissioni di metano. Finalmente, durante i lavori della COP27 di Sharm el-Sheikh, molti stati hanno annunciato le azioni che intraprenderanno per ridurre le emissioni di metano collegate alle attività con i combustibili fossili [11]. Al momento si impegneranno nella riduzione delle emissioni Unione Europea, USA, Regno

Unito, Canada, Norvegia, Giappone, Nigeria e Singapore. Anche la Cina, che non aderisce al *Global Methane Pledge*, ha in programma una strategia per ridurre le proprie emissioni.

Specie chimica	Formula chimica	GWP (100 anni)
Biossido di carbonio	CO ₂	1
Metano	CH ₄	25
Protossido di azoto	N ₂ O	298

Tabella 1: potenziale effetto serra di alcuni gas (Fonte: IPCC).

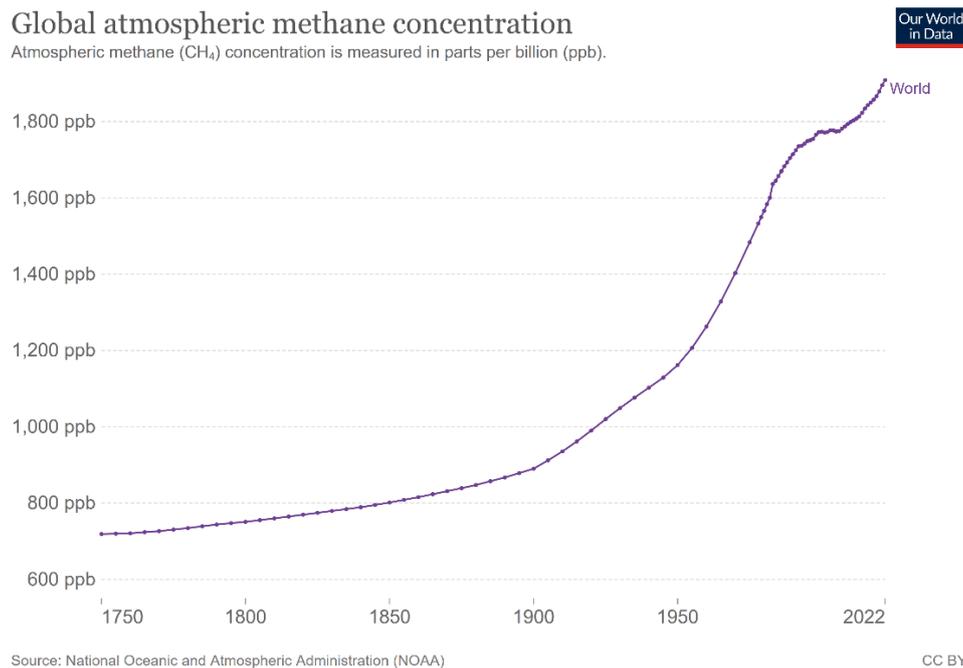


Figura 3: andamento della concentrazione atmosferica di metano dal 1750 (Fonte: Our World In Data, NOAA).

Gli ossidi di azoto, in generale NO_x, sono un prodotto della combustione in aria ad alte temperature: durante la reazione di combustione si ha dissociazione delle molecole tra cui l'azoto. L'azoto, inerte, non prende parte alla combustione, ma, in presenza di alte temperature si dissocia in azoto atomico, molto reattivo e, in presenza di ossigeno, può ossidarsi. Il rapido raffreddamento che segue "congela" la reazione nello stato che si ha ad alta temperatura impedendo la riassociazione dell'azoto in azoto molecolare. Per questo motivo nei fumi restano degli NO_x, tra cui il principale è l'NO₂, biossido di azoto. L'NO₂, tra i vari NO_x, è il più importante dal punto di vista tossicologico per l'elevato potere ossidante che esercita sulle mucose irritando le vie respiratorie. Inoltre è precursore di altri inquinanti secondari e favorisce lo smog fotochimico, da cui dipende la formazione di ozono negli strati più bassi dell'atmosfera. A contatto con l'acqua forma acido nitroso, HNO₂, e nitrico, HNO₃, portando alla formazione di piogge acide.

L' N_2O , protossido di azoto, invece, è un potente gas serra, il terzo per importanza dopo CO_2 e CH_4 , e “contribuisce per il 7% al riscaldamento globale causato dall'uomo” [14]. Ad oggi il 43% delle sue emissioni è di origine antropogenica e la principale fonte non naturale sono i fertilizzanti azotati usati in agricoltura il cui uso si prevede in aumento.

La sua concentrazione è passata da 270 ppb (parti per miliardo) nel 1750 a 331 ppb nel 2018, come visibile nella Figura 4.

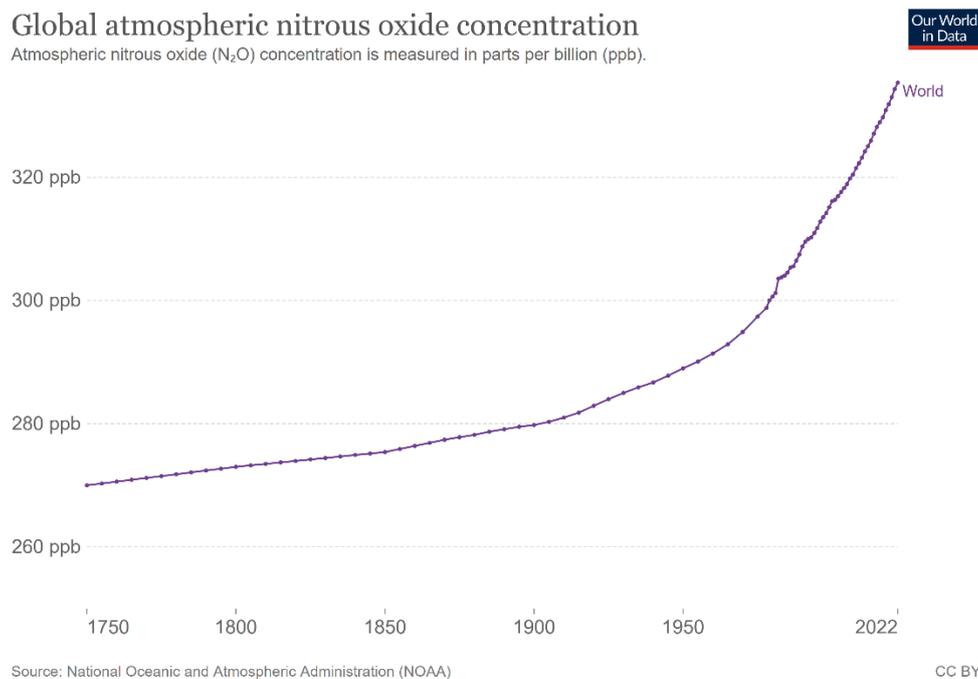


Figura 4: andamento della concentrazione atmosferica di N_2O dal 1750 (Fonte: Our World In Data, NOAA).

I valori riportati nella Tabella 1 sono stati calcolati dell'IPCC e pubblicati nel quarto rapporto di valutazione. Il potenziale effetto serra, GWP (dall'inglese *Global Warming Potential*) è valutato su un periodo di 100 anni.

1.1.2 Situazione presente delle emissioni di gas serra

Nel paragrafo precedente, si è visto come nel corso della storia sono variate le concentrazioni dei principali gas ad effetto serra in atmosfera e quali sono le principali fonti. A partire dalla metà dell'800 le attività umane hanno fatto aumentare le concentrazioni in atmosfera hanno fatto aumentare le emissioni di origine antropica.

Con lo sviluppo industriale e la produzione di energia nelle varie forme, le emissioni di anidride carbonica sono aumentate in modo circa esponenziale: nel secondo grafico della Figura 5, che riporta gli stessi dati del grafico sulla sinistra, ma con l'asse delle ordinate logaritmico, si osserva che nella zona centrale si ha praticamente una retta. Fortunatamente, negli ultimi decenni, si vede una riduzione

della pendenza che indica che il tasso di aumento annuo delle emissioni è in diminuzione. Questa riduzione dell'aumento comunque, non risulta sufficiente a limitare gli effetti nefasti del cambiamento climatico: è necessario ridurre di anno in anno le emissioni totali fino ad avere pendenze negative

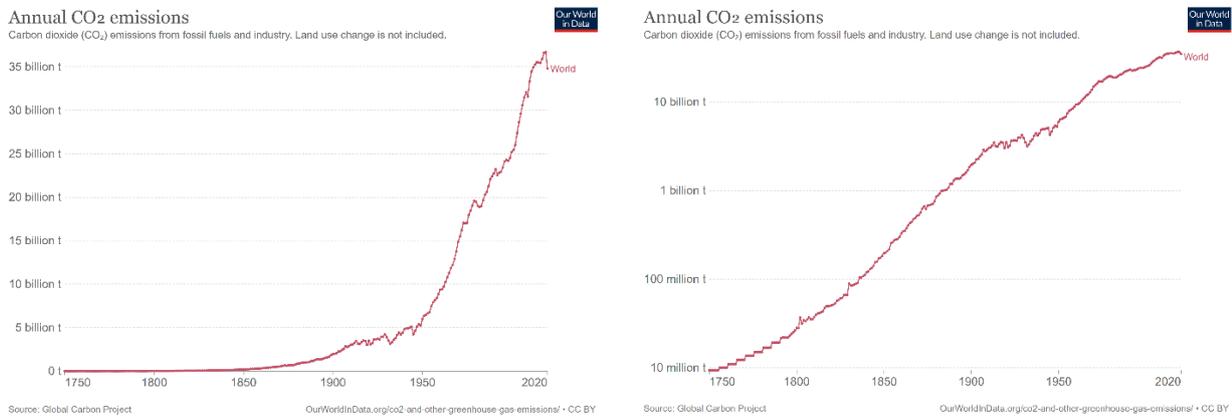


Figura 5: andamento delle emissioni di CO₂, a sinistra con l'asse lineare, a destra logaritmico (Fonte: Our World In Data, NOAA).

Osservando nel dettaglio i grafici delle emissioni di CO₂, si riscontra anche un andamento ondulato che si somma all'andamento generale e crescente: questo è dovuto alla stagionalità dell'assorbimento dell'anidride carbonica da parte delle foreste che, come le terre emerse sono distribuite principalmente nell'emisfero boreale, così anch'esse. Durante l'inverno boreale le foreste non assorbono anidride carbonica per cui la concentrazione cresce raggiungendo un massimo verso la tarda primavera. In estate l'assorbimento è massimo cosicché in autunno si raggiunge il minimo annuale. Questa periodicità è chiara nel grafico della Figura 6 che mostra un solo anno di rilevamenti, dall'autunno 2021 all'autunno 2022 e dove si vede il record registrato nel maggio 2022.

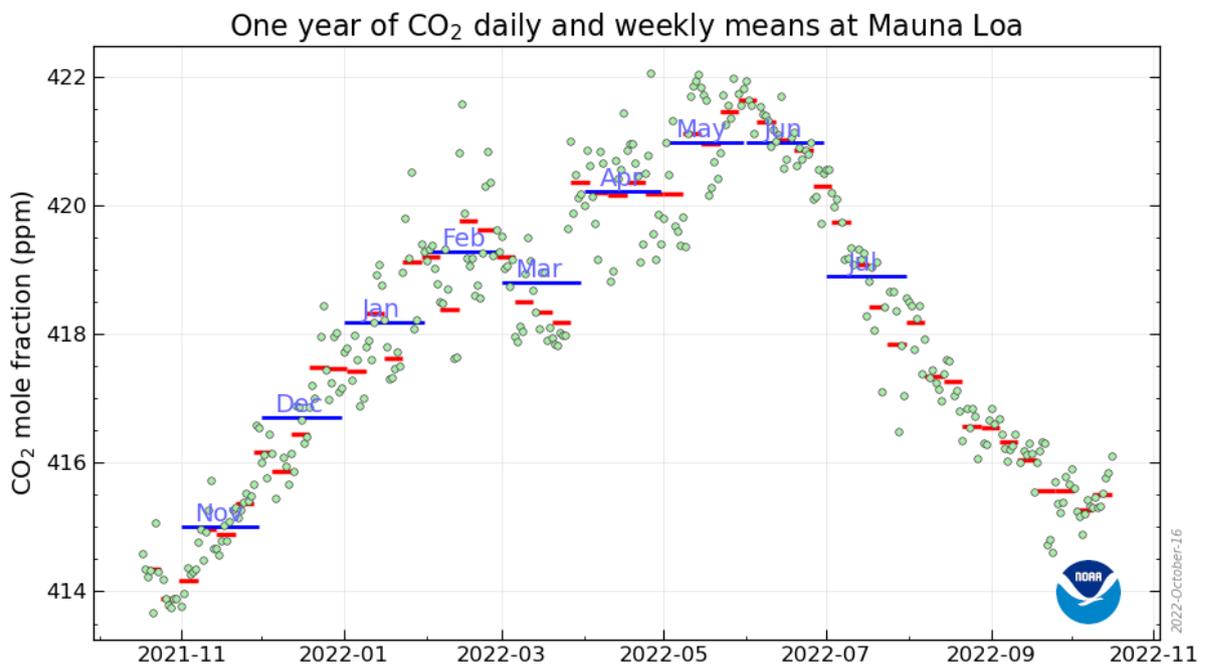
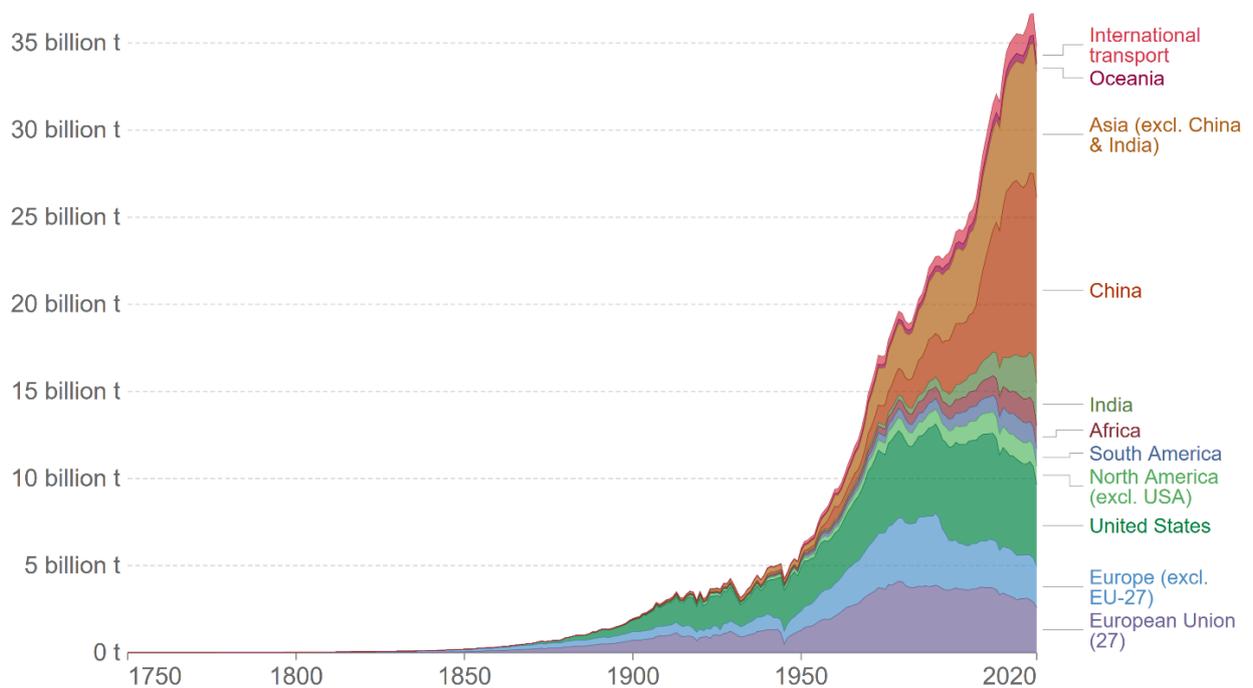


Figura 6: andamento della concentrazione atmosferica di CO₂ nell'ultimo anno, dall'autunno 2021 all'autunno 2022 (Fonte: NOAA).

Annual CO₂ emissions from fossil fuels, by world region

Our World
in Data



Source: Global Carbon Project

OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY

Note: This measures CO₂ emissions from fossil fuels and cement production only – land use change is not included. 'Statistical differences' (included in the GCP dataset) are not included here.

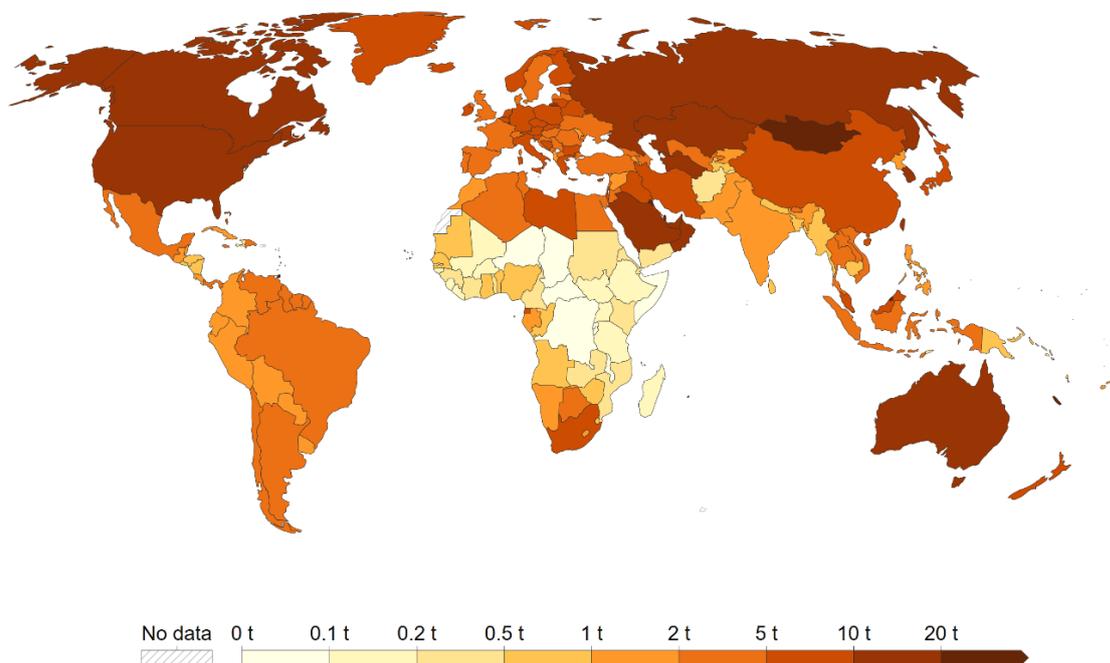
Figura 7: emissioni annuali di CO₂ per stato/macro regione dal 1750 (Fonte: Our World In Data, Global Carbon Project).

Si noti anche come non tutte le regioni del mondo abbiano inquinato nello stesso modo nel corso della storia: i paesi oggi più sviluppati mostrano elevate emissioni tra il 1850 e la fine del '900 o l'inizio degli anni 2000 ed ora stanno gradualmente riducendo le emissioni prodotte dentro i propri confini; i paesi in via di sviluppo stanno incrementando le loro emissioni (Figura 7).

Calcolando le emissioni pro-capite (Figura 8) si vede che degli stati considerati oggi tra i peggiori inquinanti del pianeta come Cina e India in realtà non lo sono così tanto: ogni singolo cittadino cinese o indiano inquina come un europeo o meno e molto meno dei cittadini mongoli, statunitensi, canadesi o australiani.

Per capita CO₂ emissions, 2020

Carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels and industry. Land use change is not included.



Source: Our World in Data based on the Global Carbon Project

OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions/ • CC BY

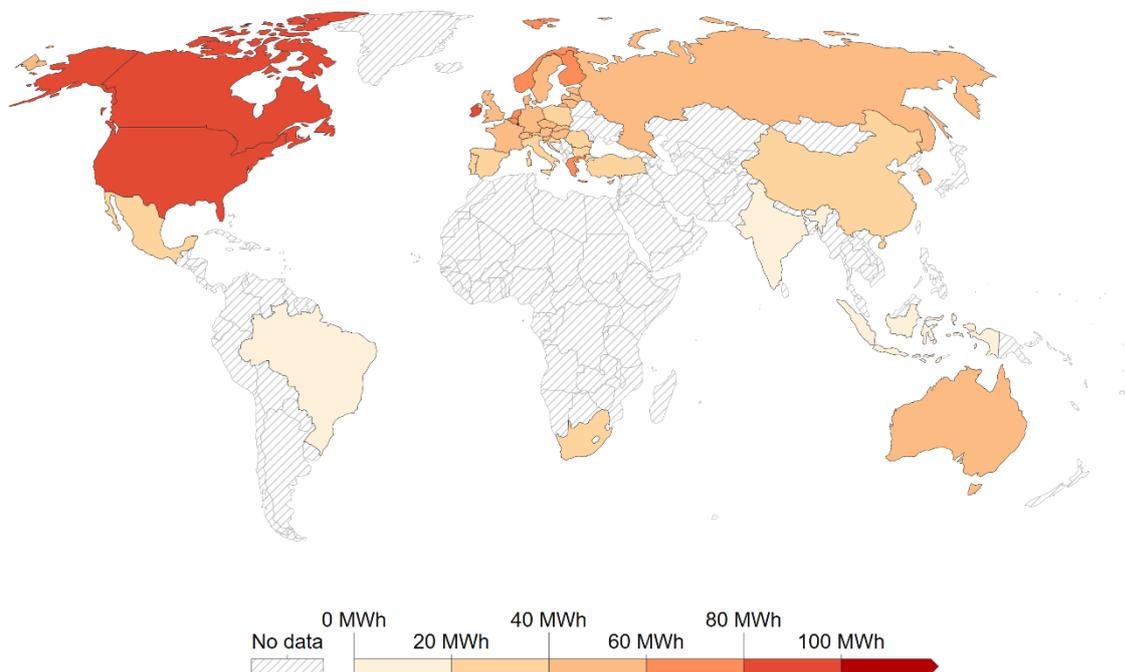
Figura 8: emissioni pro-capite di CO₂ nel 2020 (Fonte: Our World In Data, Global Carbon Project).

Da ultimo, si riporta una visualizzazione grafica con il consumo di energia (fortemente correlato con le emissioni di CO₂) pro-capite e corretto sulla base degli scambi commerciali, ossia imputando i consumi dei beni scambiati non alla nazione in cui sono stati prodotti, ma a quella in cui sono stati consumati: il quadro cambia radicalmente.

Dalla Figura 9 è palese che alcuni grandi inquinanti non consumano tutta l'energia che ci si aspetterebbe: non consumano per sé, ma per gli altri. Questo avviene perché i beni prodotti nei propri confini vengono esportati e consumati altrove. Esempi eclatanti sono la Cina e la Russia. Per gli stati tratteggiati in grigio non ci sono dati.

Consumption-based (trade-adjusted) energy use per person, 2020

Consumption-based (trade-adjusted) energy use measures domestic energy use minus energy used to produce exported goods, plus energy used to produce imported goods.



Source: Calculated by Viktoras Kulionis, based on the EXIOBASE v3.8.2 database

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Figura 9: consumo di energia pro-capite calcolato considerando gli scambi commerciali tra stati (Fonte: Our World In Data, dati EXIOBASE elaborati da Viktoras Kulionis).

In tempi più recenti è emerso un nuovo problema relativo alla dispersione in atmosfera dei gas fluorurati, gas artificiali contenenti fluoro dall'elevatissimo potere climalterante che non ha pari in natura. Si tratta delle sostanze utilizzate nelle macchine frigorifere che permettono la realizzazione di un ciclo termodinamico. Queste sostanze, che permettono di realizzare macchine efficienti non creano alcun problema finché contenute nel circuito frigorifero. Il problema nasce in fase di dismissione delle macchine quando i gas spesso non vengono aspirati dal circuito ma liberati in ambiente. Solo da qualche anno si è iniziato a prevedere la corretta rimozione dei gas refrigeranti anche dai grandi impianti di climatizzazione, oltre che dai frigoriferi domestici, pratica che tuttavia è svolta ancora da pochi operatori.

Le figure Figura 10 e Figura 11 sono tratte dal sommario del sesto rapporto di valutazione del terzo gruppo di lavoro dell'IPPC e mostrano le emissioni di tutti i gas serra per il periodo dal 1990 al 2019. Si nota come l'anidride carbonica faccia la parte del leone, tuttavia anche gli altri gas hanno un peso non trascurabile. Da notare la comparsa e l'aumento di questa nuova categoria di gas serra finora sostanzialmente ignorata.

A questa categoria appartengono:

- i CFC, clorofluorocarburi, eliminati gradualmente dopo la firma del protocollo di Montréal nel 1987 per il potenziale di distruzione dell'ozono (ODP, *ozone depletion potential*)

nell'ozonofera e il buco dell'ozono che hanno prodotto e che presentano anche un elevatissimo potenziale effetto serra (GWP);

- gli HCFC, idroclorofluorocarburi, introdotti come temporanei sostituti dei CFC, anch'essi con elevato o elevatissimo GWP, ma con basso o nullo ODP;
- gli HFC, idrofluorocarburi, introdotti in sostituzione dei precedenti e che presentano anch'essi elevato o elevatissimo GWP.

La legislazione attuale, in particolare quella europea, sta gradualmente limitando il loro utilizzo in favore di altri fluidi meno impattanti per l'ambiente e favorendo lo sviluppo di nuove macchine che, a prescindere dal fluido impiegato, ne contengano una quantità inferiore.

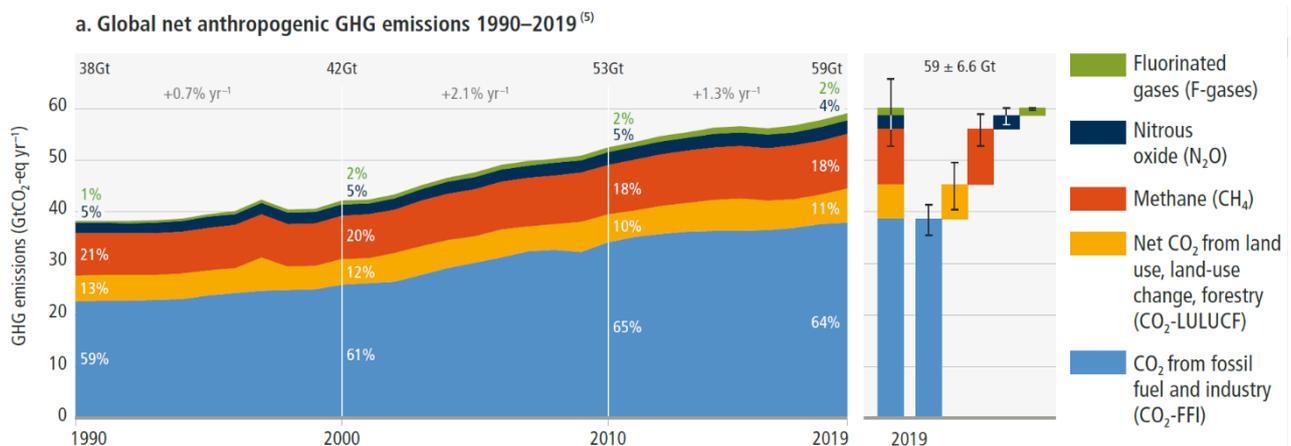


Figura 10: emissioni di gas fluorurati dal 1990 al 2019 (Fonte IPCC, executive summary del Sixth Assessment Report).

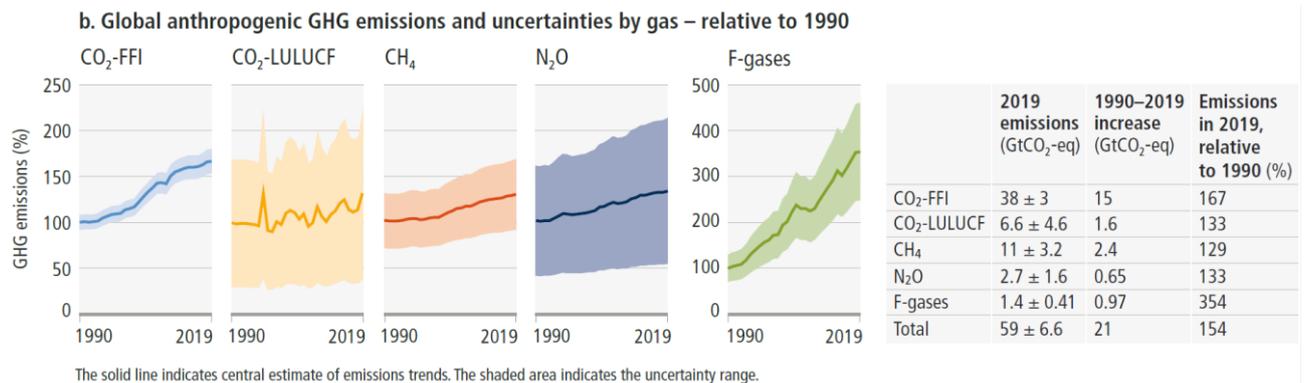


Figura 11: andamento delle emissioni di gas ad effetto serra in rapporto ai valori del 1990 (Fonte IPCC, executive summary del Sixth Assessment Report).

1.2 La domanda di energia e il risparmio energetico

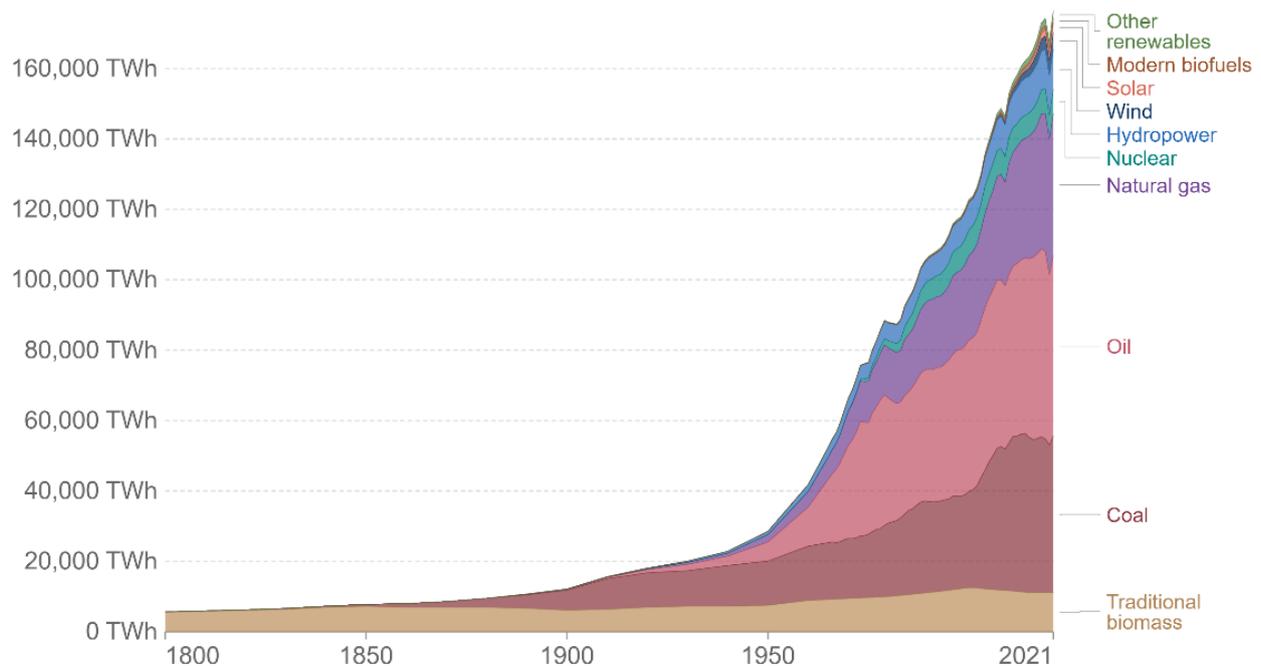
1.2.1 Il consumo energetico nel mondo

Il consumo di energia da parte dell'uomo ha visto un'impetuosa crescita a partire dall'800, secolo della rivoluzione industriale. Come si può osservare dai grafici in Figura 12, che mostra l'andamento del consumo totale di energia primaria suddiviso per fonte, e in Figura 13, che riporta la variazione anno su anno del consumo di energia primaria a partire dal 1966, il consumo ha visto una crescita che non si è mai arrestata se non tra il 1979 e il 1982 a seguito della seconda crisi petrolifera, nel 2009 a seguito della recessione mondiale iniziata nel 2008 e nel 2020 in seguito alle chiusure dovute al Covid-19, quando la riduzione dei consumi è stata del 4%.

Global primary energy consumption by source

Primary energy is calculated based on the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies in fossil fuel production by converting non-fossil energy into the energy inputs required if they had the same conversion losses as fossil fuels.

Our World
in Data



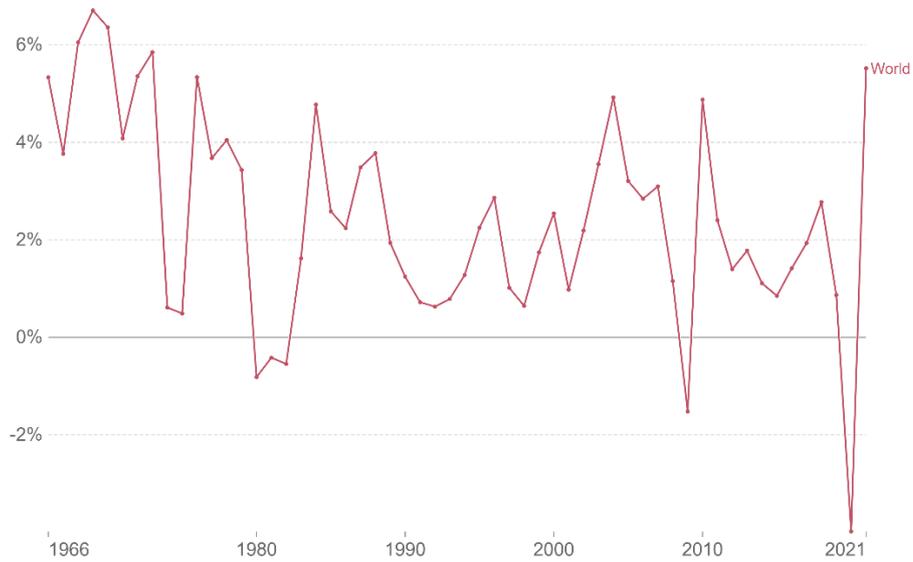
Source: Our World in Data based on Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Figura 12: andamento del consumo di energia a partire dal 1800 (fonte: Our World In Data su dati BP).

Annual change in primary energy consumption

Our World
in Data



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & World Bank

OurWorldInData.org/energy • CC BY

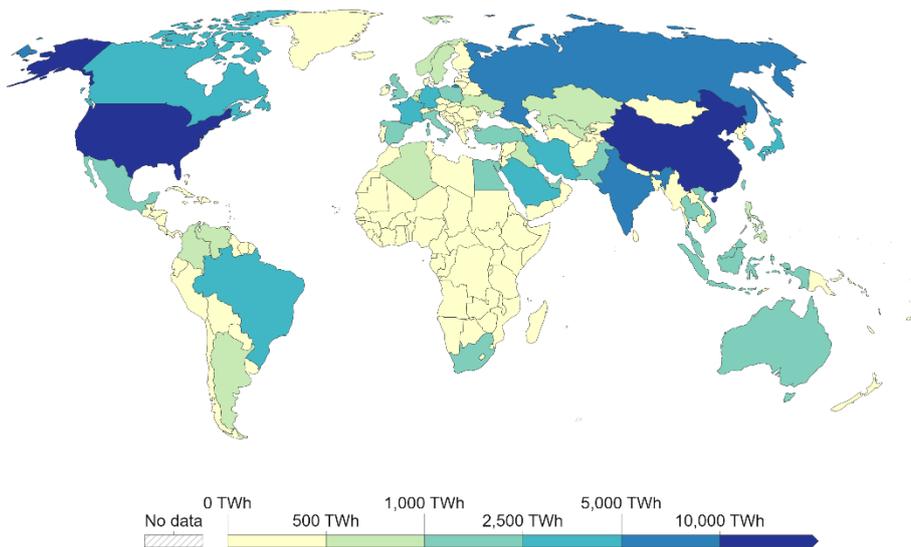
Figura 13: variazione annuale del consumo di energia dal 1966 (fonte: Our World In Data su dati BP).

Nella Figura 14 si osserva che il primo consumatore di energia del pianeta in termini assoluti è la Cina, seguita da Stati Uniti, India, Russia Canada e Brasile. Tuttavia, suddividendo il consumo per la popolazione (Figura 15), si nota subito come i rapporti cambiano radicalmente e alcuni piccoli stati

Primary energy consumption, 2021

Primary energy¹ consumption is measured in terawatt-hours (TWh).

Our World
in Data



Source: BP Statistical Review of World Energy; and EIA

OurWorldInData.org/energy • CC BY

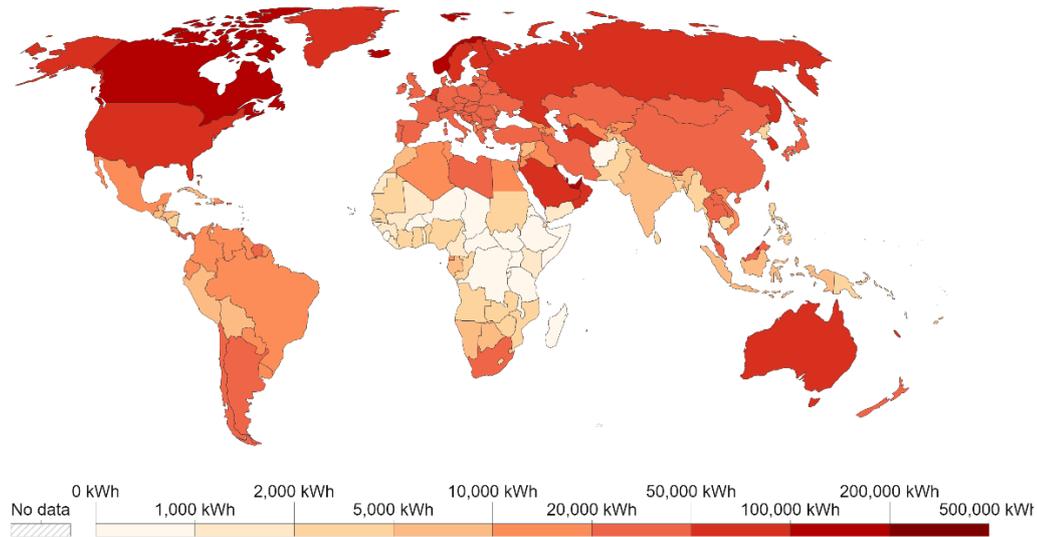
Note: Data includes only commercially-traded fuels (coal, oil, gas), nuclear and modern renewables. It does not include traditional biomass.

1. Primary energy: Primary energy is the energy as it is available as resources – such as the fuels that are burnt in power plants – before it has been transformed. This relates to the coal before it has been burned, the uranium, or the barrels of oil. Primary energy includes energy that is needed by the end user, plus inefficiencies and energy that is lost when raw resources are transformed into a useable form. You can read more on the different ways of measuring energy [in our article](#).

Figura 14: consumo di energia primaria per stato nel 2021 (fonte: Our World In Data).

Energy use per person, 2021

Energy use not only includes electricity, but also other areas of consumption including transport, heating and cooking.



Source: Our World in Data based on BP & Shift Data Portal

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Note: Energy refers to primary energy – the energy input before the transformation to forms of energy for end-use (such as electricity or petrol for transport).

Figura 15: consumo di energia pro-capite nel 2021 (fonte: Our World In Data).

arabi, Singapore, l'Islanda e altri sono in testa alla classifica. I primi "grandi stati" che compaiono sono Norvegia e Canada, in decima e undicesima posizione, e gli Stati Uniti in diciottesima. La Cina risulta addirittura in sessantacinquesima posizione. Ecco quindi che considerare il consumo di energia pro-capite è sicuramente una metrica migliore per le valutazioni.

Se si calcolasse il consumo di energia pro-capite corretto sulla base degli scambi commerciali, ossia imputando i consumi relativi ai beni scambiati non alla nazione in cui sono stati prodotti, ma a quella in cui sono stati consumati, la situazione cambierebbe come si è visto in Figura 9.

Per far fronte alle sfide ambientali ed energetiche presenti e future il risparmio energetico è un aspetto di cruciale importanza. Ridurre drasticamente la domanda di energia per gli usi finali permette di ridurre le emissioni climalteranti in modo immediato e di aumentare al contempo la quota di energia rinnovabile nel mix energetico senza incrementare la produzione da fonti rinnovabili poiché si riduce la quota di energia prodotta da fonti fossili. Inoltre, data la limitata intensità energetica delle fonti di energia rinnovabile, minore è il consumo, minori sono le superfici e gli impianti da destinare alla produzione rinnovabile così pure si riducono le dimensioni degli impianti di accumulo per soddisfare la domanda nei momenti di produzione bassa o nulla. Questo secondo elemento assume una importanza non trascurabile, dato l'alto costo di questi sistemi e la loro scarsa sostenibilità ambientale legata all'estrazione delle materie prime per la produzione delle celle delle batterie.

1.2.2 Il consumo energetico degli edifici

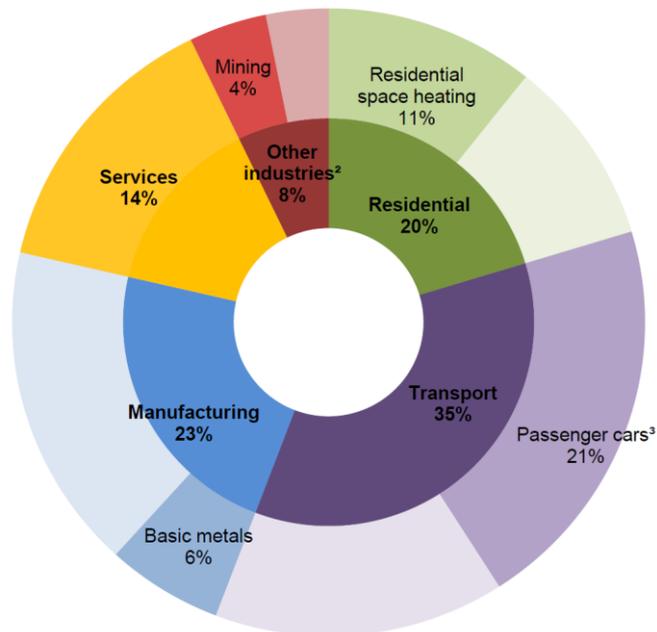


Figura 16: suddivisione dei consumi finali per settore (fonte: IEA).

Si calcola che gli edifici sono responsabili del 41,7% del consumo energetico [3][4] dove viene usata principalmente per la climatizzazione e per l'illuminazione. Nell'Unione Europea il solo settore abitativo conta per il 28%, secondo le statistiche di Eurostat, e quello dei servizi, come ad esempio le scuole, le amministrazioni e il terziario in genere conta per il 13,7%.

Per questo motivo hanno un ruolo fondamentale nella strategia di decarbonizzazione e molte leggi e norme nazionali e internazionali richiedono il raggiungimento di livelli minimi di efficienza e di copertura dei consumi da parte di produzione rinnovabile in loco per gli edifici di nuova costruzione e nei casi di grandi ristrutturazioni. Inoltre, per migliorare l'efficienza energetica, ad esempio in Italia, da anni sono presenti contributi economici statali specifici.

Il parco edilizio italiano, stando all'elaborazione svolta dal Corriere della Sera e pubblicata in un articolo del 9/12/2021 [5] e riportata nella Tabella 2 è per l'87,9% nelle classi energetiche D e inferiori e la classe energetica G, la più bassa, da sola conta per il 35,7% del totale degli edifici.

Edifici residenziali in Italia per classe energetica e stima del numero degli alloggi (stima sulla base delle certificazioni degli ultimi cinque anni)

Classe	Percentuale	Edifici	Alloggi
A4	1,1%	137.814	387.920
A3	1,1%	138.103	387.920
A2	1,4%	176.377	493.716
A1	1,8%	225.671	634.778
B	2,3%	287.994	811.105
C	4,2%	522.901	1.481.148
D	10,2%	1.269.155	3.597.074
E	16,9%	2.118.057	5.959.858
F	25,3%	3.157.942	8.922.155
G	35,7%	4.464.582	12.589.760

Elaborazione su dati Istat Enea Agenzia entrate

Tabella 2: classificazione energetica del parco edifici in Italia.

È chiaro che è necessario intervenire per migliorare l'efficienza della stragrande maggioranza degli edifici non solo per questioni ambientali, ma anche per una questione di costi in particolare per le persone e le famiglie economicamente più svantaggiate. Sempre più frequentemente si verificano situazioni di cosiddetta povertà energetica, ossia che le persone che abitano in un edificio non sono in grado di pagare le bollette energetiche. Questo vede tra le cause l'elevata spesa per l'energia dovuta sia ai rincari, sia alle scarsissime prestazioni termiche degli edifici in cui queste persone abitano. Intervenire sugli edifici di classe inferiore ha anche dei risvolti sociali. Inoltre si intuisce il grande potenziale di risparmio energetico correlato.

Secondo l'IRENA (International Renewable Energy Agency) e l'Unione Europea, in Europa il consumo per riscaldamento è previsto in diminuzione del 30% e quello per la climatizzazione in crescita del 72% entro il 2030 [6][7].

Nella Figura 17 si osserva l'andamento del consumo mondiale di energia per riscaldamento e raffreddamento dal 1970 e la sua proiezione fino al 2100 secondo una previsione del 2009.

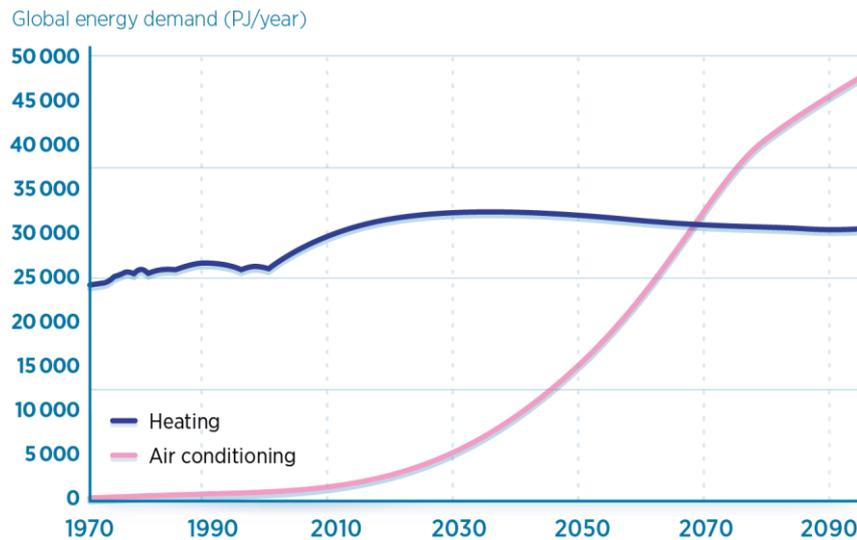


Figura 17: proiezione della domanda di energia per riscaldamento e raffrescamento dal 1970 al 2100 (tratta da [12]).

Gli impianti di riscaldamento, presenti nella maggior parte degli edifici, cresceranno di numero col progressivo aumento degli edifici, ma, grazie all'aumento di efficienza, il consumo è previsto in aumento fino al 2030 cui seguiranno una stabilizzazione e un leggero decremento. La crescita impetuosa del consumo per la climatizzazione estiva, invece, si deve al fatto che gli impianti aumenteranno molto di più rispetto al numero di edifici perché ad oggi la maggior parte di quelli esistenti non presenta alcun impianto installato con l'aggravio del cambiamento climatico. In aggiunta a ciò, il riscaldamento climatico comporterà un aumento dei consumi per raffrescamento correlati che nel complesso sopravvanzeranno quelli per il riscaldamento. È chiaro che bisogna sviluppare nuove soluzioni per ridurre i consumi che, dalle previsioni, sembrano destinati a crescere.

Con l'obiettivo di ridurre le emissioni e l'inquinamento, si possono intraprendere due strade:

- la prima è quella di produrre più energia da fonti rinnovabili, che comporta investimenti di solito molto onerosi;
- la seconda è quella di migliorare l'uso che si fa dell'energia disponibile attraverso l'ottimizzazione della sua distribuzione e degli usi finali.

Queste strade, ovviamente, vanno percorse insieme: dal momento che la produzione di energia da fonti fossili va completamente eliminata, per quanto si possa ridurre il consumo finale, una parte dalla produzione va sostituita con nuove fonti.

Negli edifici, per tagliare i consumi possono realizzare interventi diversi, dai più semplici e meno invasivi ai più complessi e costosi tra cui:

- adozione di misure comportamentali, come spegnere luci e apparecchi vari quando non necessari, regolare opportunamente i termostati della climatizzazione se il controllo è manuale e a discrezione dell'utente (interventi semplici e a costo zero);
- sostituzione di apparecchi illuminanti obsoleti e scarsamente efficienti (interventi poco costosi e semplici);

- interventi sull'involucro degli edifici per limitare le dispersioni termiche e i guadagni solari (interventi costosi e invasivi);
- interventi sugli impianti di climatizzazione (HVAC) con la sostituzione parziale o totale dell'impianto (interventi costosi e invasivi)
- interventi sui sistemi di controllo degli impianti HVAC e dell'illuminazione per migliorarne la gestione e l'automazione (interventi poco invasivi).

1.3 La Data Science nell'ambito energetico

La Scienza dei dati, o *Data Science*, è quella disciplina che studia i dati e cerca di renderli utili estraendone informazioni per capire ed analizzare fenomeni e fare previsioni. È un approccio multidisciplinare che sfrutta conoscenze matematiche, statistiche, informatiche e di intelligenza artificiale.

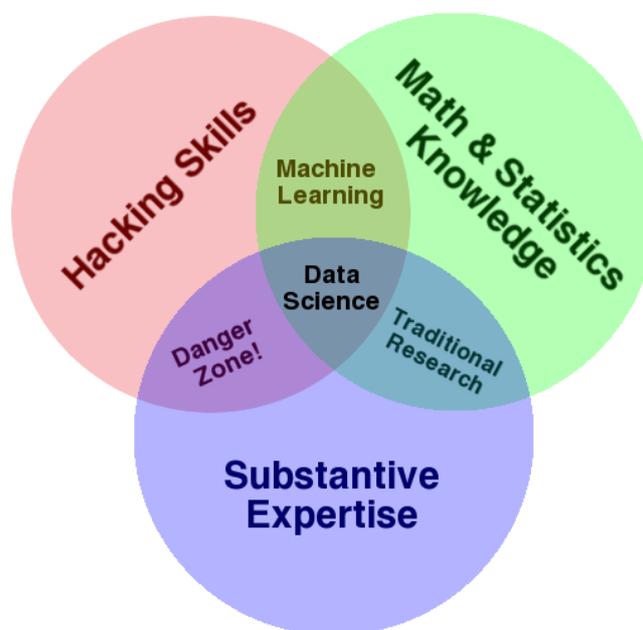


Figura 18: diagramma di Venn per definire la data science proposto da Drew Conway [8].

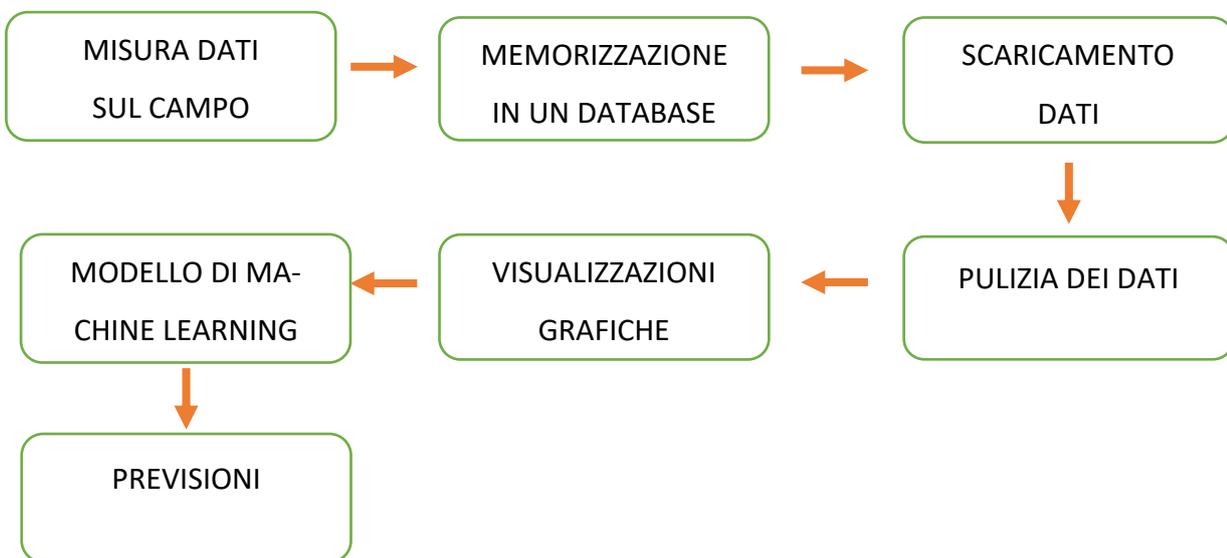
Secondo l'interpretazione fornita da Drew Conway della scienza dei dati e rappresentata nel diagramma di Venn in Figura 18 [8], alla base della *data science* ci sono capacità di programmazione per raccogliere ed elaborare i dati, conoscenze matematiche e statistiche per estrarre informazioni utili dai dati, e solide competenze applicative che permettono di capire il problema, porsi domande e fare ipotesi che poi devono essere verificate. La zona di pericolo riportata è quella indica che, in mancanza di conoscenze che permettono di interpretare correttamente i risultati ottenuti (un esempio potrebbe essere la conoscenza del significato dello scarto quadratico medio), le sole capacità di programmazione, di porsi domande e fare ipotesi possono condurre ad analisi e conclusioni errate, senza alcun significato pur sembrando perfettamente legittime.

Oggi giorno, produciamo dati praticamente durante qualsiasi nostra azione quotidiana, inviando messaggi con lo smartphone, navigando in internet, viaggiando con qualunque mezzo di trasporto,

facendo sport o acquisti... E moltissime cose intorno a noi producono dati: sensori ambientali, semafori intelligenti, telecamere di videosorveglianza e molto altro. Tutti questi dispositivi sono in costante crescita e chi possiede e sa analizzare i dati che forniscono ha un vantaggio affatto trascurabile rispetto a chi non dispone dei dati o non li sa analizzare.

Nello svolgimento della tesi un'ampia parte è stata dedicata alla raccolta e all'analisi dei dati ambientali ed energetici per analizzare il comportamento dell'edificio oggetto di studio. Con un processo classico della *data science* si sono raccolti i dati, quindi sono stati ripuliti ad esempio da valori mancanti e usati per fare visualizzazioni grafiche e cercare correlazioni; infine con strumenti di machine learning si sono creati dei modelli con cui si sono fatte previsioni.

Il processo seguito può essere schematizzato come segue:



Si nota anche che un approccio cosiddetto *data driven*, ossia guidato dai dati, attraverso il *machine learning* può portare alla scoperta di relazioni inaspettate, andamenti, evoluzioni delle variabili non visibili a prima vista e forse neanche con un'analisi più approfondita perché molto difficile da notare, ma che non passano inosservati ad un'architettura, ad un sistema che fa affidamento su algoritmi di autoapprendimento, non programmabili in maniera esplicita. Si realizzano dei modelli variazionali, delle funzioni complesse i cui parametri sono scelti in modo da ottenere un output quanto più simile a quello desiderato. Questo permette di ottenere risultati che con una programmazione esplicita non si potrebbero ottenere.

La *data science*, inoltre, ha la capacità di analizzare in tempi brevissimi enormi moli di dati che un umano non potrebbe in alcun modo trattare, talvolta anche in tempo reale, fornendo statistiche, informazioni utili a prendere decisioni o talvolta fornendo informazioni ad altri algoritmi qualora siano direttamente essi a prendere decisioni basate su modelli di *machine learning*, *deep learning* o altri strumenti basati su intelligenza artificiale.

La *data science* può venire in aiuto nel campo dell'energia ad esempio dando ai gestori delle reti elettriche la possibilità di prevedere i consumi di energia di una intera nazione sulla base dei consumi

storici, delle previsioni meteo e di altri parametri che li influenzano, di prevedere la produzione da fonti rinnovabili così da programmare per le ore successive la produzione delle centrali termoelettriche e garantire il soddisfacimento dei consumi. Si usa nell'industria per calcolare i consumi delle linee produttive e imputare correttamente il consumo alla produzione così da conoscere l'energia usata per ogni unità di prodotto. Si adatta anche all'analisi del consumo degli edifici per comprendere il profilo di utilizzo, abitudini buone o meno nel comportamento degli utenti, inefficienze negli impianti di climatizzazione e quindi per intraprendere azioni volte al taglio dei consumi o per creare modelli termici.

Nel prosieguo del lavoro l'uso di questi strumenti, imparati ex novo, è stato fondamentale per le analisi.

2 Descrizione della struttura oggetto di studio

Oggetto dello studio è un piano della palazzina dell'Università degli Studi di Bari situata in via Giulio Petroni 15/F al cui interno sono presenti gli uffici del centro ricerche ENEA di Bari.

Di seguito si sintetizzano le caratteristiche geografiche e climatiche del luogo e che saranno poi considerate nel prosieguo della trattazione.

Comune	Bari	
Provincia	Bari	
Altitudine	5	m s.l.m.
Latitudine nord	41.11578	
Longitudine est	16.86793	
Gradi giorno (DPR 412/93)	1185	gg
Zona climatica	C	
Regione di vento	2	
Velocità del vento media	2,70	m/s
Temperatura esterna invernale di progetto	0,0	°C
Temperatura esterna estiva di progetto	39,4	°C

Tabella 3: dati geografici e climatici.

La palazzina è un tipico esempio di edilizia anni '70, situata in una zona centrale di Bari e presenta sette piani fuori terra. Il pian terreno è parzialmente porticato, il tetto è piatto con due sovrastrutture una adibita ad archivio e l'altra inutilizzata.

L'edificio, a pianta rettangolare lungo 55 m e largo 11,5 m, ha una superficie interna di circa 630 mq e un'altezza complessiva di 31,5 m. data la sua altezza, non subisce alcun effetto di schermatura dai venti o ombreggiamento nella parte più alta da parte di altri edifici.



Figura 19: facciata est della palazzina.



Figura 20: vista aerea dell'edificio (Google Maps).

Gli uffici dell'ENEA si trovano al settimo piano della struttura, a contatto con il tetto. Il piano sottostante, allo stato attuale, non è utilizzato e non riscaldato. L'edificio ha le due facciate principali orientate ad est e ad ovest; sulla facciata nord non sono presenti finestre, mentre il lato sud è contiguo con un altro palazzo. La struttura è del tipo a telaio in calcestruzzo armato e le murature esterne sono del tipo a cassa vuota con blocchi di tufo all'esterno e mattoni forati all'interno secondo una configurazione atipica: di solito si preferisce avere infatti più massa, da cui dipende la capacità termica, all'interno per avere benefici principalmente in estate e in generale per smorzare gli sbalzi di temperatura. Non è presente alcun genere di coibentazione.

Le finestre sono del tipo a nastro, con apertura scorrevole, realizzate con telaio in alluminio e vetro singolo, si stima di 3 millimetri di spessore. La conducibilità termica risulta quindi particolarmente elevata e la tenuta all'aria scarsa. Sono presenti le tapparelle, tuttavia la maggior parte di esse risulta bloccata e inutilizzabile: per schermare il sole, i ricercatori hanno adottato varie soluzioni "fai da te" (**Figura 21**).



Figura 21: schermatura solare "creativa".

Il tetto piano, che presenta una struttura con travetti di calcestruzzo armato e pignatte, è stato recentemente impermeabilizzato e rivestito con un materiale ad alta riflessività in modo da ottenere un cosiddetto “tetto freddo”, ossia un tetto che assorbe poca radiazione solare grazie all’alta riflessione mantenendo una più bassa temperatura superficiale. Questa caratteristica è vantaggiosa nel periodo estivo nelle regioni mediterranee dal momento che i maggiori consumi per la climatizzazione sono in estate. In inverno, invece, lo svantaggio prodotto è limitato per via del basso irraggiamento solare. Un maggiore dettaglio sulle strutture e sulle loro stratigrafie sarà dato nel capitolo 5 relativo alla modellazione energetica della struttura.

Nella Figura 22 è riportata la pianta del progetto di ristrutturazione e arredamento degli uffici e nelle tabelle Tabella 4 e Tabella 5 sono indicate le superfici dei vari ambienti e le superfici aggregate in base all’uso dei vari ambienti. Al momento, tuttavia, la struttura ancora non è completamente utilizzata e l’arredamento non è completo.

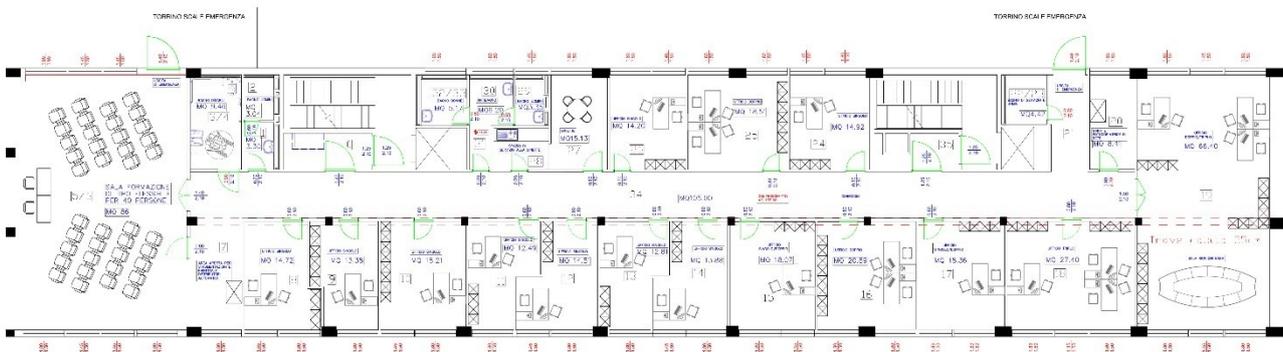


Figura 22: pianta degli uffici con arredamento secondo il progetto.

Locale	Superficie (mq)
Antibagno uomini 1	2,8
Bagno uomini 2	2,5
Bagno disabili 3-4	9,3
sala 5-6	86,5
Corridoio 7-21-34	105,2
Ufficio 8	16,5
Ufficio 9	15,7
Ufficio 10	18,2
Ufficio 11	12,5
Ufficio 12	14,5
Ufficio 13	12,8
Ufficio 14	13,9
Ufficio 15	18,1
Ufficio 16	21
Ufficio 17	18,4
Ufficio 18	27,4
Sala 19	66,5
Locale server 20	8,4
Bagno servizio/uomini 22-23	4,4
Ufficio 24	14,9
Ufficio 25	18,6
Ufficio 26	14,2
Dinette 27-28	15,1
Bagno uomini 29	2,6
Antibagno 30-31	5,9
Bagno donne 32-33	8,3
Totale superficie calpestabile	554,2
Superficie lorda totale	629

Tabella 4: superfici calpestabili e lorde dei locali della sede ENEA.

Destinazione d'uso	Superficie (mq)
Uffici usati + dinette	205
Bagni	31,4
Corridoio	105,2

Locale server	8,4
Altro	4,4
Uffici inutilizzati	46,8
Sale riunioni (non usate)	153
Totale ambienti usati	354,4

Tabella 5: superfici aggregate per destinazione d'uso.

Gli impianti sono stati sostituiti o ammodernati durante la recente ristrutturazione: per la climatizzazione degli si è adottata una soluzione aria-aria con climatizzatori split di marca Olimpia Splendid (in appendice si riportano le schede tecniche). Queste macchine permettono il riscaldamento invernale e il raffrescamento estivo e permettono di avere un controllo del tutto indipendente tra i vari locali.



Figura 23: unità esterna climatizzatore split.



Figura 24: unità interna climatizzatore split.

Per quanto riguarda il riscaldamento invernale dei servizi igienici, la soluzione prevede dei radiatori elettrici.

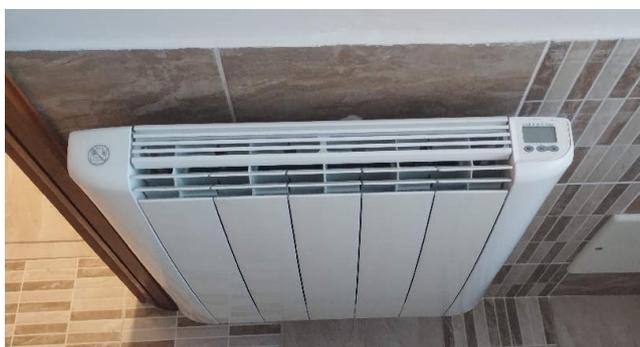


Figura 25: boiler per acqua calda sanitaria.

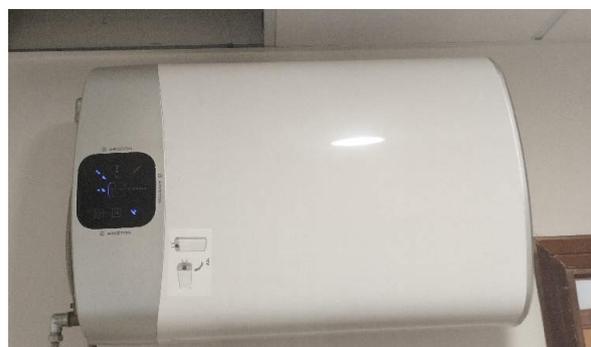


Figura 26: radiatore elettrico per riscaldamento dei bagni.

Per la produzione di acqua calda sanitaria, si sono installati degli scaldabagno elettrici da 50 litri di marca Ariston, modello Velis EVO.

Si è anche aggiornato e parzialmente rinnovato l'impianto elettrico e l'illuminazione che ora prevede dei corpi illuminanti a led.

Attualmente non tutti i locali del piano risultano utilizzati perché ancora in via di allestimento. Nel seguito, questi non verranno considerati nel calcolo degli indicatori di prestazione energetica o lo saranno solo parzialmente.

2.1 Uso degli uffici

Nel periodo preso in esame, gli uffici sono stati usati in modo discontinuo perché, a causa del covid-19, una gran parte del personale si è trovata a lavorare da remoto per ridurre il rischio di contagio. Nella prima parte del periodo analizzato, da ottobre a dicembre 2022, la presenza è stata inferiore a quella registrata successivamente, che è gradualmente cresciuta. Anche attualmente la presenza non è mai massima negli orari di ufficio in quanto è rimasto il lavoro flessibile che viene ancora sfruttato da parte del personale: il covid-19 ha modificato il modo di lavorare e ha aperto una riflessione su un più razionale uso del tempo, conciliando il tempo della vita e quello del lavoro. Questa situazione di presenza parziale ha chiaramente influito sui consumi portando in generale ad una notevole riduzione del consumo totale, ma anche ad alcune variazioni di alcuni parametri di prestazione considerati, come il rapporto tra i consumi diurni e notturni. I consumi notturni, infatti, sono poco influenzati dalla presenza e sono tendenzialmente costanti. Questi aspetti saranno approfonditi nel prosieguo della trattazione, in particolare nel capitolo che tratta l'analisi dei consumi.

3 Monitoraggio energetico e ambientale degli edifici

3.1 Perché monitorare

Conoscere significa avere la possibilità di migliorare. Per avere una conoscenza quantitativa e non solo qualitativa, è necessario svolgere un monitoraggio strumentale. Questo permette di scoprire zone di inefficienza, sprechi nascosti, abitudini che si possono cambiare difficili da individuare se non con delle misurazioni sistematiche e a seguito di analisi. Secondo un report dell'Agencia Internazionale per l'Energia *“Una migliore comprensione di dove, come e perché si usa l'energia può aiutare le imprese ad aprire molteplici opportunità sia di risparmio immediato, sia di miglioramenti di efficienza sul lungo termine. Un'analisi delle bollette energetiche e dei processi può essere il primo passo, seguito da un migliorato monitoraggio dei sistemi di gestione per un continuo miglioramento. Sistemi di misura e di controllo efficienti – quando usati per identificare le opportunità di risparmio energetico e per gestire l'uso dell'energia – possono portare a ridurre l'uso di energia fino al 40% con extra costi ridotti o nulli”* (pagina 6 di [15]). Inoltre, monitorare i parametri ambientali quali temperatura, umidità, concentrazione di anidride carbonica e composti organici volatili (VOC) permette di tenere sotto controllo il comfort termo-igrometrico e la salubrità degli ambienti dando la possibilità di intraprendere azioni volte al miglioramento di questi parametri, se necessario.



3.2 Descrizione del sistema di monitoraggio ambientale ed elettrico

Nel piano dell'edificio oggetto di studio, è presente un sistema di monitoraggio energetico e ambientale in ogni ambiente attraverso prese intelligenti (*smart plug*) e sensori di temperatura ambiente, umidità relativa (di seguito rh), composti organici volatili (di seguito VOC) e pressione (la pressione atmosferica non è stata presa in considerazione in alcun passaggio dello studio).

Le prese intelligenti, che forniscono la misura dell'energia elettrica comunicando il dato su rete Wi-Fi, sono del produttore Shelly. Sono presenti due modelli, lo Shelly plug S (Figura 28), con potenza nominale di 2500 W e usato per il monitoraggio delle postazioni di lavoro, e il modello Shelly plug (Figura 27) con potenza nominale di 3500 W, a cui sono collegati i climatizzatori split.



Figura 27: smart plug Shelly per il monitoraggio elettrico dei climatizzatori.



Figura 28: smart plug Shelly per il monitoraggio elettrico delle postazioni di lavoro.

Il sensore ambientale (Bosch–Digimat, Figura 29) è realizzato con un sensore Bosch BME680 in grado di rilevare, con frequenza di misura selezionabile, temperatura dell'aria, umidità relativa, VOC e pressione atmosferica assoluta. Inoltre, sfruttando un algoritmo sviluppato dal produttore stesso, dovrebbe essere in grado di calcolare una concentrazione equivalente di anidride carbonica nell'aria tenendo conto di quale è il rapporto tra la CO₂ presente nel respiro umano e i VOC. Questo porta a valori di CO₂ equivalente, di seguito eCO₂, talvolta fuori scala (si veda l'analisi sviluppata nel paragrafo 4.6). Questo aspetto sarà opportunamente approfondito nel prosieguo della trattazione. Il sensore è collegato ad una scheda Raspberry Pi Zero W che lo alimenta, ne legge i valori e li trasmette via Wi-Fi.



Figura 29: interno del sensore Bosch-Digimat

È presente un monitoraggio anche nel quadro elettrico generale (QEG) per monitorare sia i carichi già misurati con le *smart plug*, ma in modo aggregato, sia per monitorare gli altri carichi non monitorati diversamente. Anche questi misuratori, installati in un quadro dedicato, comunicano via Wi-Fi. Il quadro elettrico generale chiuso e aperto si può osservare nelle figure Figura 30 e Figura 31.



Figura 30: quadro elettrico generale (QEG).

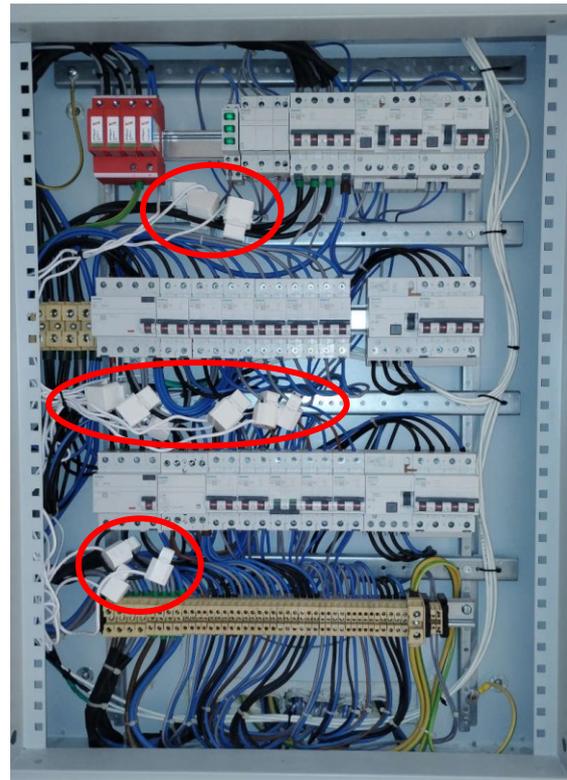


Figura 31: interno del quadro elettrico generale.

Si noti la presenza dei trasformatori amperometrici, cerchiati in rosso, sui cavi dei carichi monitorati.



Figura 32: quadro elettrico dei misuratori di energia.

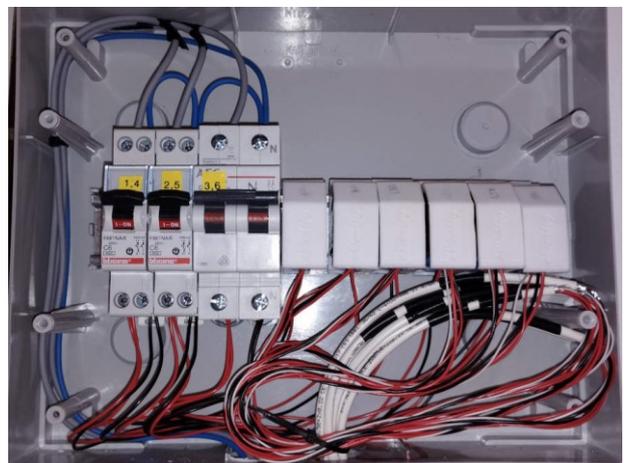


Figura 33: interno del quadro elettrico dei misuratori di energia.

Il quadro elettrico di misura (QEM), posizionato sopra il QEG e visibile nelle figure Figura 32 e Figura 33, ospita i misuratori Shelly EM e i relativi interruttori di protezione. I misuratori sono del tipo con trasformatori amperometrici (TA) e sfruttano i principi fisici secondo cui un conduttore percorso da corrente produce un campo magnetico; poiché attorno al filo viene inserito una toroide di materiale ferromagnetico, al suo interno si produrrà un flusso magnetico. Attorno alla toroide è avvolto un secondo conduttore. Poiché la corrente nel primo conduttore è variabile, il campo magnetico

e il flusso saranno variabili; un flusso magnetico variabile induce una forza elettromotrice (tensione) variabile nel secondo conduttore elettrico avvolto attorno alla toroide. Il misuratore, leggendo quest'ultima tensione, ricava il valore di corrente.

Il grande vantaggio di usare questo tipo di misuratori con trasformatori amperometrici è che non si devono eseguire lavori elettrici sui quadri, ma è sufficiente richiudere i TA (apribili) attorno ai cavi e collegare i fili al misuratore. In questo modo si possono installare anche successivamente alla realizzazione dei quadri elettrici in modo molto rapido senza bisogno di modificarli e ri-certificarli. Lo svantaggio è che la misura è meno precisa rispetto a quella fornita dai misuratori ad inserzione diretta. Nella Tabella 6 si riporta la tabella dei misuratori installati.

Nome dispositivo	Carico monitorato
pwm01_0 pwm2_1 pwm03_0	Generale
pwm04_0 pwm05_0 pwm06_0	Generale luci
pwm01_1 pwm2_0 pwm03_1	Prese servizi
pwm05_1	Radiatori WC2
pwm06_1	Boiler asciugamani WC1 (disabili)
pwm04_1	Boiler asciugamani WC2

Tabella 6: identificativo dei misuratori di energia elettrica e carico misurato.

Tutti i dispositivi di monitoraggio sono dotati di connessione Wi-Fi e sono configurati per comunicare con una la rete Wi-Fi degli uffici dedicata e appositamente configurata per motivi di sicurezza. I dati inviati sono memorizzati in un database realizzato dall'azienda Digimat.

Lo schema riportato nella Figura 34 indica come sono suddivisi e aggregati i carichi monitorati per ogni misuratore. Il generale, che monitora in modo aggregato il consumo totale, ha sotto di sé altri misuratori che permettono di suddividere i carichi in base all'utenza. A sua volta, il misuratore delle prese servizi ha sotto di sé le *smart plug* e gli apparati IT che non sono monitorati.

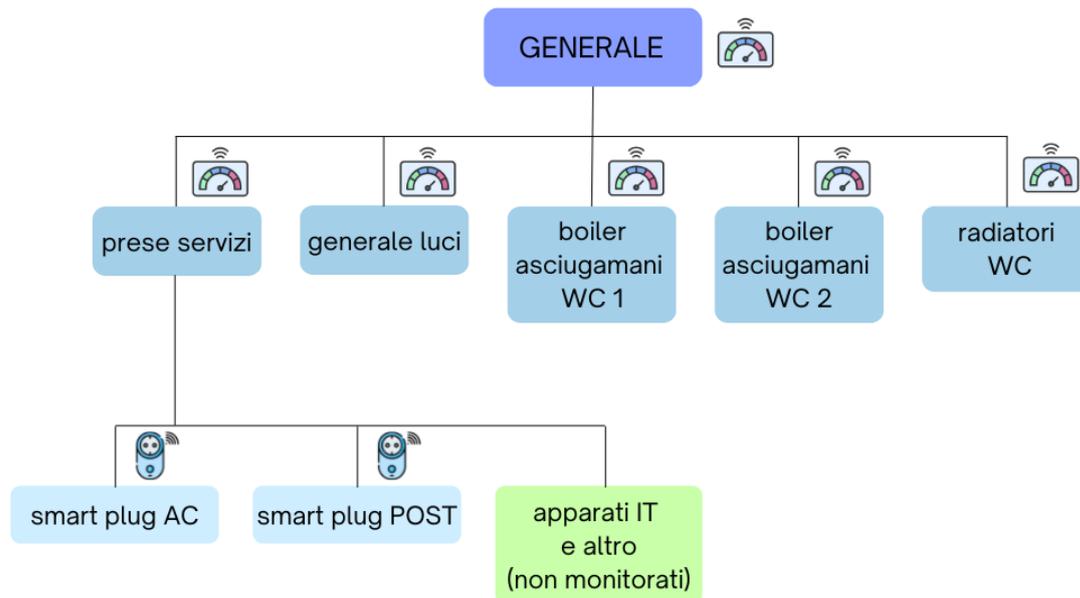


Figura 34: gerarchia del sistema di misura dell'energia elettrica installato.

La Figura 35 mostra lo schema di principio semplificato del sistema di monitoraggio installato.

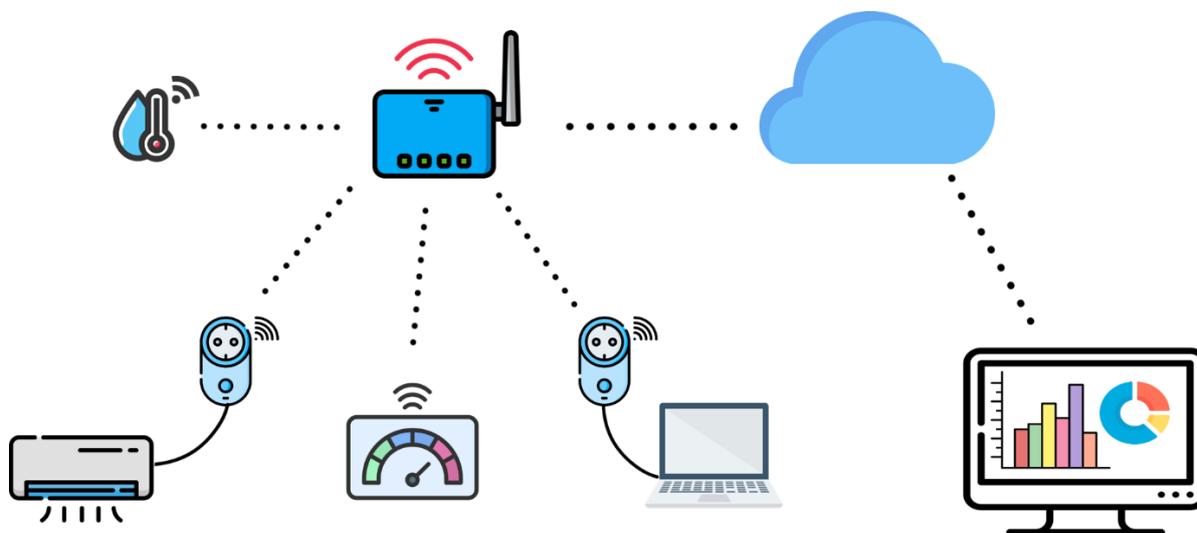


Figura 35: schema di principio semplificato del sistema di monitoraggio energetico e ambientale installato nella sede.

Praticamente si tratta di tutti dispositivi IoT (Internet of Things, internet delle cose), ossia dei dispositivi wireless connessi ad internet che rilevano e inviano dati (sensori) e/o che inviano un comando ad un oggetto (*switch*). Tutte le *smart plug* sono entrambe le cose insieme perché inviano i dati di consumo e possono alimentare o disalimentare i dispositivi collegati sulla base di un comando ricevuto da remoto. Stessa cosa potrebbero essere i misuratori di energia nel QEG che tuttavia sono usati esclusivamente come misuratori. Infine, il sistema prevede in ogni stanza dei telecomandi ad infrarossi connessi per il controllo remoto dei climatizzatori (*switch*), che ad oggi non sono ancora mai stati usati. Tutti i dispositivi installati sono indicati nella Tabella 7 con i relativi parametri monitorati.

Dispositivo	Marca/modello	Parametri monitorati
Misuratore elettrico	Shelly EM	Potenza istantanea Energia cumulata Fattore di potenza
<i>Smart plug</i>	Shelly plug S	Potenza istantanea Energia cumulata
<i>Smart plug</i>	Shelly plug M	Potenza istantanea Energia cumulata
Sensore multiparametrico	Bosch BME680 – Digimat	Temperatura Umidità relativa Composti organici volatili Pressione atmosferica assoluta
Telecomando ad infrarossi	Yulink	

Tabella 7: elenco dei dispositivi di monitoraggio e controllo installati.

Questa tecnologia permette la raccolta massiva di informazioni anche in tempo reale permettendone l'elaborazione immediata ed una eventuale azione di controllo.

Con sistemi di questo genere è possibile quindi monitorare un sistema e, a partire dalle informazioni sul suo stato, prendere attivamente delle decisioni per governarlo. Nel caso di un edificio, dalla conoscenza dei parametri ambientali e di consumo, di può decidere come usare al meglio la climatizzazione per massimizzare il comfort degli occupanti e minimizzare il consumo.

4 Analisi dei consumi e dei parametri ambientali

L'analisi dei consumi energetici ha richiesto alcuni passi preliminari quali lo scaricamento dei dati e la definizione dei parametri da analizzare che saranno brevemente descritti prima dell'analisi vera e propria.

4.1 Programmazione per lo scaricamento dei dati di monitoraggio e l'analisi

L'accesso al database con i dati di monitoraggio è possibile da browser attraverso una piattaforma web oppure attraverso API, (Application Programming Interface), ovvero una interfaccia di programmazione delle applicazioni, un sistema che permette lo scambio di informazioni tra chi le richiede e chi le invia in risposta. L'uso di API richiede un'autenticazione da parte di chi usa il servizio e non impone a quest'ultimo di conoscere come le risorse vengono recuperate o la provenienza. Nel caso particolare si tratta di API RESTful e la risposta che si ottiene dal server è un file nel formato json.

Lo scaricamento manuale dei dati attraverso la piattaforma web si è rivelato lungo e farraginoso per cui si è realizzato uno *script* in Python per automatizzare lo scaricamento direttamente dal server e permettere nuovi scaricamenti futuri semplificando l'operazione. Per ottenere le risposte dal server è stato necessario un lavoro di ottimizzazione delle richieste per tentativi così da non ricevere un errore in risposta. Essendo necessario inviare un gran numero di richieste di piccoli blocchi di dati, lo scaricamento è piuttosto lento. Dai file scaricati si sono creati dei nuovi file csv.

I dati sono stati trattati con tecniche e strumenti tipici dei *big data* con le librerie più comunemente usate quali Pandas, Numpy, Matplotlib, Seaborn, Scikit-learn e altre integrate con il linguaggio di programmazione Python.

La fase di programmazione per lo scaricamento dei dati e la successiva analisi ed estrazione delle informazioni utili ha richiesto oltre la metà del tempo complessivo, sia perché è stato necessario acquisire delle nuove competenze di programmazione, sia perché molti dati, come quelli di consumo, non erano in una forma tale da permettere una analisi agevole.

Infine, quando si è cercato di stimare le presenze dai dati di consumo e ambientali, ci si è scontrati col fatto che il valore di CO₂ equivalente, o eCO₂, riportato dal sensore multiparametrico Bosch non è affidabile e presenta un nome che può trarre in inganno. Comprendere questo problema, cercare di porvi rimedio fino a decidere di non considerare questa variabile ha richiesto un lungo processo (vedi paragrafo 4.6). Tutto questo è tipico dei progetti di data science dove la maggior parte dello sforzo risiede nell'ottenere e ripulire i dati in modo da renderli utili all'obiettivo.

Per permettere il riuso del codice, si è scelto di scrivere degli script con una esecuzione quanto più automatizzata possibile, dove si potessero variare agevolmente alcuni parametri per svolgere le analisi. Inoltre si sta lavorando alla pubblicazione del codice su Gitlab per rendere più facile la collaborazione con altri ricercatori.

4.2 Indicatori di prestazione

Per procedere con l'analisi, si sono scelti degli indicatori di prestazione, KPI (*Key Performance Indicator*) che sono riportati nella Tabella 8:

	KPI	Unità di misura	Note
1	Consumi energetici generali	kWh/(mq·a)	
2	Consumi energetici climatizzazione (AC)	kWh/(mq·a)	
3	Consumi energetici illuminazione	kWh/(mq·a)	
5	Consumi energetici generali giornalieri	kWh/giorno	
6	$RF = (F2 + F3) / F1$	adimensionale	
7	Percentuale di consumo nell'orario di lavoro	adimensionale	Dalle 7 alle 19* dei giorni in cui la sede è stata aperta
8	Percentuale di consumo al di fuori dell'orario di lavoro	adimensionale	Tutti gli altri orari

*Si considera il periodo dalle 7 alle 19 per la presenza di ricercatori che arrivano molto presto la mattina e di altri che vanno via la sera abbastanza tardi.

Tabella 8: indicatori di prestazione usati

Si badi bene che nel paragrafo 4.3 seguente RF sta sempre ad indicare il rapporto tra i consumi delle fasce orarie F2 ed F3 rispetto alla fascia oraria F1.

A partire dai consumi per la climatizzazione reali si valuta anche la firma energetica dei vari uffici. Per permettere il confronto con edifici simili per tipologia e per uso, i consumi devono essere adimensionalizzati e rapportati alla superficie.

Inoltre, si è cercato di comprendere quanto i consumi dipendessero dalla presenza del personale per capire a che livello di consumo si può arrivare nel caso in cui si tornasse ad una situazione pre-covid-19 in cui si torna al lavoro completamente in presenza.

Il fine ultimo di queste analisi che si basano su dati reali è quello di individuare i margini di miglioramento, proporre degli interventi migliorativi e valutare se e come l'edificio può inserirsi all'interno di una comunità energetica rinnovabile.

4.3 Analisi consumi

Segue una serie di analisi dei consumi elettrici corredate da un gran numero di grafici che permettono di comprendere a colpo d'occhio i punti di forza e di debolezza nella gestione dei carichi degli uffici e di individuare le aree di miglioramento. Si considerano aspetti diversi funzionali a molteplici scopi. Si discute anche della qualità dei dati di partenza, non sempre presenti o continui e che non permettono la massima accuratezza dei risultati, risultati che tuttavia restano sostanzialmente validi perché è presente la maggior parte dei dati. Indicativamente si va da circa l'80% per alcuni misuratori al 95%

per altri eccetto il caso della *smart plug* dell'ufficio 13 che, per un uso non corretto, ha funzionato quasi esclusivamente nell'ultimo periodo di analisi.

4.3.1 Visualizzazioni grafiche per l'analisi

Per rendere le analisi facilmente comprensibili si fa ampio uso di alcuni strumenti grafici descritti di seguito:

- **heat map**

Una *heat map*, o mappa di calore, è un grafico che permette di visualizzare l'andamento di una variabile rispetto ad altre due variabili. Nei casi riportati le variabili sono temporali, riportando su un asse le 24 ore e sull'altro i giorni. Si possono scegliere anche scale temporali diverse. Il valore della variabile è riportato attraverso una scala di colori che può variare con continuità tra il minimo assunto dalla variabile e il suo massimo. Sostanzialmente si tratta di una tabella a doppia entrata in cui i valori sono sostituiti da un rettangolino colorato.

- **grafico a barre**

Sono dei grafici dove il valore della variabile da visualizzare è indicato con la lunghezza di una barra. Sull'asse orizzontale si può riportare il nome della categoria associata alla barra oppure una seconda variabile. Nei grafici che seguono, sull'asse orizzontale può trovarsi o il tempo o una percentuale.

- **diagramma cartesiano**

Grafico che evidenzia l'andamento di una variabile rispetto ad un'altra, ad esempio nel tempo attraverso coppie ordinate di valori che formano una spezzata nel piano.

- **grafico a dispersione**

Chiamato anche *scatter plot*, in inglese, serve per studiare la correlazione tra due variabili. Spesso viene anche disegnata una linea di tendenza per aiutare a visualizzare l'andamento. Se i punti sono molto vicini alla linea vuol dire che c'è una dipendenza tra le due variabili, se sono dispersi nel piano no. Inoltre risulta facile individuare degli *outliers*, dei valori fuori scala.

4.3.2 Metodo di elaborazione dei dati

I dati di consumo elettrico scaricati dal database sono diversi a seconda della provenienza, ossia se provengono da una *smart plug* o da un misuratore inserito nel quadro elettrico e a questo si deve il fatto che sono stati analizzati in modo differente.

Riguardo ai dati dei misuratori nel quadro, questi comunicano dati ogni pochi secondi incrementando la frequenza di campionamento quando rilevano variazioni di carico e riducendola quando il carico è stabile per seguire le variazioni e misurare correttamente. Questa tecnica, utile per non perdere informazioni sull'effettivo consumo di energia, ha il grande svantaggio di trasferire una quantità di dati spropositata, è insostenibile per lunghi periodi a causa della memoria necessaria per la memorizzazione e incrementa i tempi di analisi. Inoltre la frequenza di campionamento variabile aggiunge un

livello di difficoltà nell'analisi rispetto ad una frequenza sempre costante. Grazie al fatto che i misuratori rilevano e comunicano più parametri contemporaneamente, tra le varie possibilità si è scelto di lavorare con il dato relativo al consumo di energia totale, ossia un valore progressivo che viene anche memorizzato nella memoria interna non volatile del dispositivo. Questo dato continua ad essere incrementato anche in caso di perdita di comunicazione con il cloud e quindi al ritorno della comunicazione, se anche si è persa la storia esatta di ciò che è accaduto in quel lasso di tempo, il consumo complessivo viene recuperato. Si è operato nel modo seguente:

- ad ogni dato è associato un timestamp: da esso si sono estratte la data e l'ora;
- per ogni combinazione di giorno ed ora si è estratto il primo valore disponibile, che può essere stato registrato anche parecchi secondi dopo lo scoccare dell'ora;
- di è creata una tabella con i nuovi valori di consumo totalizzato associati alla relativa data e ora;
- si è calcolata la differenza tra due valori consecutivi per ottenere il consumo nell'ora. Inoltre, in virtù del fatto che il periodo considerato è di un'ora, il valore di consumo, misurato in chilowattora (kWh), corrisponde anche alla potenza media assorbita nello stesso intervallo di tempo. Il chilowattora, infatti è definito come l'energia consumata da un carico di un chilowatt (kW) in un'ora.

Questo metodo permette di superare il problema di piccoli buchi di dati se ad esempio la comunicazione è mancata per un breve periodo tra un'ora e l'altra. Se invece la comunicazione è mancata per periodi più lunghi l'informazione per quel periodo è persa. Questa strategia genera un piccolo inconveniente che è quello che al ritorno della comunicazione il primo valore calcolato per differenza riporta tutto il consumo non imputato alle ore mancanti, per cui si registra un consumo fuori scala che va eliminato caso per caso ponendo una soglia oltre la quale un valore può essere considerato tale e alta a sufficienza da non eliminare consumi alti ma corretti. Quanto descritto è esemplificato nella Figura 36. L'eliminazione dei dati comporta purtroppo la perdita di ulteriori informazioni, seppur in numero ridotto, ma soprattutto il fatto che, nel momento del calcolo dei consumi su un lungo periodo questi siano leggermente sottostimati. Le analisi, ad ogni modo, si possono considerare attendibili soprattutto per quanto riguarda i valori percentuali perché i buchi di dati sono abbastanza casuali e si suppone che durante questi eventi la distribuzione dei consumi sia stata la medesima di quella registrata in altri periodi.

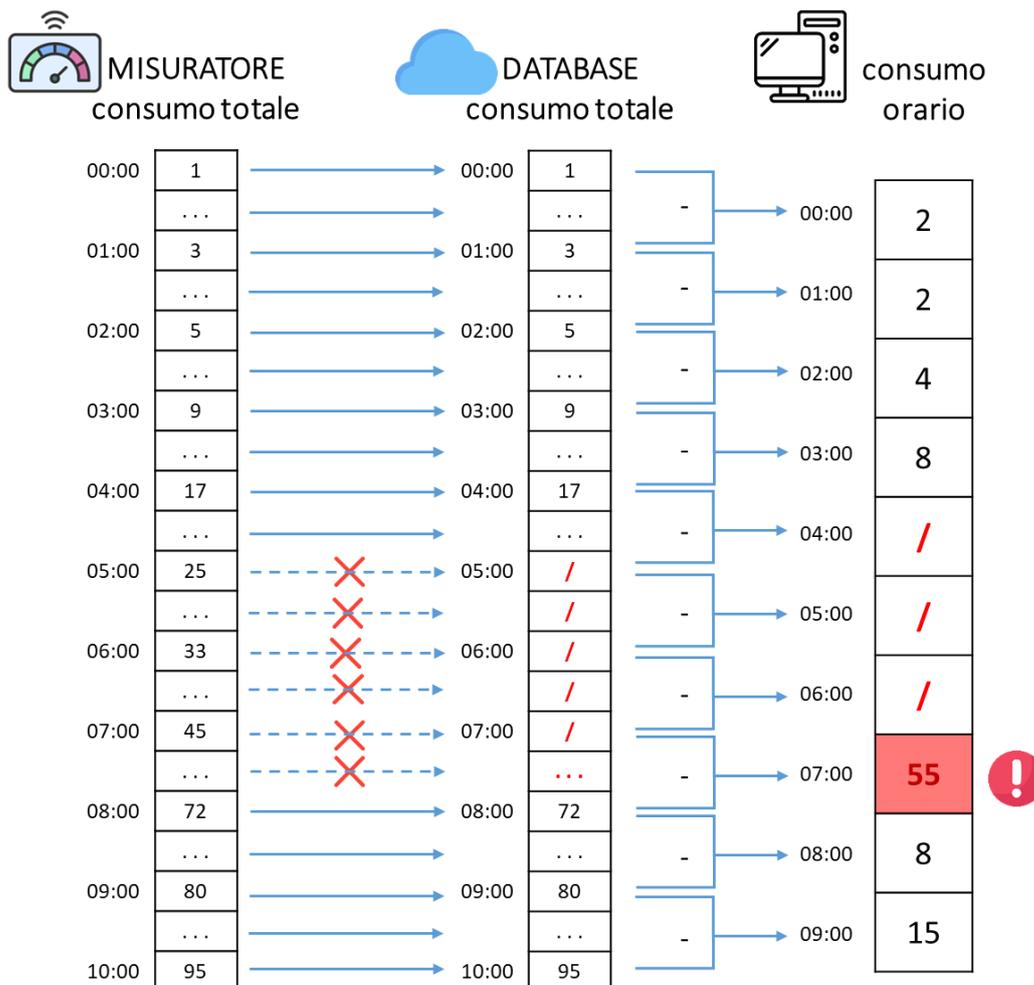


Figura 36: schema della strategia usata per l'analisi dei dati dei misuratori nel quadro elettrico

Per quanto riguarda le *smart plug*, invece, si è fatto affidamento sul dato relativo alla potenza istantanea assorbita in quanto l'unico realmente analizzabile ed utile. Anche queste ultime hanno una frequenza di campionamento variabile come gli altri misuratori e poiché il dato preso è la potenza istantanea si è dovuto svolgere la media integrale per ricavare il dato medio orario.

4.3.3 Consumo elettrico riscaldamento bagni

Per il riscaldamento dei bagni sono presenti dei radiatori elettrici, sostanzialmente una resistenza elettrica, con un interruttore per l'accensione manuale e un termostato per la regolazione della temperatura e un orologio per la programmazione dell'orario di accensione.

Si sceglie di partire proprio dall'analisi di questo carico per via delle criticità emerse.

Come si vede nel grafico in Figura 37, durante il periodo di riscaldamento il consumo è stato quasi costante, giorno, notte e fine settimana. Si osserva solo un periodo di spegnimento in corrispondenza della chiusura degli uffici tra Natale e capodanno. Si nota anche come il consumo nelle ore diurne sia

leggermente inferiore rispetto a quelle notturne grazie agli apporti solari gratuiti e alle maggiori temperature esterne che causano una minore dispersione di calore.

I parametri di prestazione sono riportati nella Tabella 9.

Parametro	
Consumo totale	6373 kWh
RF	154,6 %
Consumo nell'orario di lavoro	2118 kWh
Percentuale di consumo nell'orario di lavoro	33,3 %
Consumo al di fuori dell'orario di lavoro	4255 kWh
Percentuale di consumo al di fuori dell'orario di lavoro	66,7 %
Consumo al metro quadro	>203 kWh/(mq·a)*

*Tabella 9: KPI relativi ai servizi igienici. *il consumo, riferito alla sola superficie calpestabile dei bagni, è leggermente sottostimato a causa della mancanza di alcuni dati.*

Un rapporto RF così alto indica che nelle fasce orarie F2 e F3 si è consumata quasi la stessa energia elettrica della fascia F1. Considerando che le fasce orarie F2 ed F3 corrispondono a 108 ore settimanali e la fascia F1 a 60 ore (comprende anche il sabato mattina) si capisce come per oltre 110 ore ogni settimana (includendo tutto il sabato perché la sede è chiusa) il riscaldamento sia stato acceso del tutto inutilmente e si sarebbero potuti risparmiare circa i due terzi dell'energia. Un RF sensato per questo tipo di carico sarebbe prossimo allo 0 %, ossia una quasi totale assenza di consumo nei periodi serali, notturni e nei festivi.

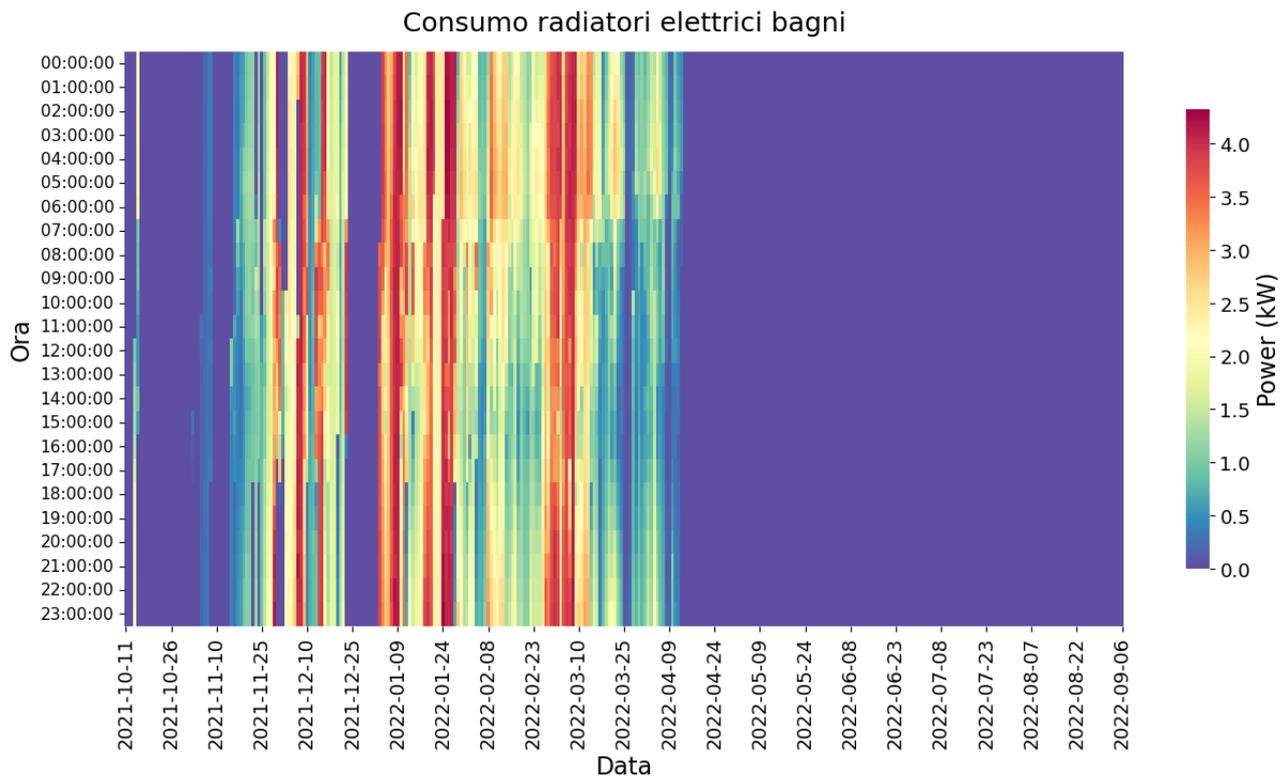


Figura 37: Heat map radiatori elettrici bagni

Il grafico che segue (Figura 38) mostra il consumo totale giornaliero di energia elettrica. Anche qui si nota come, se non per il periodo di chiusura natalizio, il consumo non vada mai a zero e talvolta si avvicina ai 100 kWh giornalieri. Il consumo, poi, si azzerava circa a partire dalla metà di aprile.

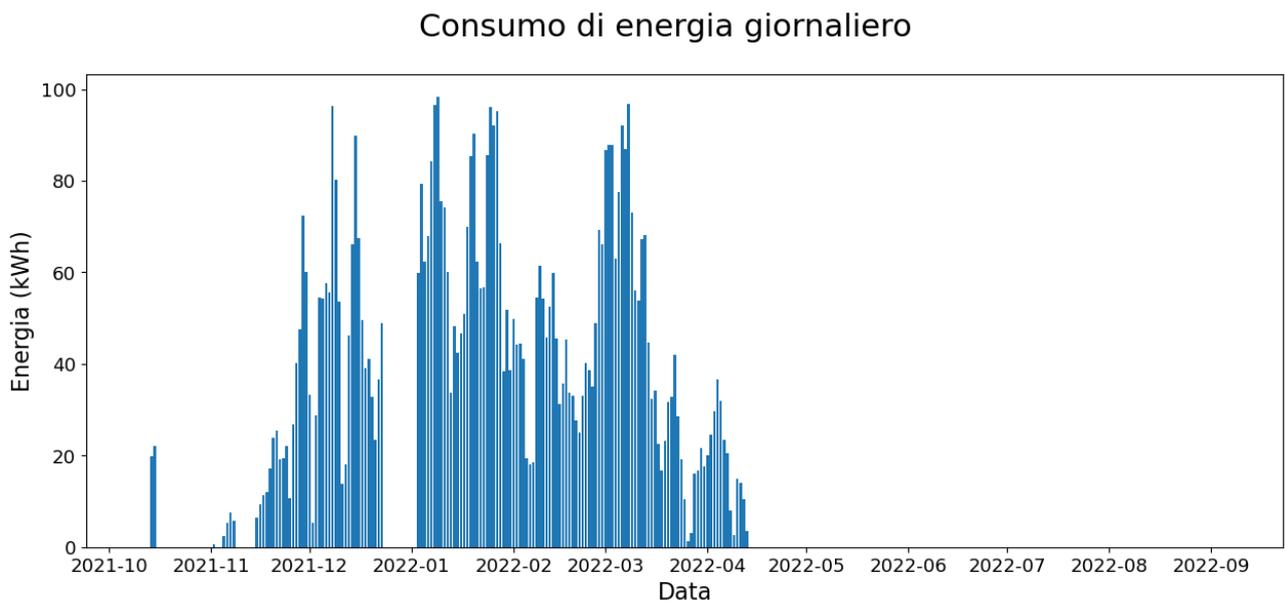


Figura 38: consumo di energia giornaliero per il riscaldamento dei bagni

Il riscaldamento dei bagni un'utenza che deve essere assolutamente ottimizzata ed è la più energivora per cui è la prima su cui intervenire semplicemente spegnendo il riscaldamento quando non necessario. Si può agire manualmente accendendo o spegnendo i radiatori ai negli orari di occupazione o può venire in aiuto lo *smart meter* installato nel quadro che presenta al suo interno un relè e che con un'opportuna programmazione può accendere e spegnere il carico collegato. Inoltre sarebbe opportuno controllare la temperatura impostata sul termostato onde evitare di riscaldare eccessivamente i locali, data la brevità della permanenza.

L'ultimo grafico che si riporta (Figura 39) mostra la distribuzione della potenza elettrica assorbita: i valori sono mediati su intervalli temporali di un'ora. La potenza massima assorbita è poco superiore a 4 kW. Resta un'ampia area bianca perché come riferimento si è preso tutto il tempo di osservazione, molto più ampio del tempo di funzionamento dell'utenza.

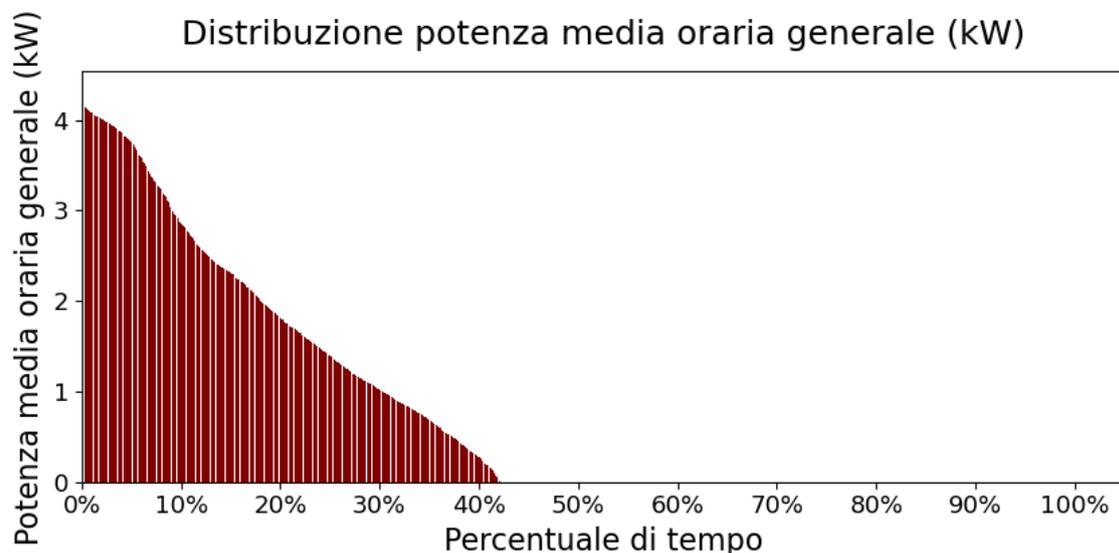


Figura 39: distribuzione della potenza assorbita dai radiatori elettrici. I dati sono mediati su periodi di un'ora

4.3.4 Consumo elettrico climatizzazione uffici

Per quanto riguarda la climatizzazione degli uffici, ogni singolo climatizzatore è monitorato con una *smart plug* per cui è stato possibile disaggregare il consumo dal resto delle utenze, pur non essendo monitorato nel quadro elettrico. La qualità dei dati è globalmente molto buona soprattutto grazie al fatto che le prese di corrente, posizionate in alto e difficilmente raggiungibili, non sono mai state staccate e quindi hanno inviato i dati in modo costante.

La Figura 40 riporta graficamente la presenza o assenza di dati (*NaN*, *Not a Number*). Se si esclude l'ufficio 24, che ad eccezione del periodo più recente non ha mai comunicato, per tutti gli altri uffici è presente la stragrande maggioranza dei dati. Questo permette di fare un'analisi affidabile in cui l'errore commesso è molto piccolo. Per quanto riguarda l'ufficio 24, la mancanza di informazioni non è un problema perché non è mai stato occupato e il climatizzatore è sempre stato spento.

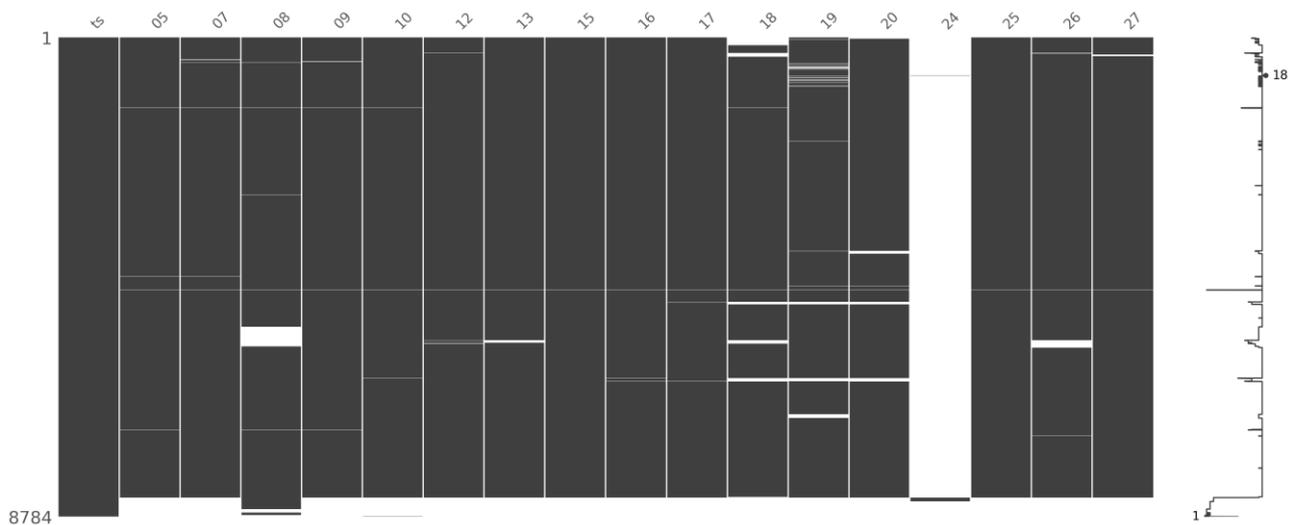


Figura 40: rappresentazione grafica dei dati mancanti (NaN): le zone grigie rappresentano la presenza dei dati, le zone bianche dei dati mancanti. La colonna ts riporta i timestamp, le altre riportano il numero dell'ufficio in cui si trova un climatizzatore.

Nel grafico in Figura 41 si osservano due fasce blu evidenti in corrispondenza delle festività natalizie (uffici chiusi) e della primavera, periodo in cui non è necessario né il riscaldamento, né il raffrescamento. Altre due zone blu, meno marcate delle altre, sono in corrispondenza dell'autunno (stesso discorso della primavera) e delle ferie estive. Durante la chiusura estiva il consumo residuo è dovuto al climatizzatore del locale con gli apparati di rete che deve essere mantenuto costantemente al massimo a 23°C.

Durante le ore notturne il consumo è stato basso o nullo, ma in alcuni giorni si notano delle strisce chiare che indicano che qualche climatizzatore è rimasto acceso. Questo è un punto su cui agire, ad esempio con delle semplici misure comportamentali, per ridurre i consumi. Inoltre, pur essendo presenti dei telecomandi ad infrarossi connessi e controllabili da remoto, ma manca una logica di utilizzo: si potrebbe predisporre una semplice logica in cloud che la sera invia a tutti i climatizzatori il comando di spegnimento.

Ad ogni modo, analizzando la distribuzione del consumo tra le varie fasce orarie, si osserva un discreto RF, per quanto ancora migliorabile:

Parametro	Valore
Consumo totale	9686 kWh
RF	47,3 %
Consumo nell'orario di lavoro	6709 kWh
Percentuale di consumo nell'orario di lavoro	69,3 %
Consumo al di fuori dell'orario di lavoro	2977 kWh
Percentuale di consumo al di fuori dell'orario di lavoro	30,7 %
Consumo al metro quadro	>47 kWh/(mq·a)*

Tabella 10: KPI relativi al consumo per la climatizzazione degli uffici. *Il consumo, riferito alla superficie calpestabile dei soli uffici effettivamente utilizzati, della dinette e del locale IT, è leggermente sottostimato per la mancanza di alcuni dati.

Questo è indice del fatto che i climatizzatori generalmente non restano accesi nelle ore notturne o nei fine settimana. Ad ogni modo l'automazione dello spegnimento permetterebbe un miglioramento. Altra cosa che salta all'occhio è il maggiore consumo estivo: come spesso avviene nelle regioni mediterranee, il carico di raffrescamento estivo supera quello di riscaldamento invernale e questo caso non fa eccezione. Anche da questa osservazione si può trarre spunto per migliorare le prestazioni energetiche: le finestre attuali con vetro singolo, lasciano entrare la quasi totalità della radiazione solare diretta. La superficie vetrata, inoltre, è particolarmente ampia. Sostituire le finestre con altre con vetri selettivi permette di ridurre notevolmente il carico di raffrescamento estivo.

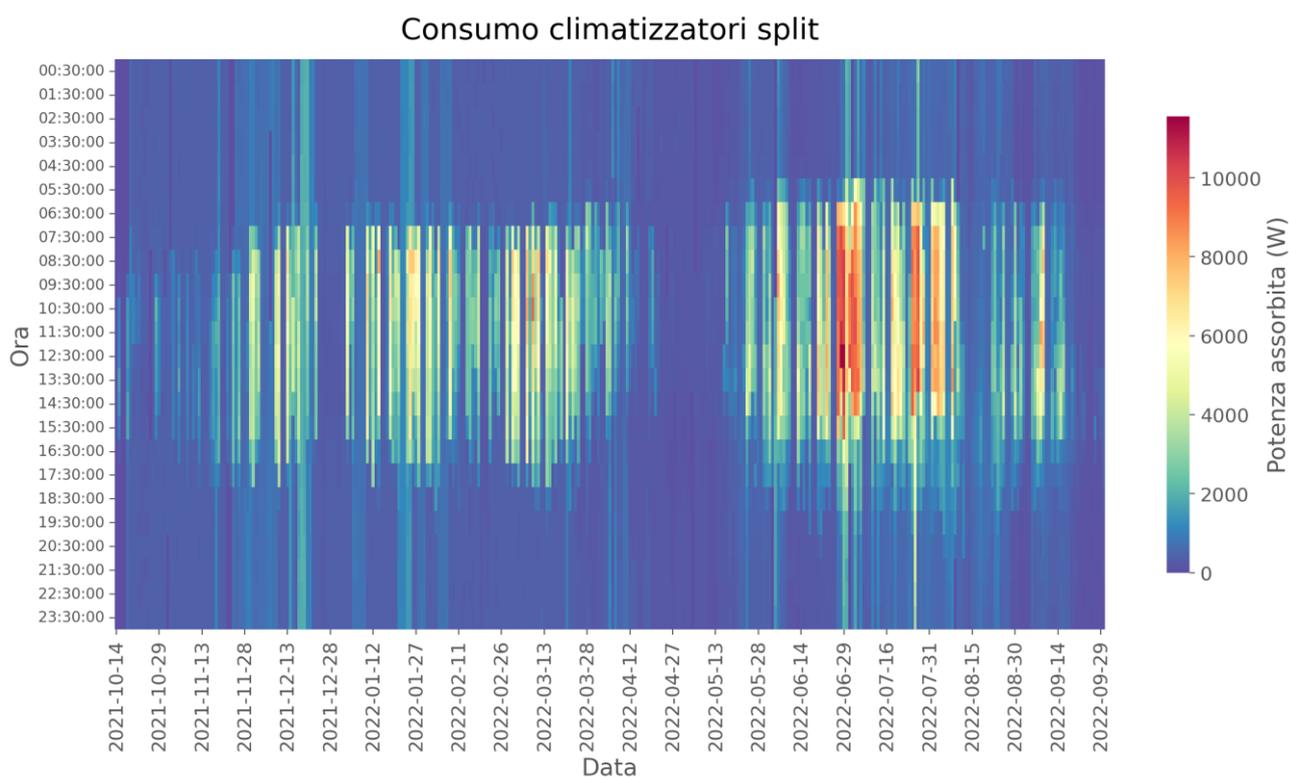


Figura 41: heat map dei consumi dei climatizzatori split

A sostegno dell'ipotesi che l'irraggiamento solare diretto ha una notevole influenza sui carichi di climatizzazione estivi si riportano i grafici in figura Figura 42 e Figura 43 che mostrano l'andamento dei consumi medi orari estivi dei locali esposti ad est e ad ovest.

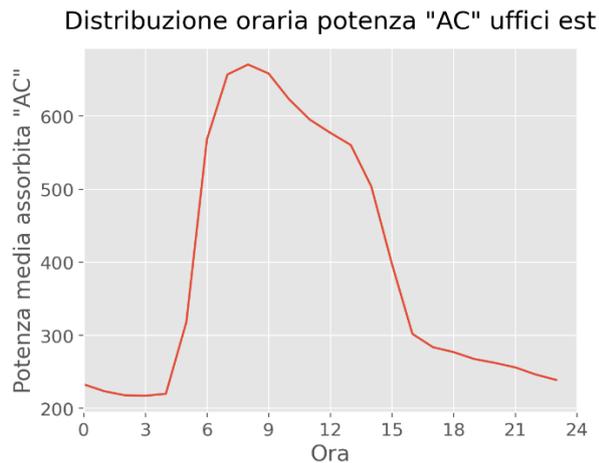


Figura 42: distribuzione media oraria dell'assorbimento elettrico per la climatizzazione estiva degli uffici esposti ad est

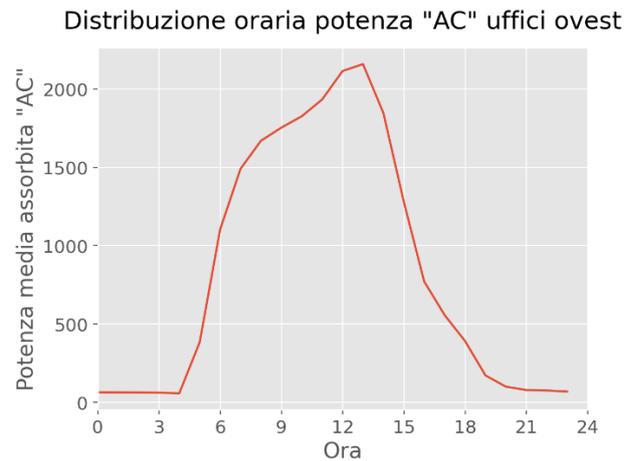


Figura 43: distribuzione media oraria dell'assorbimento elettrico per la climatizzazione estiva degli uffici esposti ad ovest

Nel caso degli uffici esposti ad est, il picco di consumo è nella prima mattinata e va diminuendo nelle ore successive per poi precipitare dal primo pomeriggio. Negli uffici esposti ad ovest il consumo cresce con un picco verso l'ora in cui il sole comincia ad entrare dalle finestre, tra mezzogiorno e l'una. Nuovi infissi con vetri selettivi, riducendo drasticamente il guadagno solare, permetterebbero di smussare notevolmente i picchi e le differenze tra mattino e pomeriggio con beneficio per i consumi.

Per quanto riguarda la stagione di riscaldamento, di cui si sono considerati solo i mesi di dicembre, gennaio e febbraio, si nota nuovamente un andamento influenzato dal sole nella misura in cui gli uffici esposti ad est presentano una riduzione di consumo poco marcata verso le ore centrali della giornata e pomeridiane (Figura 44), mentre gli uffici ad ovest vedono il consumo scendere rapidamente nel pomeriggio per l'apporto termico dell'irraggiamento solare (Figura 45). Tutti gli uffici presentano un picco mattutino corrispondente all'accensione degli impianti.

I valori riportati nei grafici sono diversi perché gli assorbimenti sono stati mediati solo sui giorni. Tra i vari uffici è stata poi fatta la somma.

In questo caso finestre con vetri selettivi farebbero perdere il beneficio (limitato) dell'irraggiamento solare, ma ridurrebbero al contempo le dispersioni termiche abbassando in generale tutta la curva.

Distribuzione oraria potenza "AC" invernale uffici est

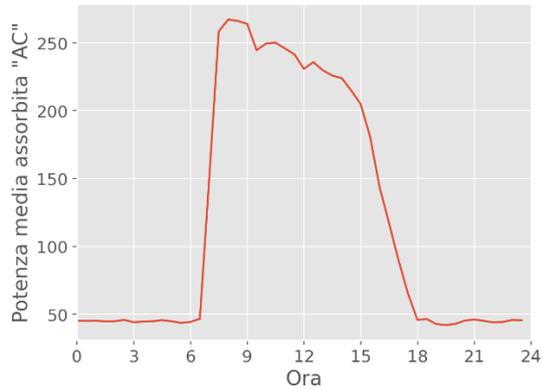


Figura 44: distribuzione media oraria dell'assorbimento elettrico per la climatizzazione invernale degli uffici esposti ad est

Distribuzione oraria potenza "AC" invernale uffici ovest

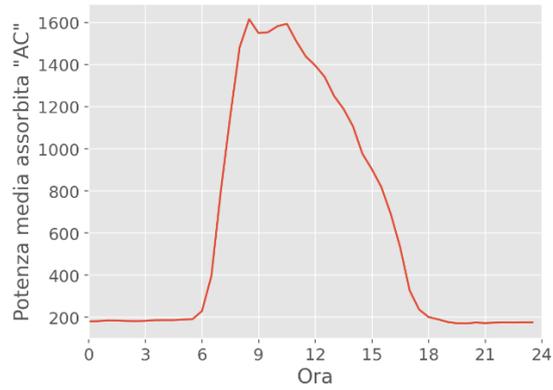


Figura 45: distribuzione media oraria dell'assorbimento elettrico per la climatizzazione invernale degli uffici esposti ad ovest

Nella Figura 46 si vede la distribuzione della potenza assorbita dai climatizzatori negli uffici con il livello di occupazione registrato da ottobre 2021 a fine settembre 2022. La potenza massima assorbita supera di poco i 10 kW e per circa l'85% del tempo di funzionamento di almeno una macchina si attesta su un valore inferiore a 2 kW.

Distribuzione potenza dai climatizzatori

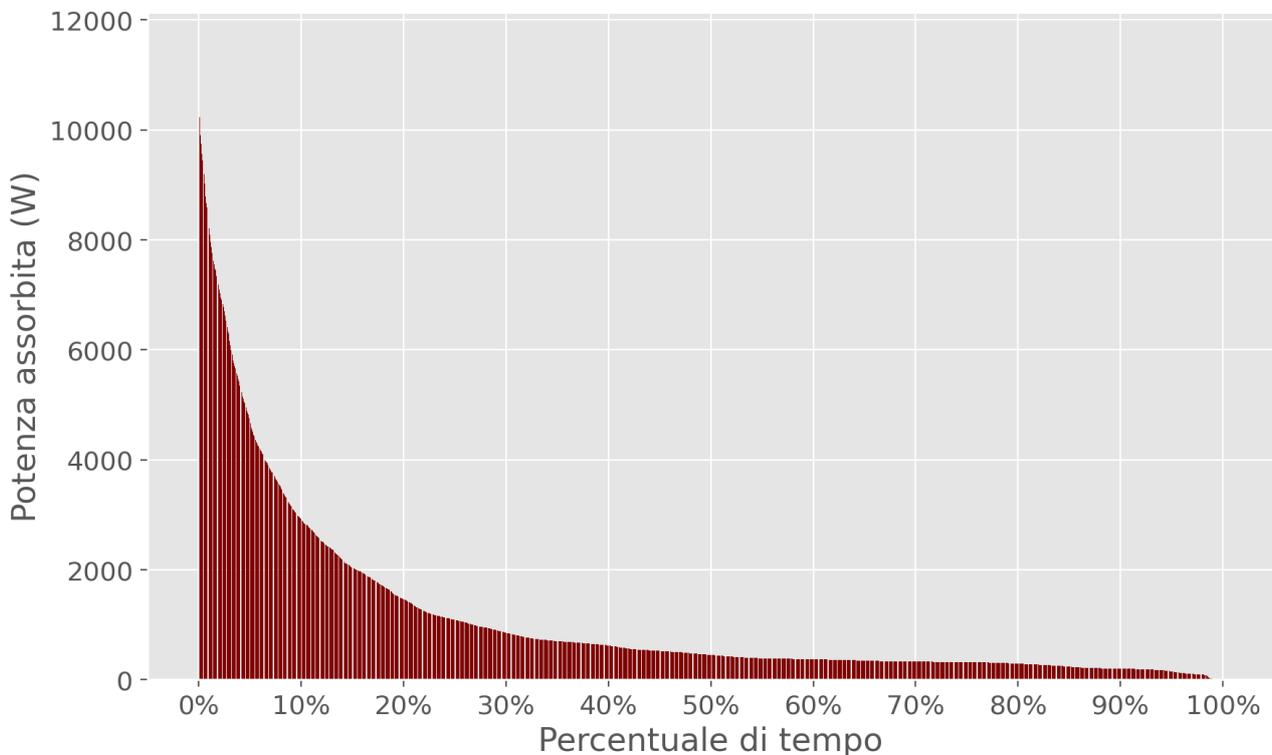


Figura 46: distribuzione della potenza assorbita dai climatizzatori. I dati sono mediati su periodi di un'ora.

4.3.5 Consumo elettrico postazioni di lavoro

La postazione di lavoro tipica comprende sostanzialmente un personal computer e nella maggior parte dei casi due schermi. In un caso sono presenti due server usati da un ricercatore per le simulazioni, che restano sempre accesi con un consumo di corrente minimo, e in un altro caso è un computer fisso di un altro ricercatore a restare sempre acceso perché usato da remoto, anch'esso con un consumo contenuto. In qualche ufficio viene anche usata una stufetta elettrica che viene collegata alla presa della postazione ed è usata per riscaldare l'ambiente in aggiunta al climatizzatore nei giorni più freddi. Ogni singola postazione è monitorata attraverso una *smart plug* Shelly plug S e per questo si è potuto analizzare il consumo nel dettaglio. Per quanto riguarda la qualità i dati rilevati (Figura 47), si osservano dei “buchi” di comunicazione in vari casi dovuti ad un errato uso: in vari casi la *smart plug*, infatti, è stata collegata solo in presenza della persona e poi staccate alla fine della giornata lavorativa o non è mai stata collegata per tutto il periodo dello studio, come nell'ufficio 9. Inoltre, in qualche caso, il carico non è stato collegato alla presa intelligente, ma direttamente alla presa di corrente sul muro per cui da un lato si hanno i dati, ma questi risultano non riportano i consumi. Le analisi che seguono fanno affidamento sui dati presenti, tuttavia va considerato un margine di errore più grande che altrove dovuto ad un uso non corretto di almeno 3 *smart plug* su 17.

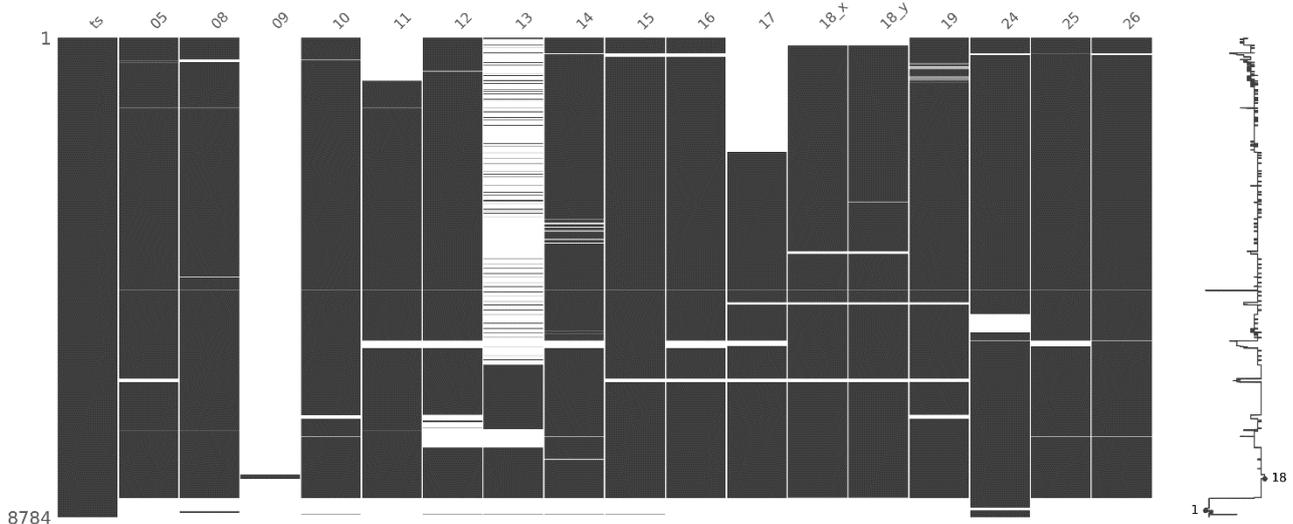


Figura 47: rappresentazione grafica dei dati mancanti (NaN): le zone grigie rappresentano la presenza dei dati, le zone bianche dei dati mancanti. La colonna ts riporta i timestamp, le altre riportano il numero dell'ufficio: nell'ufficio 18 ci sono 2 smart plug.

Nella mappa di calore di Figura 48 si osserva che nel periodo notturno il consumo elettrico è quasi sempre stato limitato, compatibile col consumo minimo dei server e del pc accesi 24 ore su 24. In qualche caso si notano delle strisce tra il verde e il giallo che fanno ipotizzare che i computer fossero accesi sotto carico, ad esempio per svolgere delle simulazioni. Si nota chiaramente anche la scansione delle settimane, segno che nei fine settimana non sono rimasti carichi accesi. Tutto questo è indice di un comportamento virtuoso.

È ragionevole ipotizzare che il maggior consumo invernale sia dovuto all'uso di qualche stufetta elettrica, ma resta di difficile comprensione il maggiore consumo elettrico estivo in corrispondenza

del periodo più caldo nei mesi di giugno e luglio: il consumo dovrebbe essere abbastanza costante nel tempo e dovrebbe dipendere esclusivamente dalla presenza delle persone.

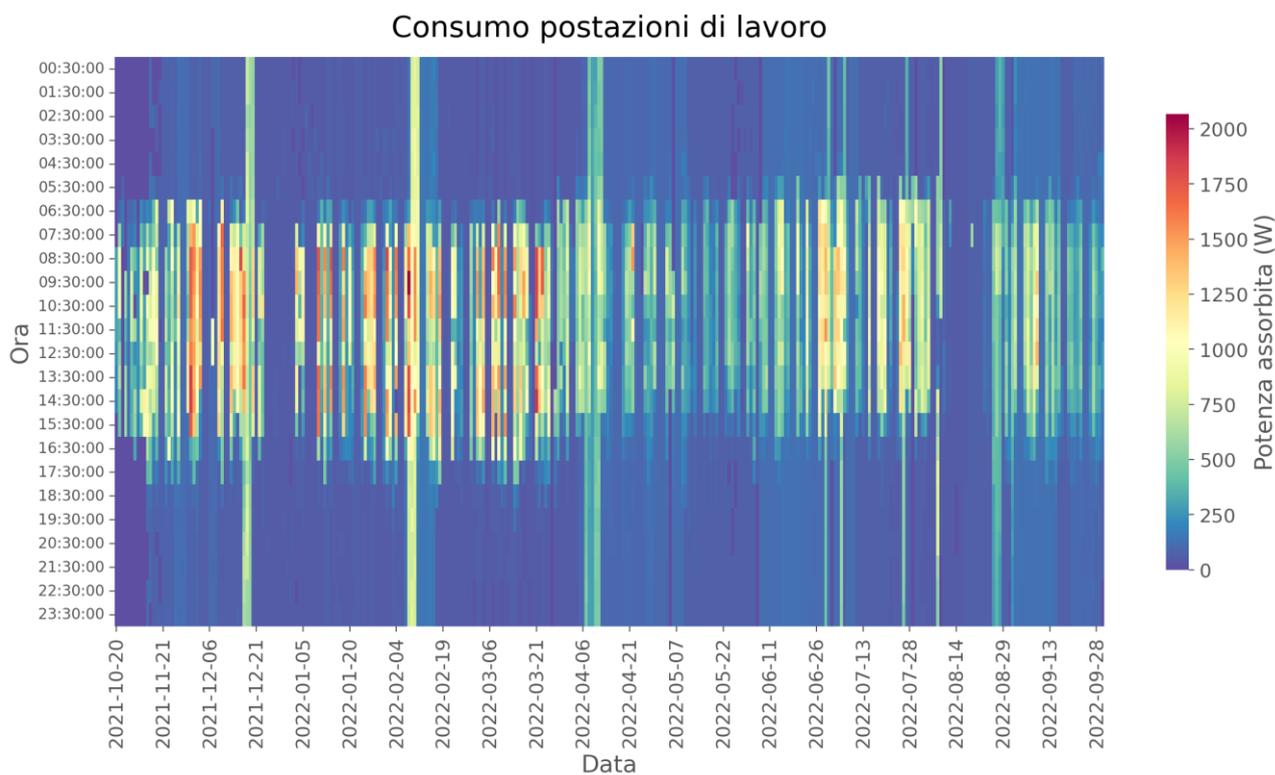


Figura 48: heat map dei consumi delle postazioni di lavoro

Si nota anche che il carico non supera raramente e di poco i 2 kW.

Per quanto riguarda l'RF, questo ha un valore discreto: che dipende da un carico distribuito per circa il 68,5 % in fascia F1 e per circa il 31,5 % nelle fasce F2 ed F3. Il consumo totale, per l'assenza di vari dati, è sottostimato così come il consumo in orario di lavoro e al di fuori di esso. Il rapporto RF e le altre percentuali, supponendo una distribuzione uniforme dei dati mancanti e simile a quelli presenti, non sono sostanzialmente affetti da errore.

Infine si nota che alcuni ricercatori iniziano a lavorare la mattina molto presto e questo fatto porta ad un incremento del consumo in fascia F2.

Parametro	Valore
Consumo totale	1850 kWh
RF	47,8 %
Consumo nell'orario di lavoro	1290 kWh
Percentuale di consumo nell'orario di lavoro	69,7 %
Consumo al di fuori dell'orario di lavoro	560 kWh
Percentuale di consumo al di fuori dell'orario di lavoro	30,3 %
Consumo al metro quadro	>47 kWh/(mq·a)*

*Tabella 11: KPI relativi al consumo delle postazioni di lavoro. *Il consumo, rapportato alla superficie calpestabile dei soli uffici effettivamente usati, è sottostimato a causa della mancanza di alcuni dati.*

4.3.6 Consumo elettrico illuminazione

L'illuminazione prevede un impianto realizzato completamente a LED che permette di contenere notevolmente i consumi. Sarebbe anche interessante analizzare il fattore di potenza in quanto in generale gli alimentatori elettronici dei LED, se di bassa qualità, portano ad avere dei carichi induttivi tali da richiedere un adeguato dimensionamento dei cavi che ne tenga conto e una elevata distorsione armonica. Per questo genere di analisi si rimanda a studi futuri.

Le linee elettriche dell'impianto di illuminazione partono da un contattore trifase che è a sua volta controllato da un interruttore posizionato all'ingresso del piano uffici: spegnendo questo interruttore si spengono tutte le luci del piano e si accende una luce di cortesia nell'androne di ingresso. Questo stratagemma permette all'ultimo che lascia gli uffici di spegnere tutte le luci anche nel caso in cui qualcuno le abbia dimenticate accese nel proprio ufficio.

La *heat map* in Figura 49 non mostra un chiaro andamento dei consumi poiché ci sono delle zone non blu anche nelle ore notturne e nei festivi. Questo si spiega considerando che, anche se le luci sono completamente spente negli uffici, resta sempre accesa la luce nell'ingresso per cui resta un consumo minimo. Inoltre, data la grande quantità di luce naturale e l'efficienza dell'impianto, le luci sono poco accese e il consumo è basso.

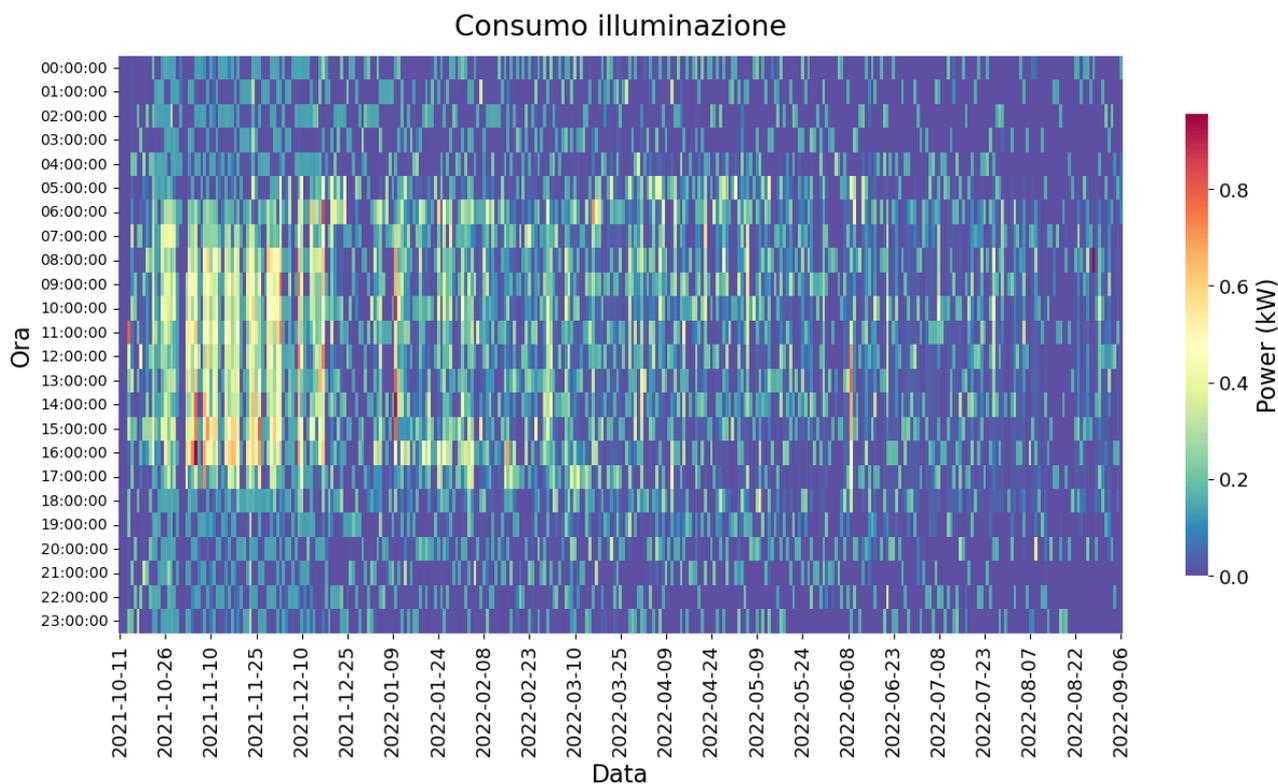


Figura 49: heat map dei consumi per l'illuminazione

Si osserva che la potenza assorbita, nello stato di occupazione attuale degli uffici, non supera praticamente mai gli 800 W. Nel caso di un cambio delle modalità d'uso ci si attende che il consumo massimo vari di poco, ma che aumenti in modo abbastanza marcato il consumo medio: il consumo massimo è stato registrato in delle situazioni di occupazione quasi completa, una situazione raramente verificatasi che potrebbe diventare una costante in futuro qualora cambiassero le modalità lavorative.

Il grafico di Figura 50 si visualizza graficamente il consumo totale di energia giornaliero in kWh durante l'intero periodo preso in analisi.

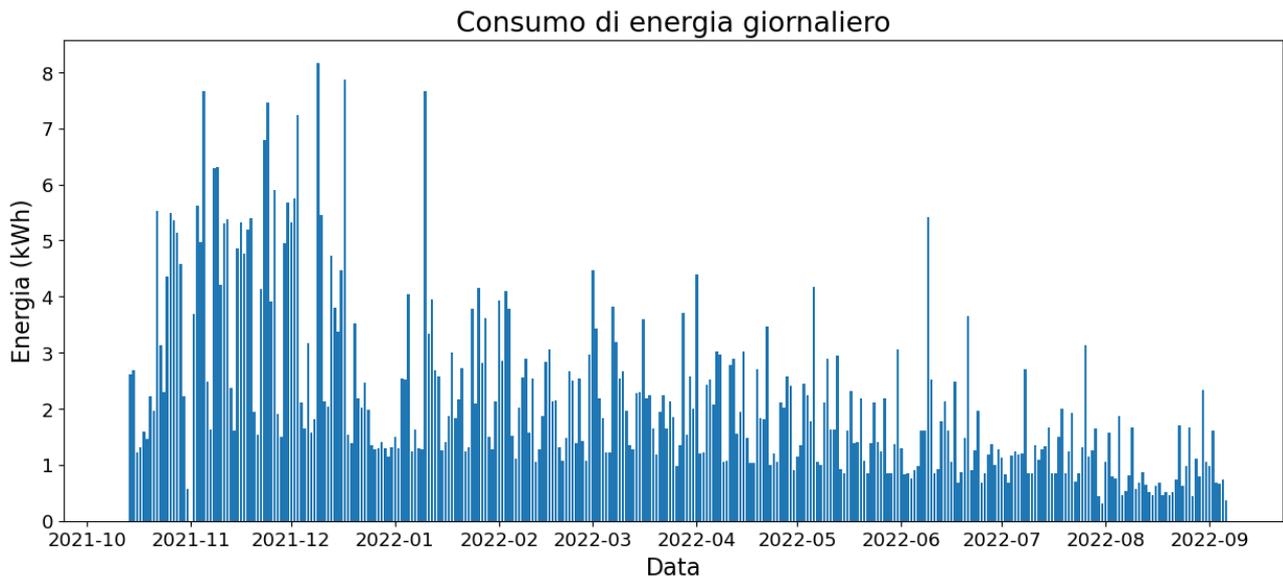


Figura 50: consumo di energia giornaliero per l'illuminazione

I valori più alti si sono avuti in corrispondenza di elevata presenza e cielo coperto nel periodo invernale quando le ore di luce sono minori. Si nota altresì un consumo “di base”, tra 1 e 1,5 kWh giornalieri, dipendere dalla luce all’ingresso e dalle luci di emergenza. Il fattore RF, per questa ragione e perché ci sono persone che arrivano particolarmente presto la mattina o che escono tardi la sera necessitando di luce, non è particolarmente basso.

Parametro	Valore
Consumo totale	714 kWh
RF	38,5 %
Consumo nell’orario di lavoro	408 kWh
Percentuale di consumo nell’orario di lavoro	57,2 %
Consumo al di fuori dell’orario di lavoro	306 kWh
Percentuale di consumo al di fuori dell’orario di lavoro	42,8 %
Consumo al metro quadro	>2 kWh/(mq·a)*

*Tabella 12: KPI relativi al consumo per illuminazione. *il consumo, rapportato alla superficie calpestabile di tutti gli ambienti effettivamente usati, è leggermente sottostimato per la mancanza di alcuni dati.*

4.3.7 Consumo elettrico per acqua calda sanitaria e asciugamani elettrici

Per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) sono presenti due boiler elettrici nei bagni, boiler che sono monitorati separatamente. Dall’analisi dei consumi salta subito all’occhio che la gestione è completamente differente. Dal confronto delle figure Figura 51 e Figura 52 si vede come in un caso il consumo è estremamente disperso nell’arco delle 24 ore e quasi costante, mentre nell’altro bagno

il consumo è concentrato tra le cinque di mattina e le sette di sera. Nel secondo caso è verosimile che il boiler sia stato programmato per non attivarsi nelle ore notturne. Inoltre, sempre nel secondo caso, si riconosce la scansione delle settimane che indica che nei fine settimana è sempre spento. Una gestione di questo tipo porta in generale ad un leggero risparmio di energia perché si riducono le dispersioni di calore. Tuttavia non è detto che si ottenga un risparmio economico perché il consumo si concentra nelle ore in cui il costo dell'energia è maggiore. Per ottenere un piccolo risparmio sarebbe opportuno disalimentare completamente i boiler durante le chiusure natalizia ed estiva.

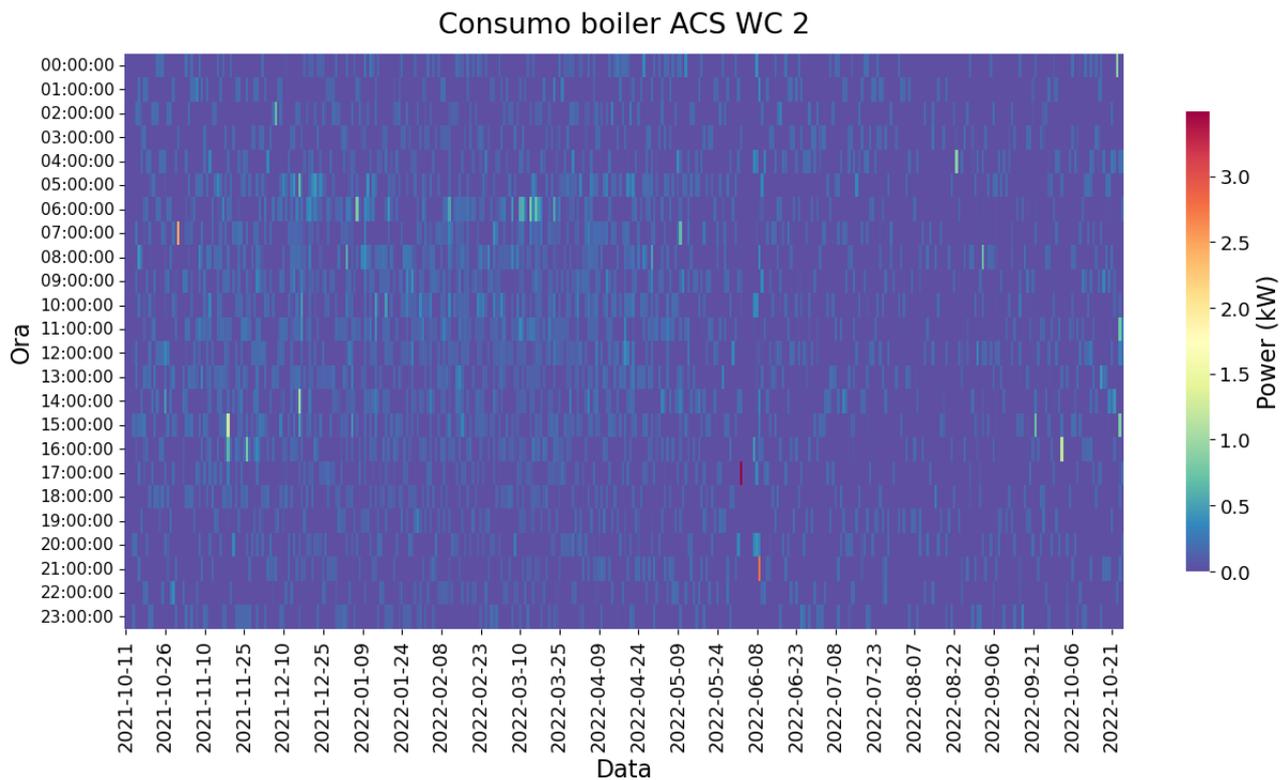


Figura 51: heat map dei consumi del boiler del XXX

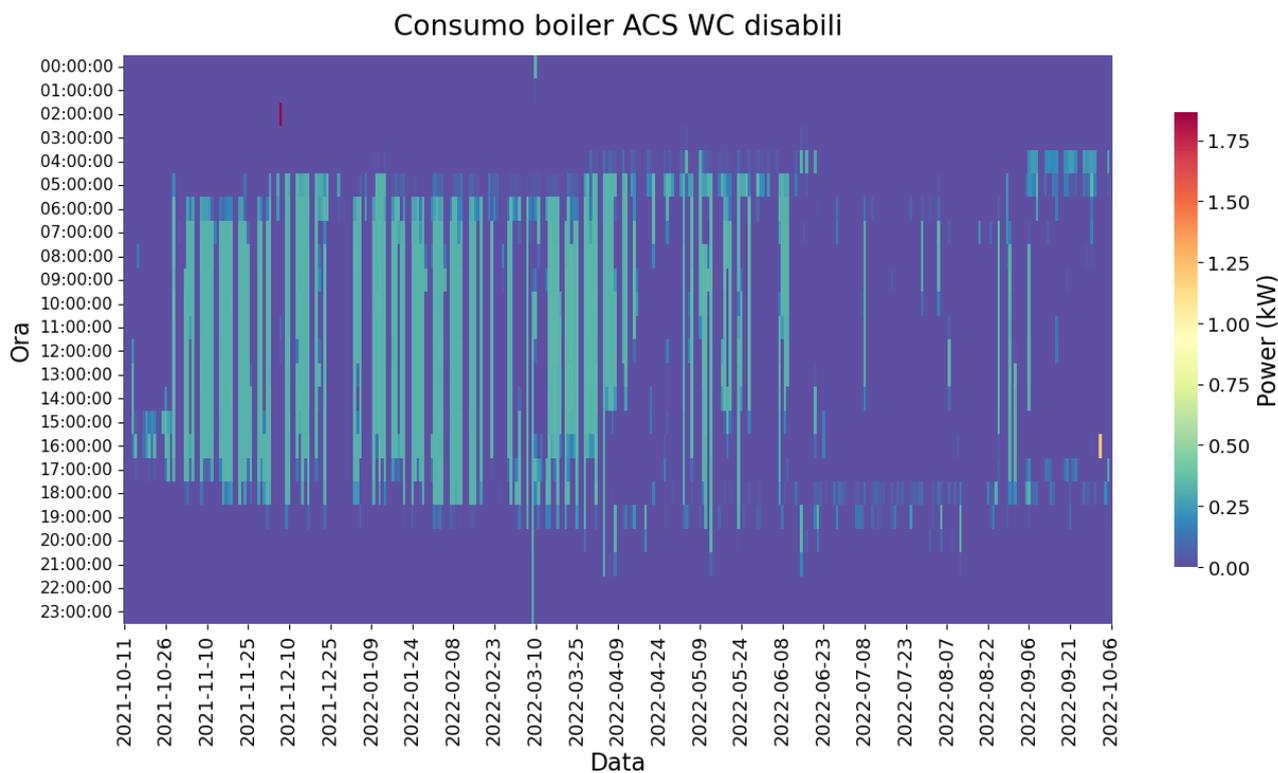


Figura 52: heat map dei consumi del boiler del WC disabili

Dalle figure Figura 53 e Figura 54 si possono fare circa le stesse considerazioni già fatte. Inoltre, mentre il profilo di consumo del primo è molto più piatto, il secondo presenta dei picchi maggiori come effetto dello spegnimento nel fine settimana per cui ad inizio settimana è necessario riscaldare l'acqua che si è raffreddata. Tuttavia, fornendo acqua al bagno maggiormente usato, anche nei giorni infrasettimanali ha un consumo maggiore.

Consumo di energia giornaliero boiler ACS WC 2

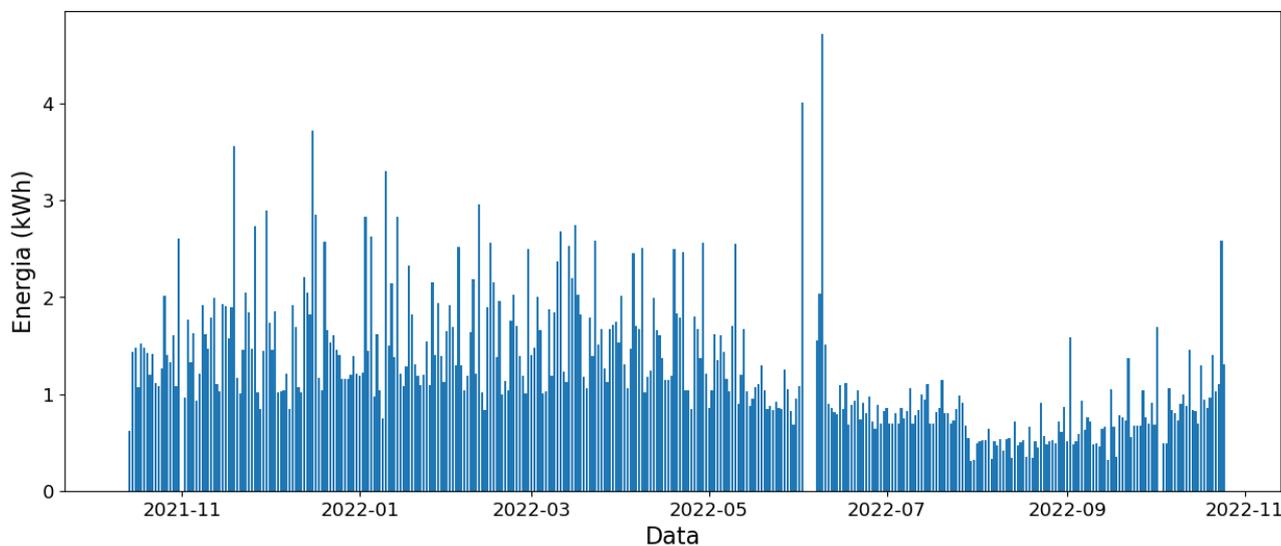


Figura 53: consumo di energia giornaliero del boiler del WC 2

Consumo di energia giornaliero boiler ACS WC disabili

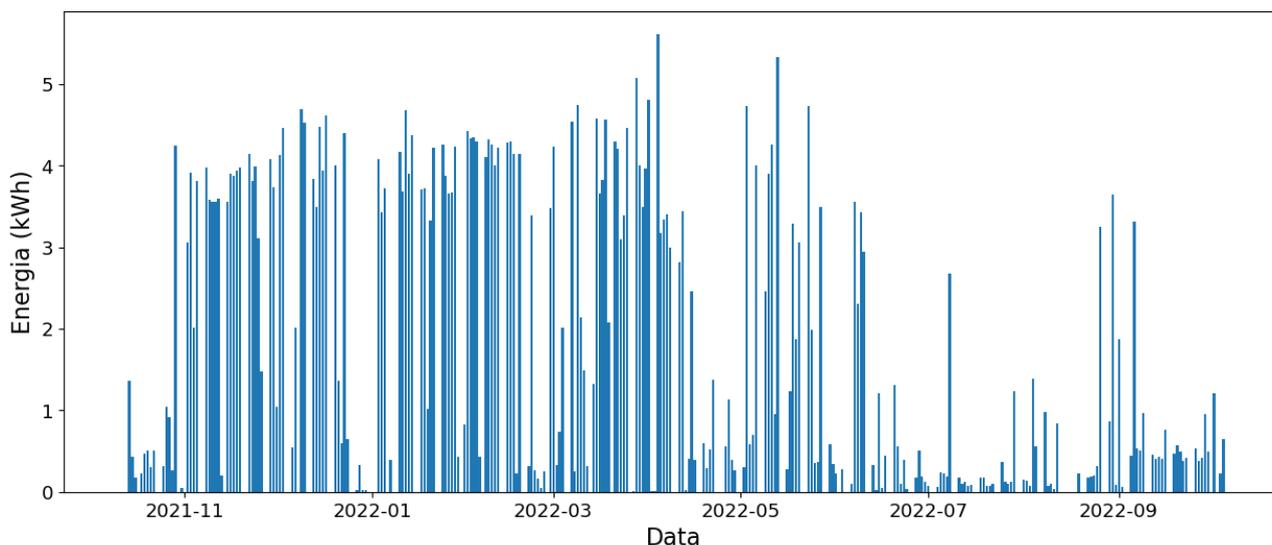


Figura 54: consumo di energia giornaliero del boiler del WC disabili

Il calcolo dell'RF mostra in modo chiaro le differenze di funzionamento:

Parametro	Valore
Consumo totale	471 kWh
RF	100,1 %
Consumo nell'orario di lavoro	213 kWh
Percentuale di consumo nell'orario di lavoro	45,2 %
Consumo al di fuori dell'orario di lavoro	258 kWh
Percentuale di consumo al di fuori dell'orario di lavoro	54,8 %

Tabella 13: KPI relativi al consumo per la produzione di ACS del boiler del WC disabili

Parametro	Valore
Consumo totale	492 kWh
RF	47,8 %
Consumo nell'orario di lavoro	404 kWh
Percentuale di consumo nell'orario di lavoro	82,1 %
Consumo al di fuori dell'orario di lavoro	88 kWh
Percentuale di consumo al di fuori dell'orario di lavoro	17,9 %

Tabella 14: KPI relativi al consumo per la produzione di ACS del boiler del WC donne.

Si considera un valore complessivo di consumo al metro quadro, che corrisponde a circa 2 kWh/(mq·a). Come i precedenti valori, anche questo è leggermente sottostimato.

Nell'ottica della produzione di energia rinnovabile è auspicabile restringere il tempo di funzionamento alle ore di produzione da fotovoltaico per auto-consumare immediatamente l'energia prodotta e non sfruttare le batterie oppure, in un'ottica di flessibilità energetica della domanda, se richiesto dall'operatore di rete, si può anticipare il riscaldamento dell'acqua alle prime ore del mattino per attuare una logica di *peak shaving*. Questo è possibile perché dato il buon isolamento, l'acqua riscaldata può essere mantenuta calda per varie ore. Sempre per lo stesso motivo, il boiler può essere spento nel pomeriggio già qualche ora prima che il personale lasci gli uffici.

4.3.8 Consumo elettrico generale

Tra i vari monitoraggi, c'è anche il monitoraggio del generale di tutto il piano di uffici. Purtroppo la continuità del monitoraggio non è stata massima e si sono avuti dei "buchi" di dati, ma i risultati restano validi anzitutto per l'aspetto della distribuzione dei consumi nelle 24 ore e nelle stagioni. Nella Figura 55 le bande bianche indicano mancata comunicazione da parte dei misuratori installati, misuratori diversi per ognuna delle tre fasi dell'impianto elettrico. Per il calcolo del consumo totale si sono considerati solo i periodi in cui i tre dati erano contemporaneamente presenti, per cui complessivamente si è lavorato con l'87% dei dati.

Per quanto riguarda il consumo di energia totale, invece, più avanti nella trattazione si fa riferimento al valore totalizzato memorizzato nella memoria non volatile del misuratore. Infatti, anche in mancanza di comunicazione col cloud, se il misuratore funziona correttamente, ha un totalizzatore che registra il consumo incrementando un progressivo.

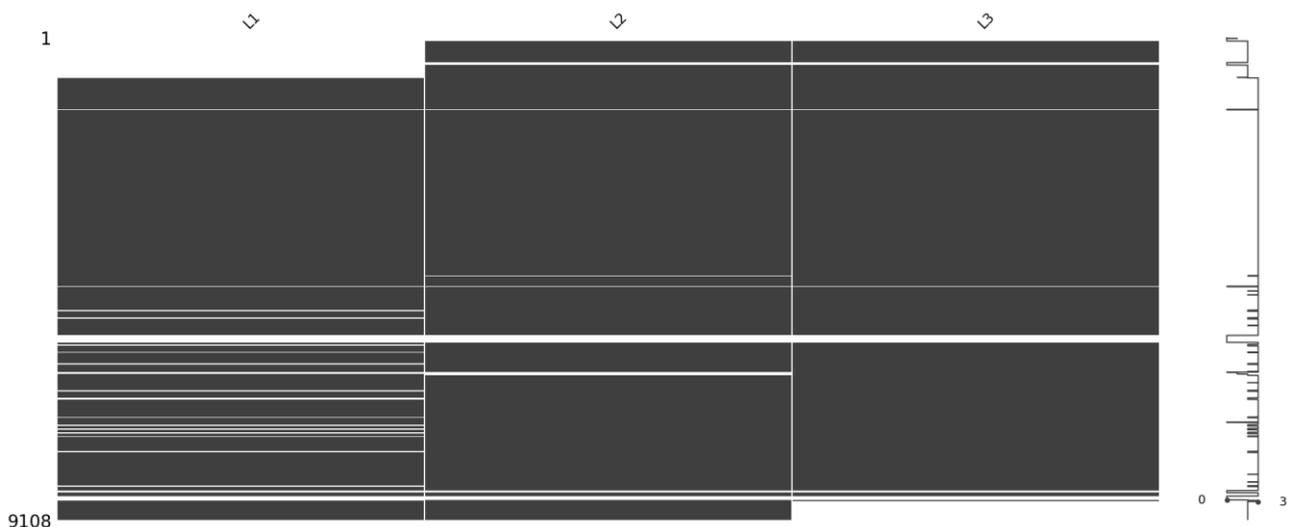


Figura 55: rappresentazione grafica dei dati mancanti (NaN): le zone grigie rappresentano la presenza dei dati, le zone bianche dei dati mancanti. Le colonne indicano la fase a cui è collegata la pinza amperometrica.

Poiché nel primo periodo di monitoraggio e nell'ultimo prima dell'analisi si evidenziano costanti problemi di comunicazione da parte di alcuni *smart meter* e similmente in un periodo intermedio, questi intervalli temporali sono stati rimossi.

Dalla *heat map* di Figura 56 si osserva che da novembre ad aprile si è avuto un consumo costante durante la notte e durante i fine settimana dovuto principalmente al funzionamento continuo dei radiatori per il riscaldamento dei bagni. La zona blu tra dicembre e gennaio corrisponde al periodo di chiusura in cui il consumo è stato minimo e corrispondente a quello degli apparati di rete e dei pc e server usati da remoto. Ad agosto si ha una zona scura in corrispondenza della chiusura estiva, tuttavia in questo periodo il consumo "residuo" è maggiore per il funzionamento del climatizzatore per mantenere la temperatura richiesta nella stanza con gli apparati di rete.

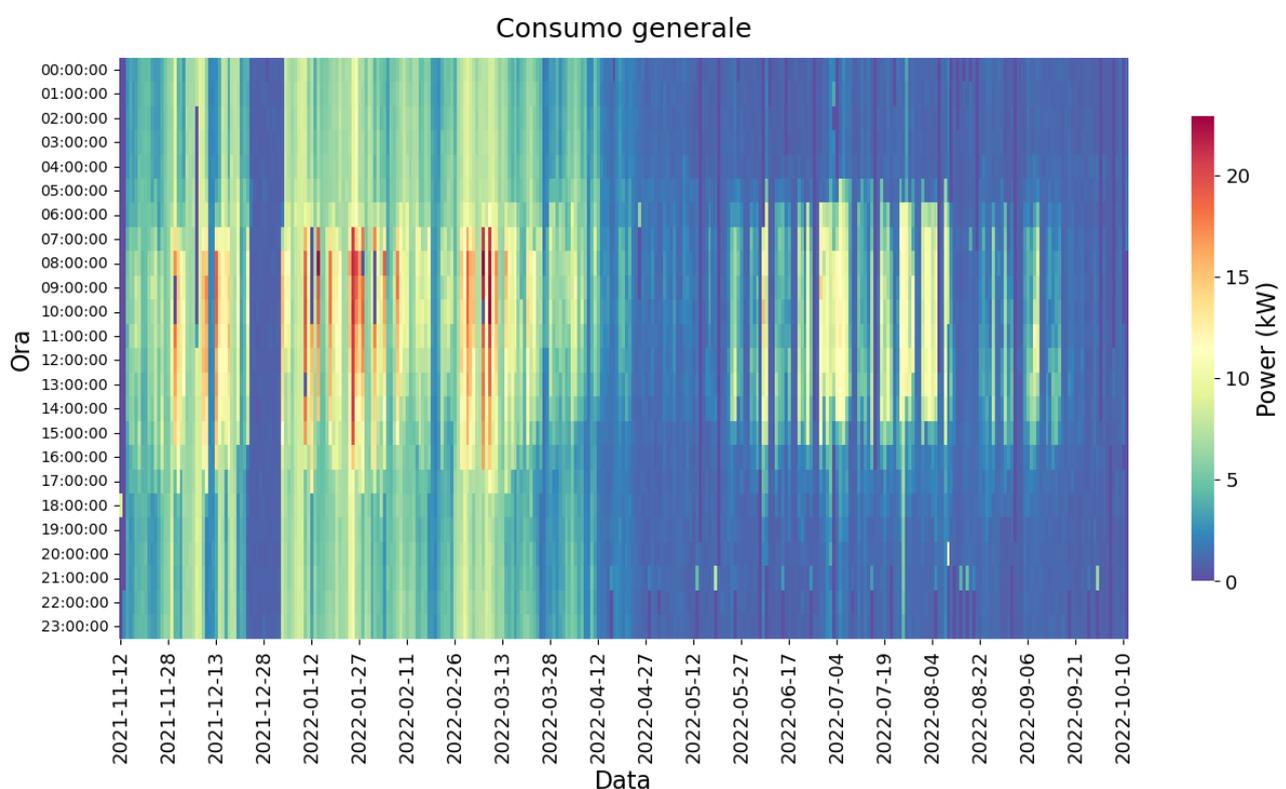


Figura 56: *heat map* del consumo complessivo misurato nel quadro elettrico generale

Proseguendo le analisi su base oraria, si è disegnata una cumulata di frequenza (Figura 57) che mostra in ordinata il carico medio orario in kW e in ascissa la percentuale di tempo in cui questo è stato inferiore ad un determinato valore. Il valore massimo misurato, di poco superiore ai 20 kW, è quello dato dalla massima contemporaneità dei carichi avuta con l'effettiva presenza di persone tra ottobre 2021 e ottobre 2022, così come per il resto della curva. Se la presenza fosse sempre al 100% ci si attende un incremento del valore di picco per la contemporaneità dei carichi, ma soprattutto un incremento dei valori intermedi con una zona centrale più piatta ed alta ad indicare un consumo medio maggiore.

Come ultimo grafico si riporta il consumo di energia giornaliero in kWh (Figura 58). Anche qui è evidente il maggiore consumo invernale rispetto a quello estivo. Questa visualizzazione grafica sarà ripresa più avanti per confrontare il fabbisogno energetico con la produzione da un eventuale impianto fotovoltaico da installare sul tetto.

Si riportano gli indicatori di prestazione per il consumo complessivo. Tuttavia è necessaria una precisazione: il consumo generale è calcolato a partire dal valore totalizzato che resta nella memoria del dispositivo, mentre le percentuali derivano da calcoli che, andando ad analizzare ora per ora i consumi, non comprendono i periodi in cui è mancata la comunicazione, quindi se i rapporti tra fasce di consumo non presentano errori consistenti, il consumo totale così calcolato potrebbe differire dal consumo reale.

Parametro	Valore
Consumo totale	30495 kWh
RF	91,4 %
Consumo nell'orario di lavoro	15137 kWh
Percentuale di consumo nell'orario di lavoro	49,6 %
Consumo al di fuori dell'orario di lavoro	15358 kWh
Percentuale di consumo al di fuori dell'orario di lavoro	50,4 %
Consumo al metro quadro rispetto alla superficie utilizzata	93,7 kWh/(mq·a)*
Consumo al metro quadro rispetto alla superficie totale	59,9 kWh/(mq·a)*

*Tabella 15: KPI relativi al consumo generale calcolati con l'87% dei dati. *Il consumo al metro quadro è esatto perché si è potuto ricavare il valore totale del consumo all'1/10/2022.*

	fPtot	fPnren	fPren
Fattore di conversione	2,42	1,95	0,47

Tabella 16: fattori di conversione dell'energia elettrica in energia primaria totale, rinnovabile e non rinnovabile. (Fonte: Regione Emilia Romagna)

En elettrica kWh/(m²·a)	EPtot kWh/(m²·a)	EPnren kWh/(m²·a)	EPren kWh/(m²·a)
93,7*	226,8	182,8	44,0
59,9**	145,0	116,9	28,2

*Tabella 17: conversione dell'energia elettrica consumata in energia primaria. *Il valore si riferisce alla superficie degli spazi effettivamente usati. **Il valore si riferisce alla superficie totale interna del piano uffici.*

Distribuzione potenza media oraria generale (kW)

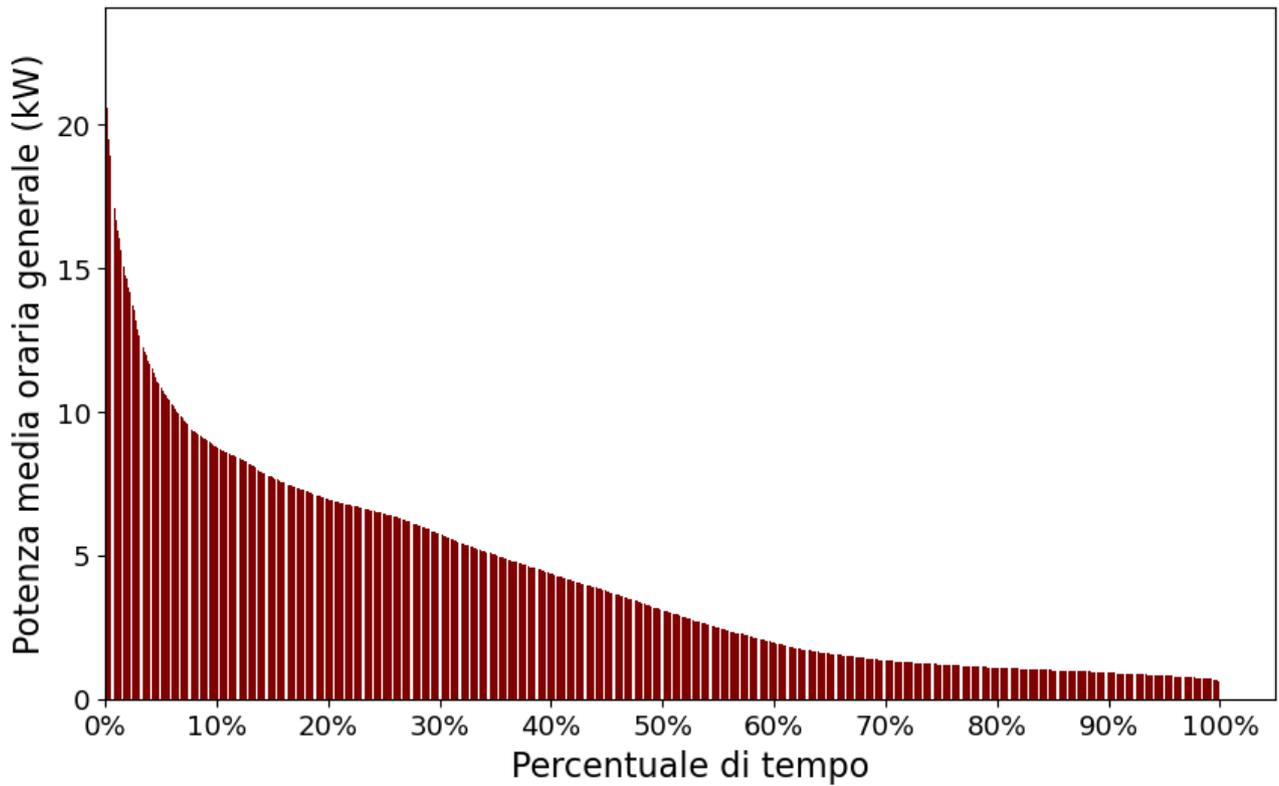


Figura 57: cumulata di frequenza: in ordinata è riportato il carico medio orario in kW, in ascissa la percentuale di tempo in cui il carico è stato inferiore ad un certo valore

Consumo di energia giornaliero

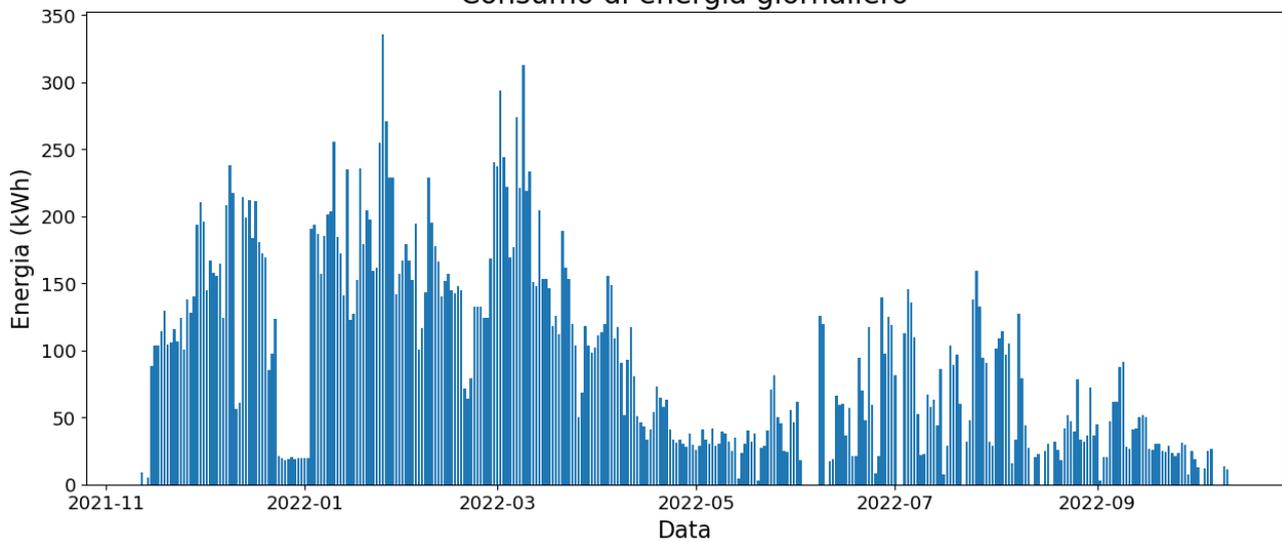


Figura 58: consumo giornaliero. Dove il consumo è nullo i dati non sono stati raccolti per più di 24 ore consecutive.

4.4 Firma energetica

La firma energetica di un edificio è un semplice strumento di monitoraggio e verifica delle prestazioni energetiche che correla la potenza termica media assorbita alla temperatura esterna media in periodi di misura regolari. In riscaldamento, ad esempio, è ovvio che più fa freddo, maggiore sarà la potenza media richiesta al generatore per riscaldare l'edificio. Specularmente, maggiore sarà la potenza di raffrescamento richiesta per raffrescare l'edificio più fa caldo.

La firma energetica si costruisce calcolando la potenza media erogata da un generatore di calore in un determinato intervallo di tempo (può andare dal mese fino all'ora con pro e contro) e la temperatura media esterna sulle 24 ore nel periodo considerato. La potenza media si può calcolare come combustibile (o corrente elettrica) consumato correttamente moltiplicato per il potere calorifico diviso il numero di ore di funzionamento. I punti sono poi riportati in un grafico con la temperatura in ascissa e la potenza termica media in ordinata e si traccia la retta di regressione: i punti dovrebbero allinearsi all'incirca lungo una retta perché le dispersioni di calore variano proporzionalmente con la differenza di temperatura tra interno ed esterno e di conseguenza la potenza termica.

La frequenza delle letture, come si diceva, può variare da mensile, che presenta dati mediati, ma poco correlati alle condizioni climatiche, ad orari, estremamente sensibile ad effetti dinamici, al "prima" e al "dopo" portando a dati estremamente dispersi. Un periodo giornaliero potrebbe essere abbastanza influenzato da effetti dinamici, quindi non abbastanza lungo da mediare gli effetti dei transitori quotidiani nel caso di un uso intermittente dell'edificio. Un periodo settimanale spesso è la soluzione ideale perché in grado di mediare adeguatamente i transitori e di cogliere la variazione climatica.

Dalla firma energetica si possono estrarre in modo semplice molte informazioni utili.

- **Temperatura esterna di accensione dell'impianto:**

punto in cui la retta di regressione incontra l'asse delle ascisse: come evidenziato in rosso nella Figura 59, la temperatura esterna a cui diventa necessario accendere gli impianti di riscaldamento è minore della temperatura interna che si vuole mantenere grazie alla presenza degli apporti di calore interni gratuiti come elettrodomestici, macchinari, cucine, l'irraggiamento solare e la presenza di persone.

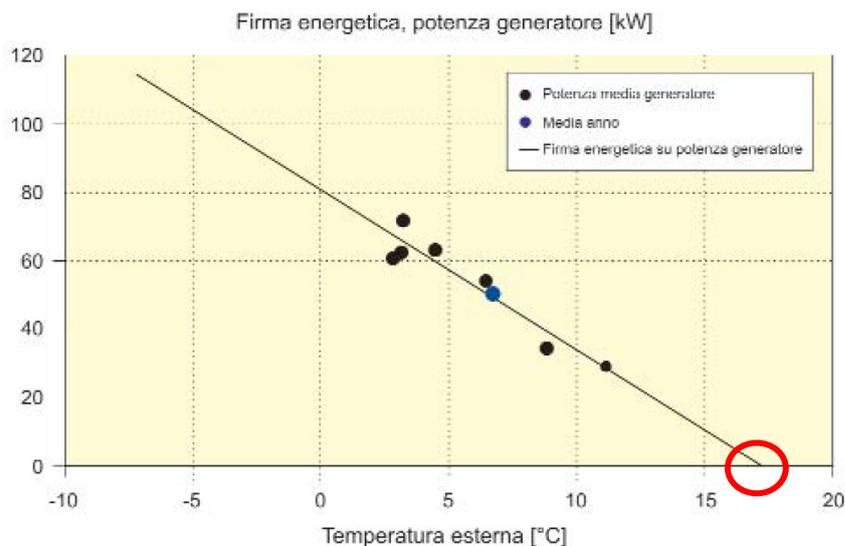


Figura 59: firma energetica: si evidenzia in rosso la temperatura a cui si accende l'impianto (Immagine tratta dalla rivista Progetto 2000, n. 36, giugno 2009, Edilclima)

Inoltre, la temperatura di accensione è indice della temperatura interna che si desidera mantenere e della bontà dell'isolamento termico dell'edificio.

- **Dimensionamento del generatore**

Prolungando la retta di regressione fino alla temperatura esterna di progetto si ricava la potenza del generatore necessaria a mantenere la temperatura degli ambienti che si è tenuta nel periodo di rilevamento. Se si volesse tenere una temperatura più alta di quella con cui sono stati fatti i rilevamenti la potenza sarebbe maggiore, se si volesse una temperatura più bassa, la potenza necessaria sarebbe minore.

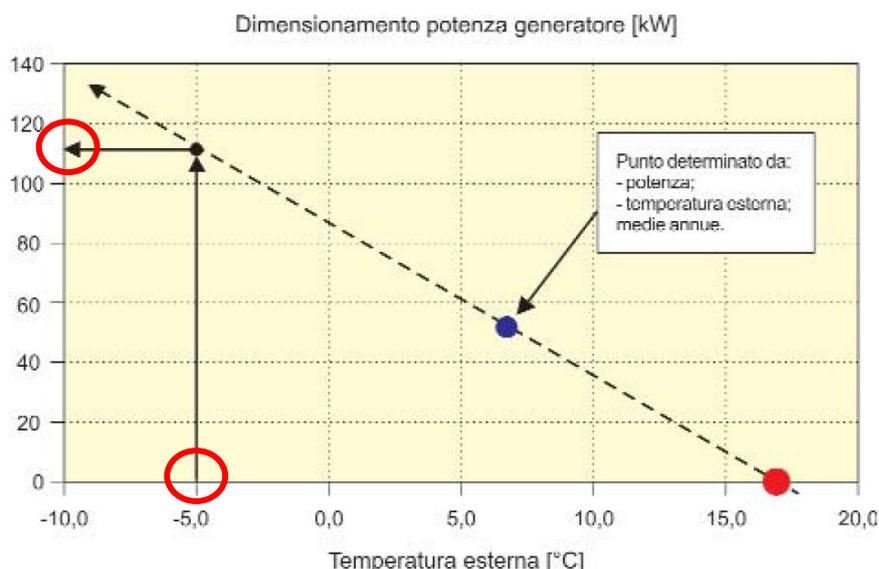


Figura 60: firma energetica: si evidenzia con un cerchio in rosso la potenza del generatore necessaria al riscaldamento dell'edificio e la corrispondente temperatura di progetto esterna (Immagine tratta dalla rivista Progetto 2000, n. 36, giugno 2009, Edilclima)

- **Consumo per acqua calda sanitaria e perdite di impianto**

Proseguendo le rilevazioni anche nel periodo estivo, si può osservare che resta un consumo di base: è il consumo per la produzione dell'acqua calda sanitaria più le eventuali dispersioni dell'impianto. Essendo queste all'incirca una costante e quindi presenti anche in inverno, traslano la retta verso l'alto. La Figura 61 riporta in rosso la firma energetica in presenza di consumo di acqua calda sanitaria e dispersioni costanti e quella che sarebbe la retta in loro assenza. I punti neri più a destra, che tendono ad allinearsi ad un valore costante, indicano il consumo di base in assenza di riscaldamento.

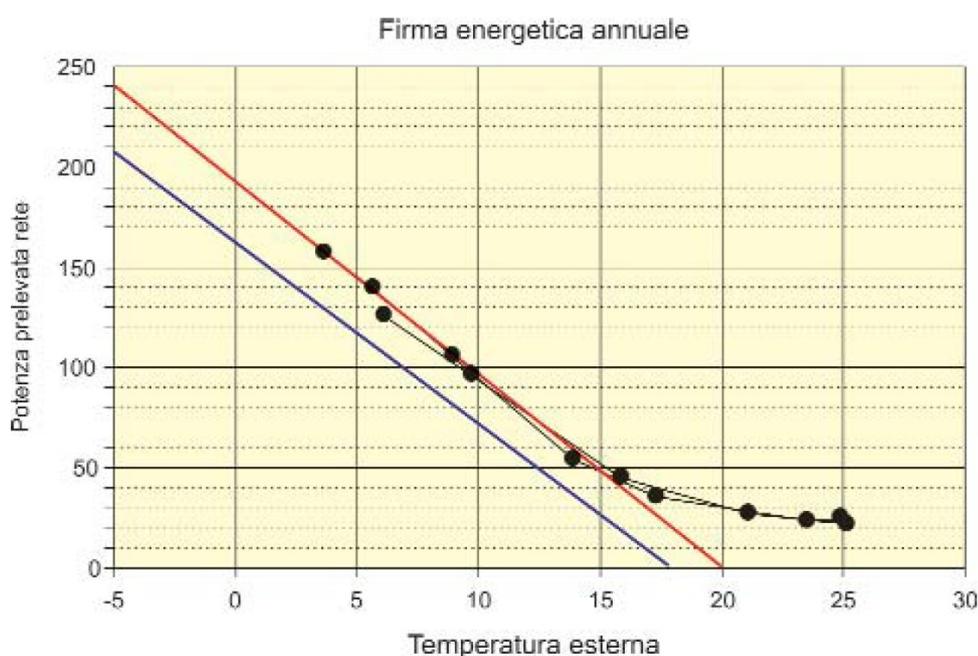


Figura 61: firma energetica in presenza di consumi di base circa costanti quali acqua calda sanitaria e dispersioni dell'impianto (dalla rivista Progetto 2000, n. 36, giugno 2009, Edilclima)

- **Qualità dell'isolamento termico**

La pendenza H della curva, indicata nella Figura 62 indica la sensibilità dell'edificio alla variazione della temperatura esterna: maggiore la pendenza, maggiore la variazione di potenza richiesta al generatore per soddisfare il fabbisogno termico.

- **Individuazione problemi di impianto e variazioni di uso**

Ripetendo le misure nel tempo, anche in più anni diversi, nel caso in cui si osservino qualche punto che si distanzia molto dalla retta o una serie di punti che si allineano su una nuova rispetto a quella già tracciata, possono essersi verificate due situazioni: la prima è un degrado delle prestazioni del generatore e/o del sistema di regolazione, la seconda è che siano cambiate le abitudini d'uso delle persone che potrebbero aver variato la temperatura.

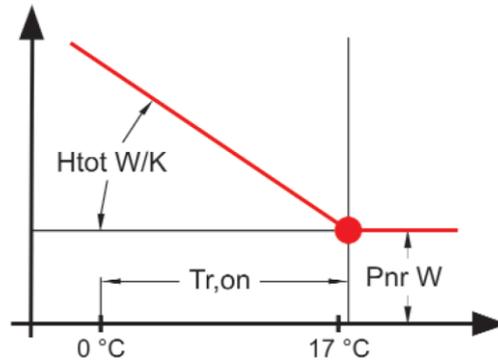


Figura 62: firma energetica con evidenziata la pendenza della retta, la temperatura di accensione dell'impianto e il consumo costante di base (dalla rivista Progetto 2000, n. 36, giugno 2009, Edilclima)

- **Firma energetica di progetto e in esercizio**

Nella progettazione termotecnica, dal calcolo dei fabbisogni termici è possibile ricavare una firma energetica, detta di progetto, che indica qual è il comportamento atteso dell'edificio. In fase di esercizio, dalla lettura dei consumi si può ricavare la firma energetica reale. Nel caso in cui i calcoli siano stati ben fatti e la realizzazione degli impianti e dell'involucro dell'edificio ben realizzati si ha una sostanziale sovrapposizione tra le due rette. Se invece non si ha sovrapposizione è opportuno indagare sull'origine delle discrepanze. La firma energetica risulta quindi anche uno strumento di controllo sulla progettazione e la realizzazione di eventuali lavori.

Dalle rilevazioni si potrebbero trovare dei punti dispersi nel piano: questo può essere dovuto a delle condizioni climatiche particolari come la presenza di forte vento magari con infissi dalla scarsa tenuta all'aria o di grandi apporti gratuiti oppure di errori nell'acquisizione.

Nel caso di edificio sia scarsamente isolato con ampie vetrate, quindi con elevati apporti termici gratuiti, principalmente solari, può essere necessario ricorrere al metodo H-m. Questo metodo, evoluzione della firma energetica, tiene conto di una variabile climatica che dipende dalla radiazione solare e dalla differenza tra la temperatura esterna e interna.

Nel caso in esame si sono calcolate le firme energetiche per ogni ufficio utilizzato poiché gli impianti di climatizzazione sono completamente indipendenti e si ha un monitoraggio dei consumi per singola macchina. Si sono tracciate le firme considerando sia la potenza elettrica, sia la potenza termica calcolata come potenza elettrica misurata in un determinato momento per il COP (*coefficient of performance*) o l'EER (*energy efficiency ratio*) dichiarati dal produttore. I dati sono stati poi aggregati su base giornaliera e su base settimanale per disegnare due diverse curve. Il procedimento è stato ripetuto sia per il caso invernale, sia per quello estivo.

COP ed EER sono dati dal produttore per alcune temperature specifiche quindi, per tutte le altre temperature, si è fatta una interpolazione lineare. Inoltre, nel caso invernale si è esteso il campo fino a 15°C, oltre il valore dichiarato dal produttore per 12°C prolungando la retta che collega i punti a 7

e 12°C. Similmente per il caso estivo in cui si sono ipotizzate le prestazioni della macchina fino a 42°C prolungando il segmento tra gli ultimi due punti forniti.

Le potenze medie sono state calcolate considerando le effettive ore di funzionamento. Si sottolinea che le ore di accensione degli impianti sono molto variabili essendo in vigore un regime di lavoro agile, tale per cui l'orario di lavoro è varia nei giorni e in alcuni giorni alcune persone sono del tutto assenti. Questo ha certamente influito sulla dispersione dei punti.

Nella Figura 63 si riportano le firme energetiche invernali nella parte alta ed estive nella parte bassa disegnate considerando la potenza termica a sinistra e quella elettrica a destra. Si è preso l'ufficio 15 come esempio, ma la stessa cosa si rileva in misura un po' maggiore o minore per tutti gli altri uffici climatizzati.

Firme energetiche con frequenza giornaliera ufficio 15

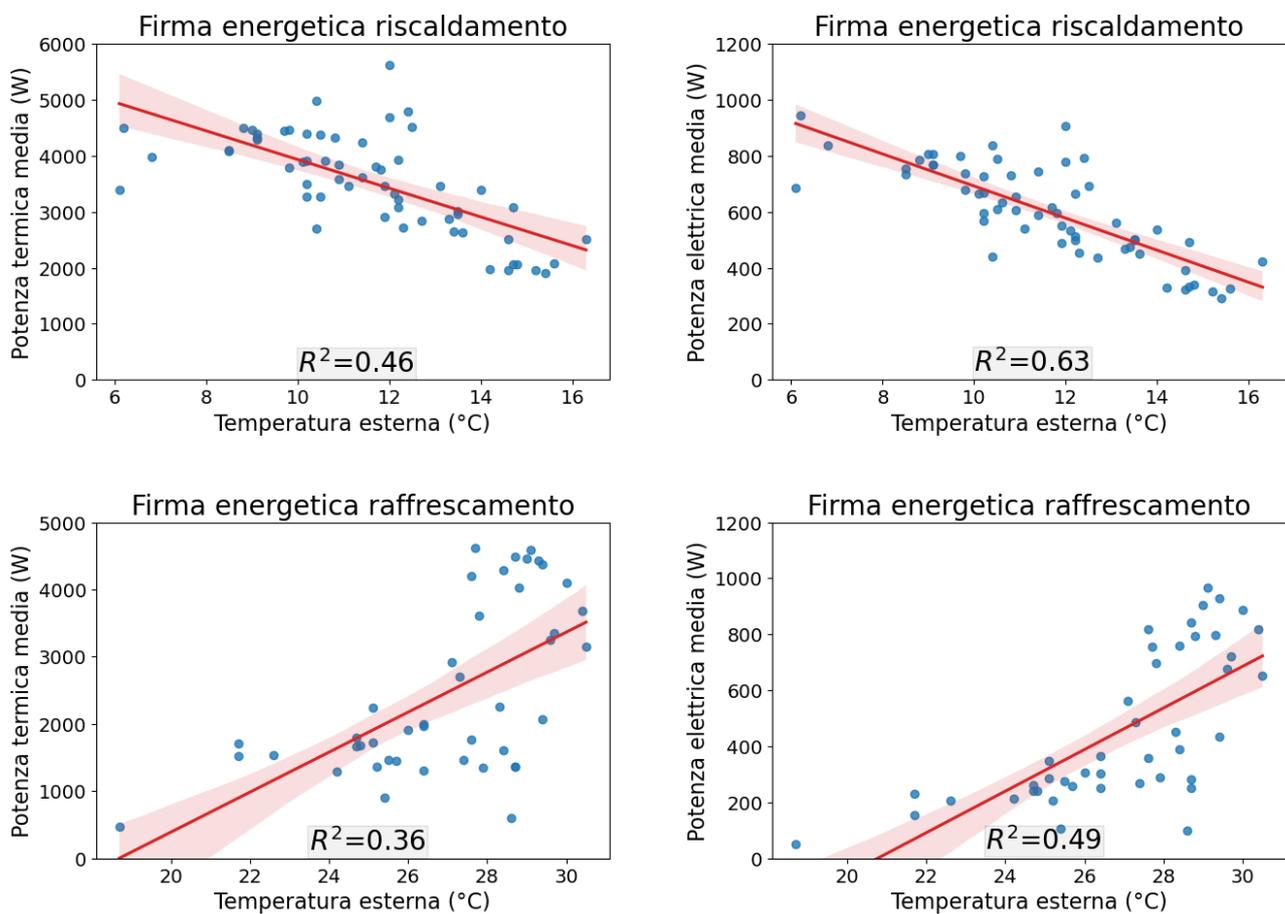


Figura 63: firme energetiche ufficio 15 realizzate con dati aggregati con frequenza giornaliera. I grafici a destra riportano la potenza elettrica e hanno una scala differente sull'asse delle ordinate.

Delle rette disegnate si riportano nella Tabella 18 i coefficienti di determinazione R^2 che indicano quanto bene la retta riesce ad interpolare i punti:

Firma energetica	Coefficiente di determinazione R²
Riscaldamento, potenza termica media	0,46
Riscaldamento, potenza elettrica media	0,63
Raffrescamento, potenza termica media	0,36
Raffrescamento, potenza elettrica media	0,49

Tabella 18: coefficienti di determinazione delle rette di regressione delle firme energetiche con dati aggregati su periodi di un giorno.

Si osserva che i punti sono molto dispersi, nel caso estivo in particolare, e di conseguenza i coefficienti di determinazione sono molto bassi. Risultano più alti nel caso in cui si usi nel calcolo la potenza elettrica media.

Per migliorare la qualità del grafico si sono fatti alcuni tentativi come eliminare per ogni giorno la prima ora di funzionamento o di ridurre il peso applicando un coefficiente moltiplicativo minore di uno. I risultati non sono stati soddisfacenti mostrando solo nel secondo caso un miglioramento del coefficiente di determinazione alla seconda cifra decimale. Si è quindi scelto di calcolare la firma energetica aggregando i valori su base settimanale.

Nella Figura 64 sono rappresentate le firme energetiche disegnate aggregando i dati su un periodo di una settimana in modo da mediare gli effetti transitori all'accensione e gli effetti della capacità termica delle strutture che fanno sentire gli effetti delle variazioni di temperatura esterna con ritardo all'interno. Nella Tabella 19 si riportano i coefficienti di determinazione delle nuove rette di regressione: si osserva come, considerando un periodo di una settimana, i valori crescano molto, in particolare quelli relativi alla potenza termica.

Firma energetica	Coefficiente di determinazione R²
Riscaldamento, potenza termica media	0,64
Riscaldamento, potenza elettrica media	0,70
Raffrescamento, potenza termica media	0,43
Raffrescamento, potenza elettrica media	0,57

Tabella 19: coefficienti di determinazione delle rette di regressione delle firme energetiche con dati su periodi di una settimana

Resta tuttavia una dispersione per nulla trascurabile che può essere ricondotta al fatto che l'edificio presenta amplissime superfici vetrate con finestre che occupano l'intera parete di ogni stanza e un vetro singolo senza alcun trattamento, per cui l'apporto solare è notevole. Inoltre, l'edificio si colloca in una zona abbastanza ventosa e il piano qui studiato, il settimo, svetta rispetto agli altri edifici per cui non ha alcuna protezione rispetto al vento. Le finestre sono ancora quelle originali dell'edificio con una scarsa tenuta all'aria e, in qualche caso una chiusura difficile e non completa a causa dell'usura. È quindi verosimile che questi fattori abbiano un'influenza notevole sulle prestazioni energetiche rendendo la struttura molto sensibile anche ad altre variabili climatiche.

Quanto ai dati meteorologici si sono usati in prima battuta i dati gentilmente forniti dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, tuttavia non sempre hanno permesso di raggiungere una qualità dei risultati soddisfacente per il fatto che la stazione meteo più vicina si trova a Palese, a quasi 10 chilometri dalla sede ENEA. Successivamente se ne è cercata un'altra più vicina e quella individuata si trova a circa 500 metri in linea d'aria.

Firme energetiche con frequenza settimanale ufficio 15

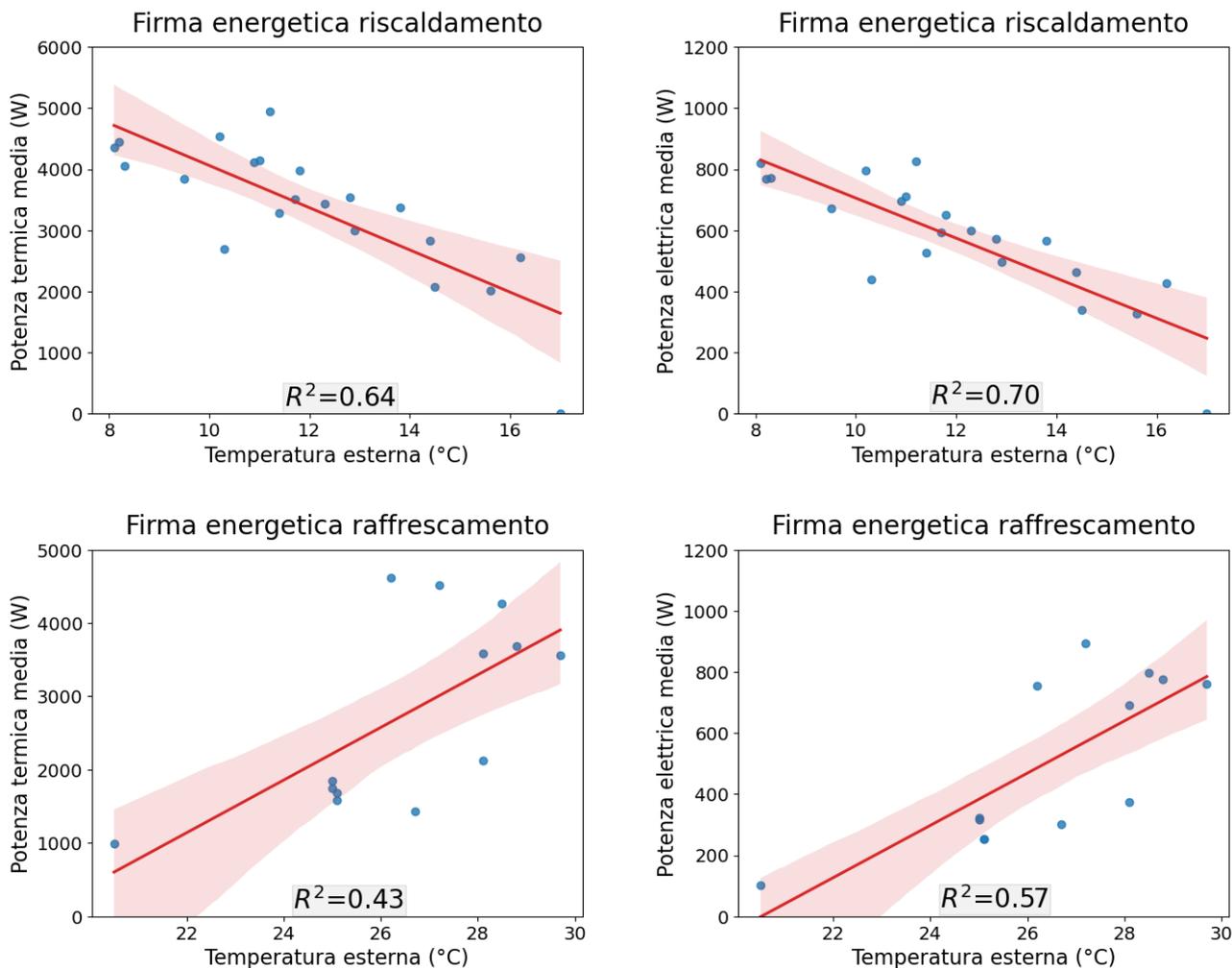


Figura 64: firme energetiche ufficio 15 realizzate con dati aggregati con frequenza settimanale. I grafici a destra riportano la potenza elettrica e hanno una scala differente sull'asse delle ordinate.

4.5 Previsione dei consumi sulla base della presenza

Come facile immaginare, la presenza di persone ha un'influenza sui consumi degli uffici. Ad ogni persona si associano, ovviamente, i consumi relativi alla propria postazione di lavoro con tutti i dispositivi elettronici associati e l'illuminazione, qualora la luce naturale non fosse sufficiente. Per quanto riguarda la climatizzazione, invece, la situazione può variare moltissimo in base al tipo di impianto: se l'impianto è centralizzato con controllo centralizzato, il suo consumo non varierà con la presenza o l'assenza del personale; se è centralizzato con controllo locale in ogni ambiente, potrà essere acceso o spento in base alla presenza e regolato perché ognuno abbia il miglior comfort termico. Con un sistema così si può programmare il funzionamento della climatizzazione in base ad un calendario ricalcando l'esatta presenza delle persone ottenendo un notevole risparmio. Tuttavia, se l'impianto deve essere acceso per garantire la climatizzazione anche ad un solo locale, si avranno consumi "parassiti" che non possono essere evitati: si può spegnere il terminale ambiente, ma se l'impianto è ad acqua, dovrà essere portato in temperatura tutto o in parte con le relative dispersioni termiche. Se l'impianto è decentralizzato, come nel caso oggetto di studio, ove sono presenti dei climatizzatori split, è possibile accendere esclusivamente gli impianti relativi ai locali effettivamente usati evitando qualsiasi tipo di consumo parassita. In quest'ultimo caso si ha la massima correlazione tra presenza e consumi per la climatizzazione.

4.5.1 Metodologia, strumenti di lavoro e previsione delle presenze

Al fine di capire quanto effettivamente i consumi siano influenzati dalla presenza delle persone, si è analizzata la presenza a partire dalle timbrature di una parte del personale che ha accettato di partecipare allo studio fornendo queste informazioni sensibili.

Si è inizialmente seguito un approccio cosiddetto "*data driven*", cioè guidato dai dati e basato su tecniche di *machine learning*, in cui non si è fatta una scrematura iniziale dei dati statisticamente rilevanti. Tuttavia, attraverso il calcolo dei coefficienti di correlazione, come ad esempio la correlazione di Pearson, si sono cercate le correlazioni effettivamente presenti tra i vari dati forniti agli algoritmi di *machine learning* per rendere i risultati un po' meno incomprensibili.

Gli algoritmi di machine learning potrebbero essere definiti un po' delle "scatole nere", ma sono dei modelli variazionali che mimano la relazione tra le variabili in ingresso senza una programmazione esplicita, ma in seguito all'esposizione a degli insiemi di dati di sufficiente dimensione usati per l'allenamento.

Partendo dalle informazioni reali di presenza, è stato allenato il primo algoritmo di machine learning, (ML), e precisamente il random forest, RF, con l'obiettivo di stimare la presenza di persone a partire dai dati di consumo e ambientali.

Il RF si basa sulla costruzione di una foresta di alberi decisionali creati ognuno scegliendo un insieme casuale di caratteristiche, dette *features*, su cui svolgere la predizione e scegliendo tutti gli alberi che permettono di minimizzare l'errore della previsione. Sulla base della media del valore previsto dai

vari alberi nel caso di una regressione, o del valore più frequente nel caso di una classificazione, viene dato il valore finale della predizione.

La Figura 65 mostra un esempio di albero decisionale e la Figura 66 l'insieme di alberi decisionali di un possibile RF per una previsione "ideale": in un compito di classificazione come quello rappresentato, ogni albero esegue la propria scelta e la scelta che presenta la "maggioranza dei voti" diviene la scelta finale dell'algoritmo.

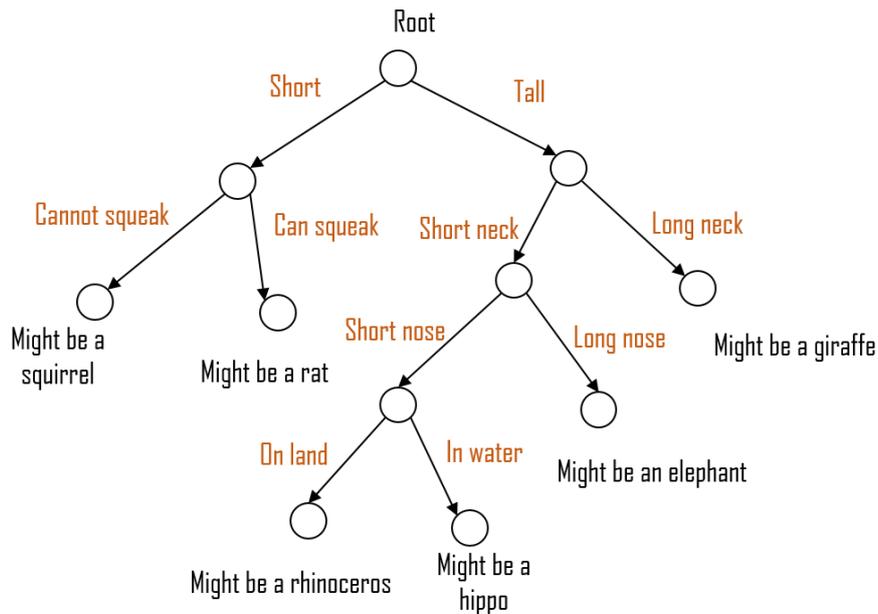
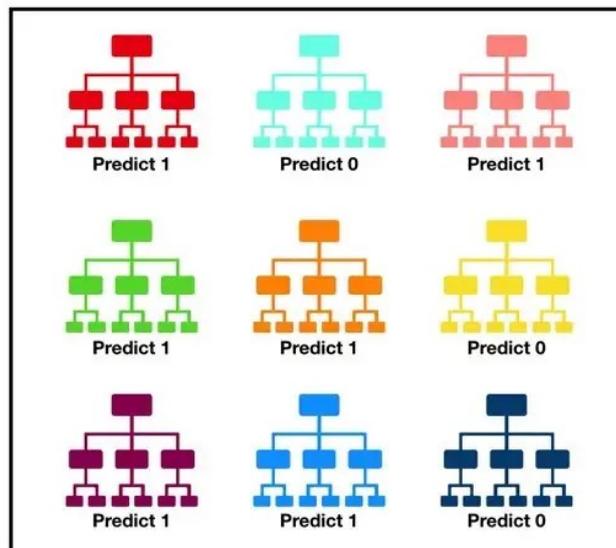


Figura 65: esempio di albero decisionale (fonte: Huawei)



Tally: Six 1s and Three 0s
Prediction: 1

Figura 66: insieme di alberi decisionali del random forest: ogni albero esegue una predizione, qui una classificazione, e la più "votata", 1, diventa la predizione finale (fonte: Towardsdatascience).

Questo algoritmo è stato allenato su una serie di dati noti di tipo ambientali, di consumo e di presenza del personale. Su questi dati il *random forest* presenta un'accuratezza nella predizione dell'89,3%, cioè è in grado di predire correttamente la presenza o l'assenza l'89,3% delle volte. Con l'algoritmo così allenato sono state stimate le presenze del restante personale. Combinando i risultati ottenuti, ossia le presenze predette, con i dati noti si è stimata la presenza globale del personale in quasi tutto il periodo di analisi. Purtroppo, infatti, in alcuni momenti la stima non è stata possibile a causa della mancanza dei dati di consumi di chi non ha fornito le proprie presenze in ufficio.

Nella prima iterazione del processo, l'algoritmo è stato allenato con tutti i dati che si riteneva avessero una correlazione, anche minima, con la presenza. I dati, secondo l'ordine di importanza inizialmente ipotizzata, sono:

- 1) potenza assorbita dalla postazione di lavoro: se c'è consumo, ci deve essere una persona che usa un pc, uno schermo o altro;
- 2) CO₂ equivalente o eCO₂: in presenza di persone il suo valore è maggiore del valore di fondo ambientale, di circa 415 - 420 ppm nel periodo preso in esame. Tuttavia, la sua crescita e decrescita all'arrivo e alla partenza di una persona è graduale e non fornisce un'informazione del tutto attendibile: nel caso dell'apertura delle finestre e forte aerazione, il valore può scendere fino al valore di fondo ambientale o, nel caso in cui una persona vada via dall'ufficio lasciando porta e finestre chiuse, il suo valore potrebbe decrescere molto lentamente e non fornire una chiara informazione sulla sua assenza;
- 3) potenza assorbita dal climatizzatore: poiché i climatizzatori sono usati quasi esclusivamente in presenza di persone, a meno delle volte in cui restano accesi di notte per dimenticanza, il loro consumo è un chiaro indicatore di presenza. Il dato, tuttavia, manca nelle mezze stagioni quando non è necessario climatizzare degli ambienti;
- 4) ora del giorno: nelle ore lavorative, all'incirca dalle 8 alle 18, è ragionevole aspettarsi la presenza di personale;
- 5) giorno della settimana: in concomitanza del sabato e della domenica il personale è assente;
- 6) temperatura ambiente: più alta in inverno e più bassa in estate in concomitanza con la presenza di persone per l'effetto della climatizzazione. Importante notare che l'informazione (correlata alla potenza per la climatizzazione) scaturisce dalla variazione della temperatura rispetto al periodo precedente e non rispetto ad un valore di fondo come avviene per la CO₂. Questo aspetto può essere colto meglio da un algoritmo in grado di valutare l'evoluzione temporale delle variabili;
- 7) stagione: presenta una doppia correlazione con la temperatura e il consumo per la climatizzazione. L'idea è che se in inverno la temperatura ambiente è maggiore rispetto al valore nelle ore notturne e il climatizzatore consuma, allora c'è una persona; similmente in estate; invece se si è in una mezza stagione, allora è meglio ignorare il consumo per la climatizzazione perché sarà sempre zero e fare affidamento unicamente sugli altri parametri.

Non si è considerata l'umidità relativa perché dipendente da troppe variabili.

Durante una rapida analisi dei dati si è subito notato che la eCO₂ mostrava andamenti del tutto inaspettati e a prima vista non correlabili con la presenza di persone. Si è quindi indagato questo aspetto:

le analisi e le conclusioni sono riportate più avanti nella trattazione, nel paragrafo 4.6. Ad ogni modo la eCO₂ in questo caso non può essere usata per predire la presenza ed è stata poi tolta.

A seguito dell'allenamento del *random forest*, usato sempre con gli iperparametri di default, si sono osservati dei comportamenti inattesi anzitutto nell'importanza che l'algoritmo attribuiva alle variabili come eCO₂ e temperatura. Da questo si è proseguito nell'allenare l'algoritmo con insiemi di variabili diversi e togliendone via via alcune che non portavano reale vantaggio come la eCO₂ e la temperatura, ma incrementavano i tempi computazionali. Infine si è deciso di togliere i giorni della settimana e di sostituirli con le chiusure della sede, ossia i fine settimana e le festività. Questo ha permesso di generalizzare la previsione evitando possibili *overfitting*, ossia che l'algoritmo impara troppo bene a predire i dati in una determinata situazione, ma quando si trova in una nuova situazione non è in grado di generalizzare, di fare previsioni corrette. Nel caso dei giorni della settimana il rischio, poi verificato, è stato che le persone su cui si è svolto l'allenamento avevano dei giorni di maggiore presenza e altri di minore per cui questo andamento veniva riproposto nella previsione con i dati completamente nuovi riducendone la qualità.

L'algoritmo così allenato ha raggiunto un'accuratezza dell'89,3% e la previsione sui nuovi dati, dopo una rappresentazione grafica, risulta soddisfacente. L'accuratezza, che indica la capacità di previsione, viene calcolata dividendo l'insieme dei dati di partenza tra insieme di allenamento, *train set*, e insieme di test, *test set*, usato per calcolarne il valore. L'insieme di test è stato scelto in modo tale da contenere il 20% dei dati totali scelti in modo casuale.

Nella Figura 67 si riporta l'importanza delle variabili scelte per allenare il RF ossia l'importanza che rivestono nella previsione della presenza. Le variabili più importanti sono anzitutto la potenza assorbita dalla postazione di lavoro, seguono la potenza del climatizzatore, che ad esempio nelle mezze stagioni non viene usato, e l'ora del giorno: di notte di certo non sarà presente nessuno. Infine, il dato sull'apertura della sede, indicato come "non_lavorativo", sembra avere un peso limitato.

In un secondo momento, per migliorare la previsione, si è scelto di cambiare algoritmo optando per il più recente XGBoost o Extreme Gradient Boosting. Questo algoritmo, ancora basato su alberi decisionali, presenta alcuni vantaggi rispetto al RF come una migliore capacità di predizione su dati tabellari e un'ottimizzazione abbastanza spinta nell'uso delle risorse di calcolo, che lo rende molto più veloce sia nella fase di allenamento, sia in quella di predizione. Con questo algoritmo è stato possibile migliorare leggermente l'accuratezza della previsione che è salita al 90,7%, con un aumento di 1,4 punti percentuali. Un incremento non grande, ma che si può considerare soddisfacente. Sono stati usati gli iperparametri di default.

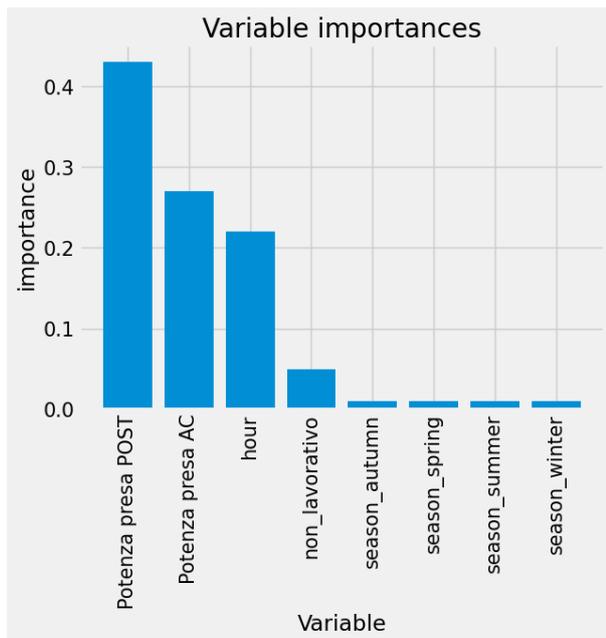


Figura 67: importanza delle variabili nell'allenamento dell'algoritmo RF

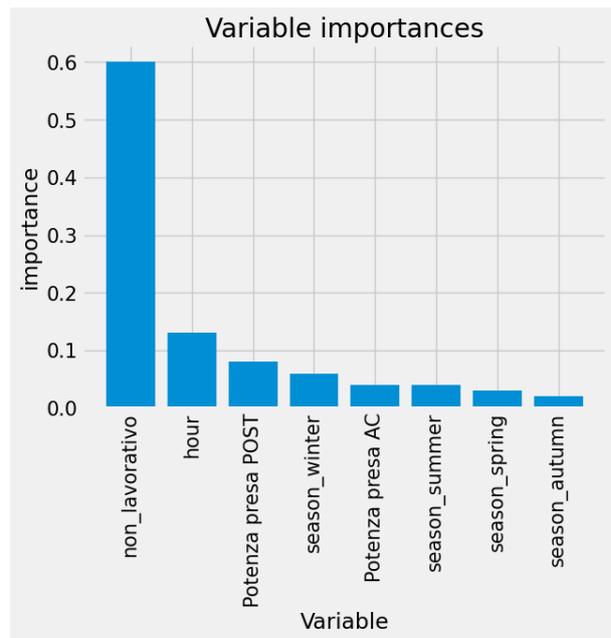


Figura 68: importanza delle variabili nell'allenamento dell'algoritmo XGBoost

Dalla Figura 68 risalta il cambio di importanza delle variabili: il funzionamento di questo algoritmo prevede di allenare una serie di “studenti deboli”, chiamati in inglese *weak learners*, ognuno dei quali è in grado di predire poche cose, di aggiungere poche informazioni rispetto a quante se ne avessero prima, e ognuno di essi si concentra sugli errori di chi ha fatto una previsione prima di lui. In pratica, gli algoritmi di *boosting* lavorano usando nuovi alberi decisionali in sequenza affinando gradualmente le previsioni dei precedenti, riducendo a poco a poco l’errore. Così facendo è chiaro che l’albero che usa come informazione il dato sulla chiusura della sede non sbaglierà mai (è un’informazione che al 100% attendibile, che non lascia margini di errore sulla previsione) e quindi aggiunge un’informazione molto utile e sicura. Ecco allora che questa informazione assume una elevata importanza. Infine, per capire che tipo di errori l’algoritmo ha commesso, si è rappresentata la matrice di confusione, o *confusion matrix*, che indica in che modo l’algoritmo sbaglia la previsione (Figura 69). Sull’asse delle ascisse si riportano i valori predetti, sulle ordinate quelli veri: lungo la diagonale si legge quanti valori predetti sono uguali a quelli veri, al di fuori, invece, il numero di valori sbagliati e come sono stati confusi: in questo caso 429 presenze, indicate con 1, sono state previste come assenza, indicate con 0, e 262 assenze sono state previste come presenze. In generale, si può rappresentare questa matrice ogniqualvolta si ha a che fare con una classificazione, ossia quando si deve assegnare una classe ad un dato, qui presenza/assenza.

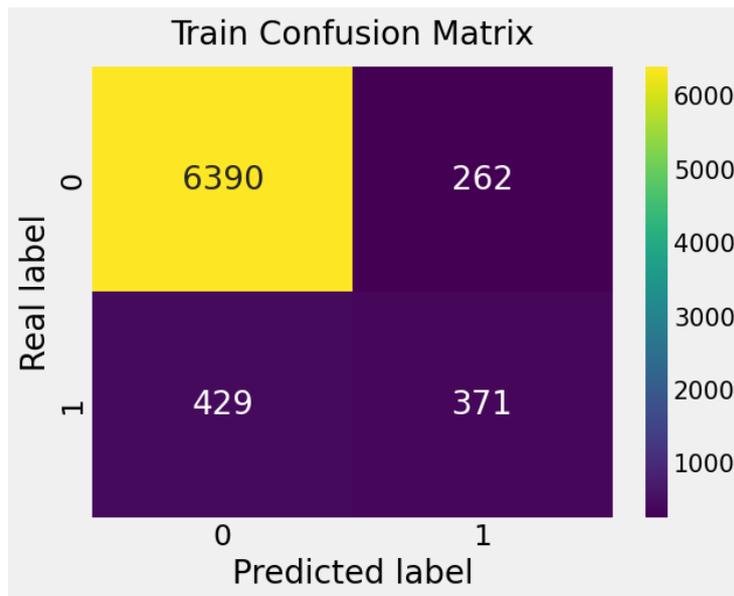


Figura 69: matrice di confusione ottenuta con i risultati dell'allenamento dell'XGBoost.

Combinando le presenze reali e quelle stimate si è ottenuto il profilo di presenza globale degli uffici, riportato nella Figura 70, per il periodo tra ottobre 2021 e ottobre 2022. I colori più scuri indicano un maggior numero di persone contemporaneamente presenti, il bianco l'assenza di personale. Con delle ampie zone bianche, si notano facilmente il periodo natalizio e delle ferie estive, i fine settimana e, ad uno sguardo più attento, si vede una leggera riduzione della presenza all'ora del pranzo.

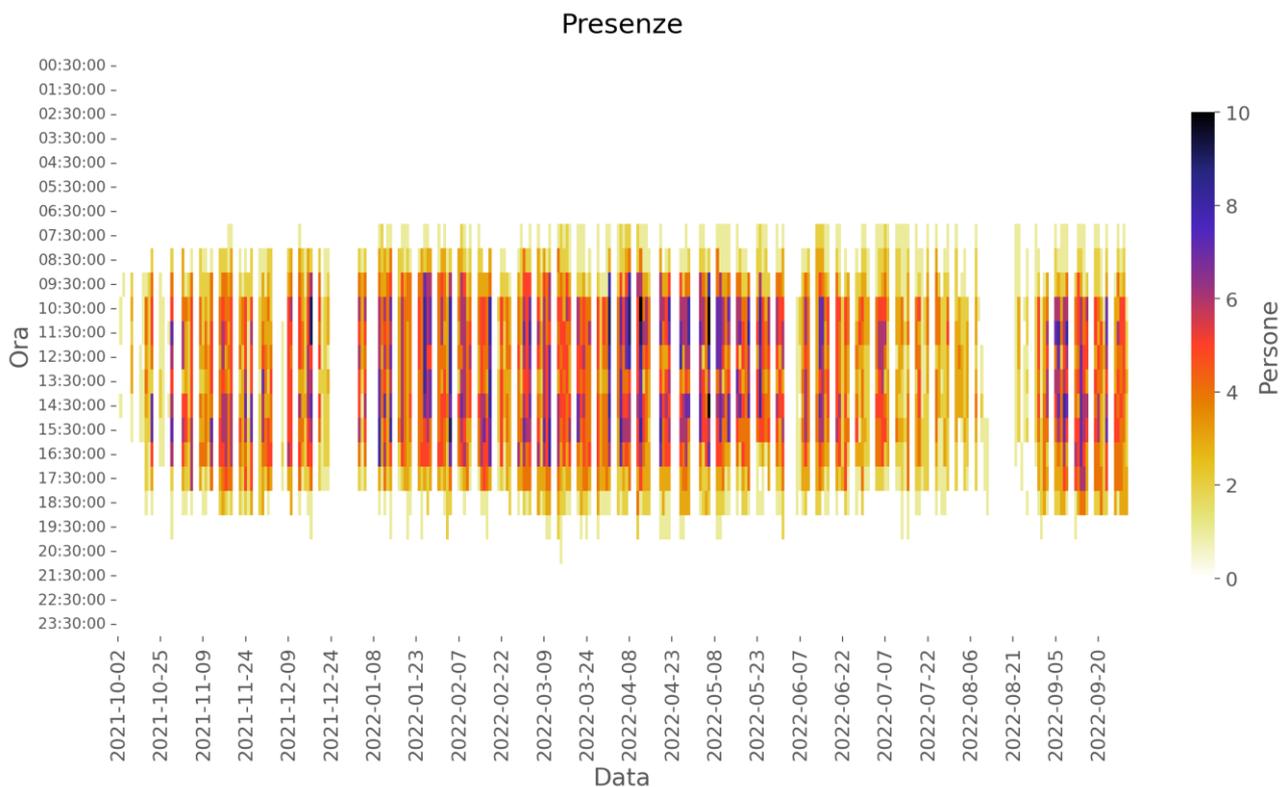


Figura 70: distribuzione delle presenze nelle 24 ore durante il periodo di analisi.

Si notino le somiglianze con le *heat map* nel paragrafo 4.3 relativo all'analisi dei consumi.

I dati di presenza così calcolati, servono per svolgere una previsione dei consumi sulla base di alcuni scenari di presenza.

4.5.2 Previsione dei consumi sulla base di alcuni scenari di occupazione

Successivamente alla pandemia di Covid-19, si è diffuso il lavoro da remoto che permette ai lavoratori del terziario di lavorare in luoghi diversi dall'ufficio. Questa situazione ha un chiaro impatto sui consumi di energia nei luoghi di lavoro. Tuttavia, poiché l'analisi si è basata su dei dati misurati che non hanno mai visto la completa occupazione degli uffici o quasi, si realizza una previsione sui possibili consumi in diversi scenari di presenza. Poiché è plausibile che non si tornerà più in una situazione con il 100% di lavoro in presenza, questo scenario non viene simulato, ma ci si limita al 75% circa. Per l'esattezza si considera al massimo una presenza di 11 persone su 14 per otto ore al giorno, ossia ad una presenza del 78,6%.

Si è proceduto quindi, visti i buoni risultati già ottenuti, con l'allenamento di due nuovi XGBoost (gli iperparametri sono stati lasciati con le impostazioni di *default*) per la previsione dei consumi su base oraria da usare nella previsione variando il parametro della presenza, il primo per la previsione dei consumi estivi, il secondo per quelli invernali. Questo perché in estate e in inverno cambia la correlazione tra temperatura esterna e consumo come si vede dalle firme energetiche del paragrafo 4.4: in estate all'aumento della temperatura segue un aumento del consumo per le maggiori necessità di raffrescamento, in inverno al contrario più è freddo, più c'è bisogno di riscaldamento. Inoltre, poiché il consumo notturno e durante le chiusure della sede può essere considerato sostanzialmente fisso e invariabile, vengono eliminate tutte le ore comprese tra le 20 e le 7 di mattina e i periodi di chiusura. Usare tutte le ore notturne potrebbe avere un effetto negativo perché l'algoritmo avrebbe una grandissima quantità di dati simili su cui apprendere con la possibilità che si verifichi un *overfitting*, ossia che diviene troppo bravo nel predire una determinata situazione perdendo la capacità di generalizzare. Per avere un riferimento di consumo sia nel periodo estivo, sia in quello invernale, si calcola il consumo medio nelle ore e nei giorni appena indicati:

Periodo	Mesi	Consumo medio (kWh)
Estate	Maggio, giugno, luglio, agosto, settembre	50,27
Inverno	Novembre, dicembre, gennaio, febbraio, marzo	110,52

Tabella 20: consumo medio giornaliero invernale ed estivo.

Per la valutazione delle prestazioni dei modelli si sono scelti alcuni indici quali l'RMSE%, *root mean square error in percentage* o radice dell'errore quadratico medio espresso in percentuale, il MAE%, *mean absolute error in percentage* o errore assoluto medio espresso in percentuale, e l'accuratezza. L'errore quadratico medio è spesso usato per mettere a punto i modelli perché, per come è calcolato, ossia attraverso il quadrato della differenza di un valore calcolato dal modello rispetto al valore vero di riferimento, enfatizza gli errori grandi per cui minimizzare questo errore permette di ridurre gli errori "grandi". Si calcola nel modo seguente:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}$$

dove:

- y è il valore calcolato con il modello in corrispondenza di determinate variabili indipendenti;
- \hat{y} è il valore "vero" in corrispondenza delle stesse variabili indipendenti;
- N è il numero totale di dati su cui viene fatta questa operazione.

Nei casi che si riportano il valore è indicato in percentuale rispetto al valore medio della variabile considerata, che nel caso della previsione su base oraria è il consumo medio orario del periodo e per la previsione giornaliera è il consumo medio giornaliero del periodo.

L'errore assoluto medio, invece, fa riferimento alla media dei valori assoluti di ogni errore e da lo stesso peso ad errori piccoli e grandi e si calcola come segue:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|}{N}$$

dove le variabili assumono i gli stessi significati indicati sopra.

L'accuratezza è calcolata come:

$$ACC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i}}{N} \right) * 100$$

Dove ancora una volta le variabili hanno il significato già descritto.

Il primo test è sul caso estivo e precisamente per i mesi da maggio a settembre.

L'algorithmo, allenato su un insieme contenente l'80% dei dati a disposizione, prima di essere usato per la previsione, è stato testato con un insieme di test pari al 20% dei dati disponibili e mai visti dall'algorithmo.

Le prestazioni raggiunte sono state discrete. I parametri per la misura delle prestazioni sono riportati nella Tabella 21. Nella Figura 71 si visualizza graficamente la qualità della previsione attraverso un grafico a dispersione che riporta in ascissa i consumi misurati e in ordinata i consumi predetti: in una previsione ideale senza errori i punti si allineano lungo la diagonale. Qui i punti non sono allineati, ma, ad eccezione di pochi, sono tutti abbastanza vicini alla diagonale.

Infine si deve notare che la concentrazione di punti è molto maggiore per i bassi consumi: questo vuol dire che si sono verificate poche situazioni con consumi elevati e che l'algorithmo è stato allenato con

dei dati distribuiti in modo non uniforme che per questo potrebbe aver imparato a predire molto bene le situazioni con bassi consumi.

Parametro	Valore
RMSE%	27,95%
MAE%	16,24%
ACCURATEZZA	78,71%

Tabella 21: prestazioni dell' algoritmo XGBoost con booster gbtree nel caso estivo con i parametri inizialmente selezionati.

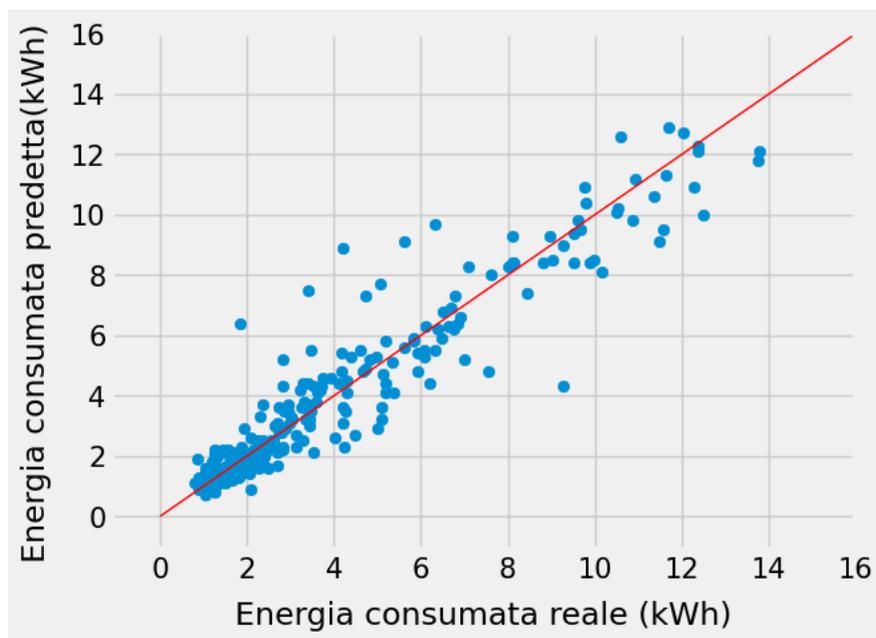


Figura 71: grafico a dispersione con in ascissa il consumo reale e in ordinata quello predetto nel caso estivo: una predizione ideale fornirebbe dei punti allineati sulla diagonale

Poiché il consumo in una certa ora è influenzato anche da ciò che è successo in precedenza, in particolare dalle condizioni climatiche esterne che hanno un effetto ritardato nel tempo, per migliorare la previsione si aggiungono delle colonne con i dati climatici dell'ora precedente facendo attenzione alle zone dove si ha mancanza di dati, per non imputare alla prima ora in cui si ha nuovamente il dato un altro dato di molte ore prima, al momento dell'ultima comunicazione avvenuta. La previsione ha visto un leggero miglioramento, in particolare per quanto riguarda l'RMSE, che mette in risalto la dispersione dei dati (Tabella 22). Tuttavia il miglioramento non è stato completamente in linea con le aspettative ci si prefigge di svolgere ulteriori approfondimenti in merito.

Parametro	Valore
RMSE%	24,22%
MAE%	16,22%
ACCURATEZZA	78,96%

Tabella 22: prestazioni dell' algoritmo XGBoost con booster gbtree nel caso estivo con i parametri aggiuntivi traslati di un'ora.

Per quanto riguarda l'importanza delle variabili, riportata Figura 72, la temperatura media giornaliera è la variabile di maggior peso, seguita dall'ora del giorno, dalle precipitazioni medie giornaliere, dall'irraggiamento medio giornaliero, dalla velocità del vento media giornaliera, dall'umidità relativa media giornaliera e dalla presenza che, inaspettatamente, è al settimo posto. Le variabili relative alle condizioni meteorologiche dell'ora precedente hanno un peso decisamente limitato o nullo.

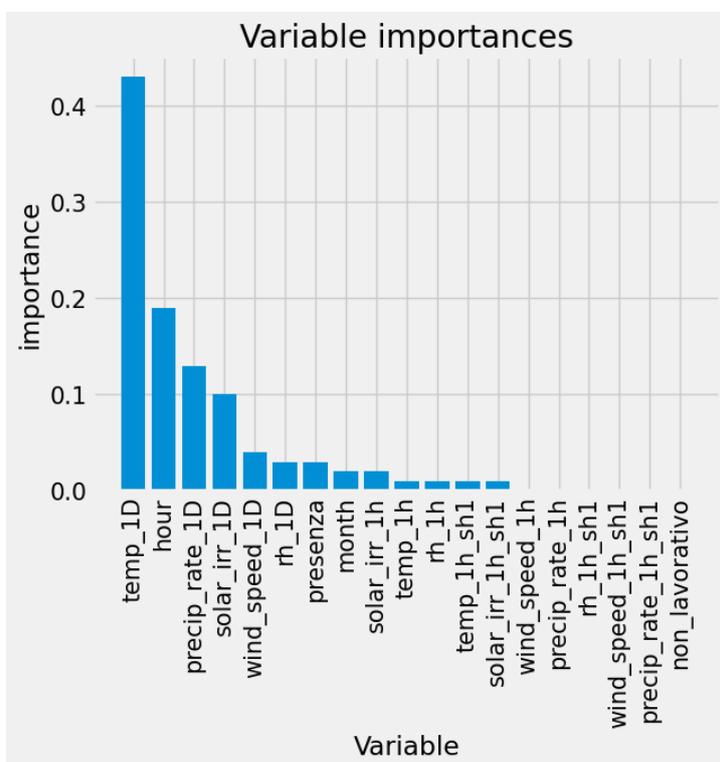


Figura 72: importanza delle variabili fornite all'XGBoost con booster gbtree per il caso estivo

Guardando all'RMSE e al MAE, i risultati sembrano abbastanza incoraggianti per cui con l'algoritmo così messo a punto si procede alla previsione dei consumi nei diversi scenari di presenza.

Di nuovo inaspettatamente, variando la presenza per eseguire la previsione, il consumo quasi non varia, come si può vedere nelle righe evidenziate in grigio nella Tabella 23. A partire dalle otto persone, infatti, il consumo previsto è sempre di 52,96 kWh. Si osserva anche che il consumo stimato in totale assenza di persone, di 47,49 kWh, è inferiore di neppure il 6% rispetto al consumo medio misurato.

Il consumo riportato è il consumo complessivo medio dalle 7 alle 20 calcolato come media della somma dei consumi orari di ogni giorno.

Presenza media (n persone)	Percentuale presenza (%)	Consumo medio giornaliero (kWh)	Consumo rispetto al consumo base (%)
0	0,0	47,49	94,48
1	7,14	48,62	96,72
2	14,29	49,21	97,9
3	21,43	50,12	99,71
4	28,57	50,4	100,26

5	35,71	51,18	101,82
6	42,86	51,91	103,27
7	50,0	52,65	104,74
8	57,14	52,96	105,36
9	64,29	52,96	105,36
10	71,43	52,96	105,36
11	78,57	52,96	105,36

Tabella 23: previsione consumi estivi diurni nei giorni lavorativi con XGBoost con booster gbtrees

A questo punto si procede replicando esattamente il tutto nei mesi invernali. L'algoritmo presenta le prestazioni riportate nella Tabella 24.

Parametro	Valore
RMSE%	17,81%
MAE%	12,19%
ACCURATEZZA	85,69%

Tabella 24: prestazioni dell'XGBoost con booster gbtrees per i mesi invernali

La Figura 73 mostra come anche in questo caso la dispersione dei punti sia limitata, come ci si può aspettare dall'RMSE abbastanza contenuto, segno che la capacità di previsione dei consumi è discreta.

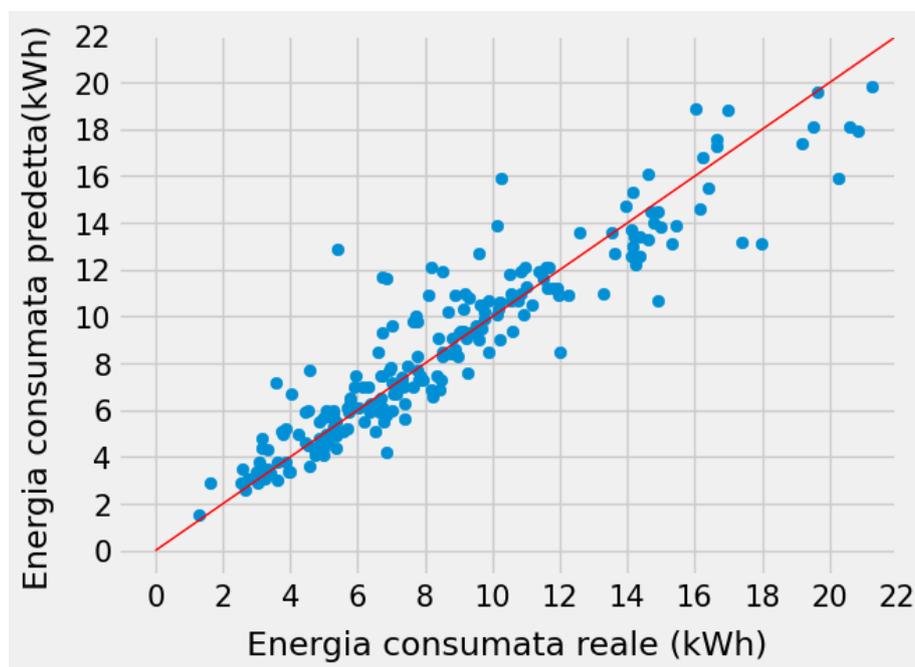


Figura 73: grafico a dispersione con in ascissa il consumo reale e in ordinata quello predetto nel caso invernale: una previsione ideale fornirebbe dei punti allineati sulla diagonale

Si procede nuovamente alla previsione dei consumi in nuovi scenari di presenza: le prestazioni si rivelano ancora insoddisfacenti mostrando dei consumi molto simili ai valori su cui è stato allenato l'algoritmo. Considerando il consumo complessivo medio tra le 7 e le 20 si va dai 99,2 kWh a quasi

125 kWh rispettivamente con 0 e 8 o più persone presenti per 8 ore giornaliere, quando il consumo medio giornaliero misurato nello stesso intervallo di tempo vale circa 110 kWh. Si capisce che la variazione è troppo limitata e non ha senso che il consumo non cresca più all'aumentare delle persone oltre una certa soglia.

Presenza media (n persone)	Percentuale presenza (%)	Consumo medio giornaliero (kWh)	Consumo rispetto al consumo base (%)
0	0,0	99,21	89,77
1	7,14	99,81	90,31
2	14,29	101,79	92,1
3	21,43	104,22	94,3
4	28,57	107,85	97,59
5	35,71	117,89	106,67
6	42,86	122,69	111,01
7	50,0	124,43	112,59
8	57,14	124,78	112,9
9	64,29	124,78	112,9
10	71,43	124,78	112,9
11	78,57	124,78	112,9

Tabella 25: previsione dei consumi invernali diurni nei giorni lavorativi con XGBoost con booster gbtree

Riassumendo, la previsione dei consumi su base oraria con l'XGBoost e *booster* gbtree presenta il seguente comportamento:

- 1) l'accuratezza della previsione è abbastanza elevata (prossima o superiore all'80%) quando i dati si trovano all'interno degli intervalli dei dati su cui si è allenato l'algoritmo e quindi errore ridotto;
- 2) difficoltà nel predire situazioni nuove fino ad una situazione in cui la previsione non varia al variare della variabile indipendente di interesse.

La previsione oraria presenta quindi alcune criticità:

- 1) usando l'algoritmo XGBoost con *booster* gbtree l'accuratezza della previsione è abbastanza elevata (prossima all'80%) quando i dati si trovano all'interno degli intervalli dei dati su cui si è allenato l'algoritmo: nel grafico a dispersione in Figura 73 si osserva che punti si allineano abbastanza bene lungo la diagonale, ossia che c'è buona corrispondenza tra i dati previsti e i dati reali dell'insieme di test. Quando però si modifica il dato della presenza per prevedere il nuovo consumo, questo varia molto poco tra i vari scenari attestandosi sempre su un valore prossimo al consumo medio giornaliero misurato;
- 2) nel caso in cui si scelga come *booster* gblinear, si ottiene una scarsa accuratezza della previsione e quindi un elevato errore, ma una buona capacità di estrapolare il consumo nelle zone al di fuori di quelle su cui è stato fatto l'allenamento. Il comportamento è sovrapponibile a quello di una regressione e si osserva che i punti non si dispongono lungo la diagonale. Tuttavia, per brevità non si riportano questi risultati.

Indagando sulle cause di questo comportamento si trova che un algoritmo basato su alberi decisionali non ha la capacità di prevedere situazioni nuove, cioè di estrapolare, ma soltanto di fare previsioni in zone già “battute”, di prevedere qualcosa di molto simile a quanto già incontrato.

Questo comportamento è evidenziato dalle figure Figura 74 e Figura 75. Nella Figura 74 si riporta il grafico della funzione

$$y = x + x^2$$

disegnata in nero, mentre in giallo si indicano i punti negli intervalli (1,4) e (6,9) presi per allenare gli algoritmi, qui XGBoost con *booster* *gbtree* e XGBoost con *booster* *gblinear*.

Gbtree è un *booster* basato su alberi decisionali, mentre gblinear è un *booster* lineare.

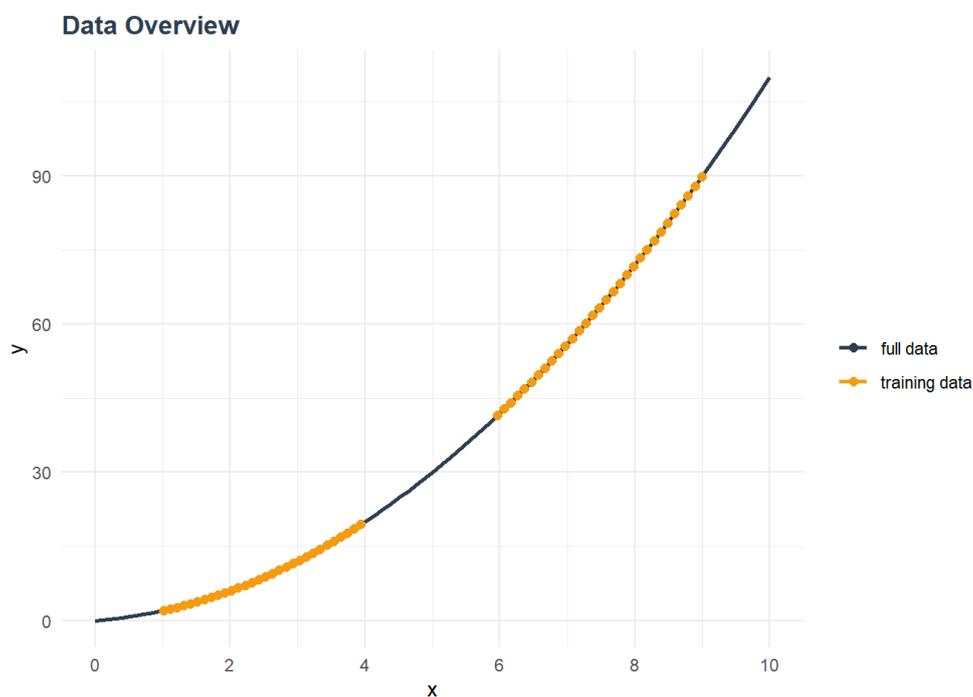


Figura 74: in nero la funzione $y=x+x^2$, in giallo si evidenziano gli intervalli usati per allenare gli algoritmi XGBoost con *booster* *gbtree* e XGBoost con *booster* *gblinear* (fonte: avato-consulting)

Gli algoritmi così allenati sono stati usati per predire la funzione in tutto l'intervallo (0,10). L'XGBoost con *booster* *gbtree* è in grado di prevedere molto bene la funzione originale nell'intervallo usato per l'allenamento, come si vede dai punti gialli nella Figura 75; al di fuori di questo intervallo è incapace di prevedere correttamente e restituisce dei valori pari ai valori estremi dell'intervallo (punti neri) e quindi non è in grado di estrapolare. Nel secondo caso, con il *booster* *gblinear*, ciò che viene fatto è sostanzialmente una regressione lineare. In questo caso specifico, l'errore commesso è maggiore, tuttavia la capacità di predizione si estende oltre gli intervalli usati per l'allenamento perché l'algoritmo costruisce una funzione matematica, qui lineare, che lega gli input e gli output.

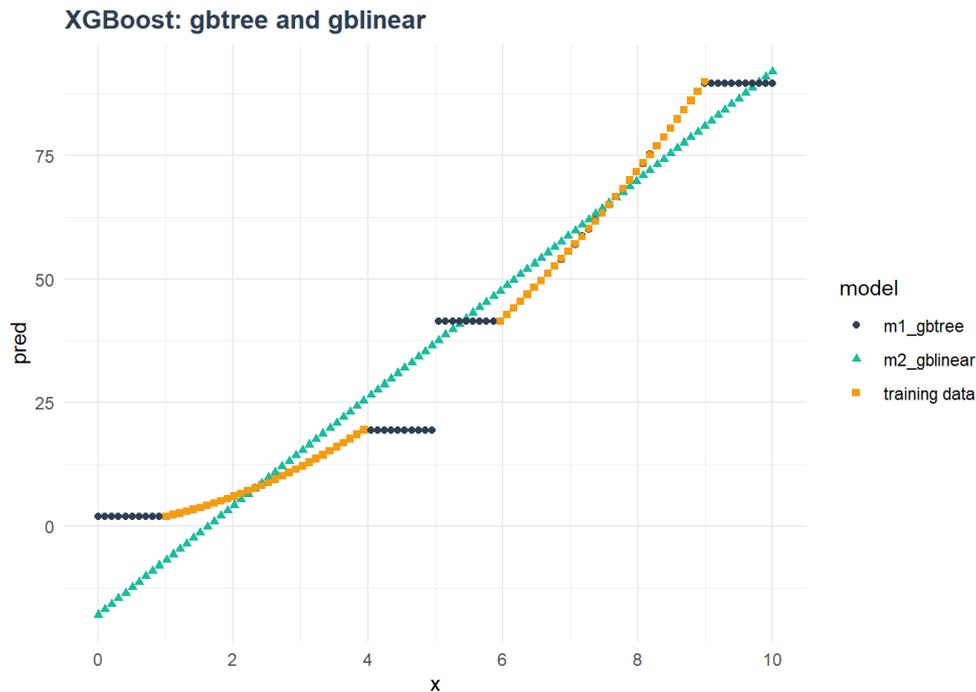


Figura 75: previsione realizzata con l' algoritmo XGBoost con booster gbtree (punti gialli e neri) e con l'XGBoost con booster gblinear (punti verdi) (fonte: avato-consulting)

Da questo dipende il comportamento osservato nella previsione dei consumi.

A questo punto si decide quindi di procedere con una più tradizionale regressione lineare, anche se si sarebbe potuto usare l'XGBoost con *booster* gblinear, riservandosi la possibilità per un futuro di trovare ed affinare altri modelli basati sul *machine learning* che abbiano prestazioni migliori rispetto a tutti gli approcci fin qui tentati.

La regressione lineare multipla è appunto un modello lineare che correla più variabili indipendenti ad una variabile dipendente:

$$y = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_N x_N + k = \sum_{i=1}^N \alpha_i x_i + k$$

Dove le x sono le variabili indipendenti, α i coefficienti e k l'intercetta. I coefficienti e l'intercetta sono scelti in modo da minimizzare l'RMSE.

La regressione è stata calcolata prendendo tutti i dati disponibili senza necessità di dividere in insieme di allenamento e di test perché per calcolare la bontà del modello è sufficiente conoscere l'RMSE ed eventualmente il MAE calcolabili usando tutti i punti con cui è stata fatta la regressione.

La regressione, calcolata su base oraria nel caso estivo, presenta parametri riportati nella Tabella 26. Gli errori in questo caso sono molto elevati e portano ad una scarsa accuratezza. Il risultato, visibile nella Figura 76, mostra una previsione che si discosta molto dalla diagonale, dove si ha coincidenza tra valori misurati e predetti. Si presenta una forma curva che lascia intendere una dipendenza non

lineare rispetto a qualche parametro. Inoltre, per consumi molto bassi, alcuni punti si trovano in zona negativa, nel quarto quadrante, che significa che la regressione per alcuni valori delle variabili indipendenti produce dei risultati del tutto inaffidabili.

Parametro	Valore
RMSE%	55,17%
MAE%	43,35%
ACCURATEZZA	34,96%

Tabella 26: prestazioni della regressione lineare per i mesi estivi

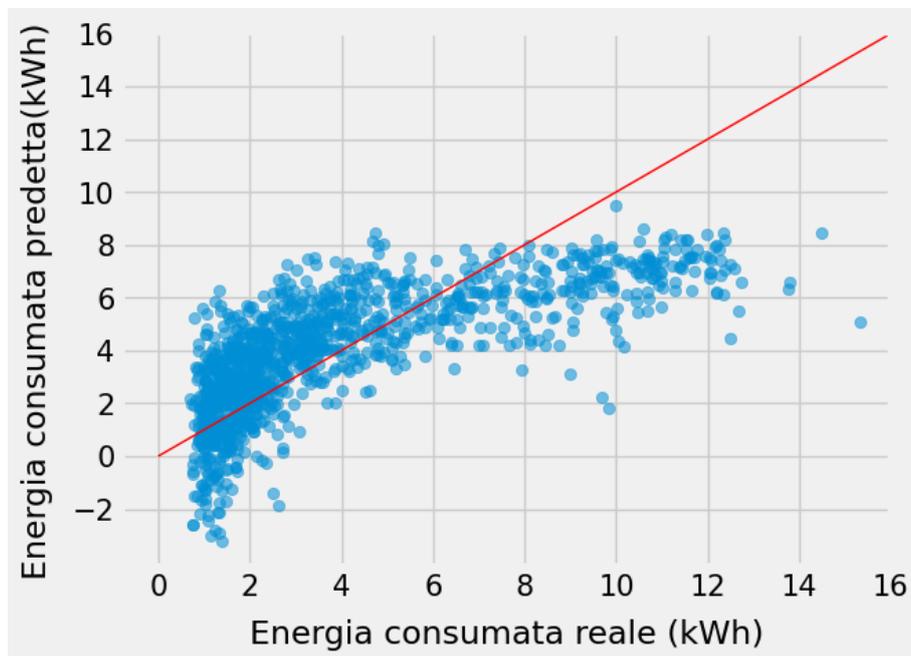


Figura 76: grafico a dispersione che mostra la relazione tra i consumi misurati e quelli previsti dalla regressione. Si noti che alcuni punti si trovano nel quarto quadrante con una ordinata negativa e la mancanza di allineamento rispetto alla diagonale.

I coefficienti della regressione sono riportati nella Tabella 27. Non deve stupire il coefficiente relativo all'irraggiamento solare giornaliero perché è stato fornito come somma dell'irraggiamento solare medio orario per cui il valore è dell'ordine di 10^4 .

Feature	Coefficiente
temp_1D	1,0599
presenza	0,3301
temp_1h	0,1194
wind_speed_1h	0,0972
rh_1D	0,0850
wind_speed_1h_sh1	0,0675
rh_1h	0,0399
solar_irr_1h	0,0062
precip_rate_1D	0,0004

solar_irr_1D	2,34E-05
precip_rate_1h_sh1	-1,50E-05
precip_rate_1h	-0,0005
solar_irr_1h_sh1	-0,0025
rh_1h_sh1	-0,0948
wind_speed_1D	-0,5718
temp_1h_sh1	-0,6535
Intercetta	-13,1289

Tabella 27: coefficienti e intercetta della regressione lineare nel caso estivo

Consapevoli dei problemi presenti si procede alla previsione dei consumi in diversi scenari di presenza. Dalla Tabella 28 si vede come all'aumentare della presenza aumenta costantemente il consumo, come lecito attendersi, e varia in media tra un minimo di 39,33 kWh in assenza di persone a 71,35 kWh giornalieri con 11 persone presenti per 8 ore.

Presenza media (n persone)	Percentuale presenza (%)	Consumo medio giornaliero (kWh)	Consumo rispetto al consumo base (%)
0	0,0	39,33	78,24
1	7,14	42,24	84,03
2	14,29	45,15	89,82
3	21,43	48,07	95,63
4	28,57	50,98	101,42
5	35,71	53,89	107,21
6	42,86	56,8	113,0
7	50,0	59,71	118,79
8	57,14	62,62	124,57
9	64,29	65,53	130,36
10	71,43	68,44	136,15
11	78,57	71,35	141,94

Tabella 28: previsione dei consumi estivi diurni nei giorni lavorativi calcolati con la regressione lineare su base oraria

Il caso invernale, invece, è qualitativamente migliore: i parametri del modello evidenziano errori molto più contenuti e un'accuratezza nettamente migliore (Tabella 29). Nella Figura 77 si vede che i punti si allineano molto meglio in prossimità della diagonale e presentano una dispersione minore rispetto al caso estivo. Inoltre un solo punto ha ordinata negativa. Infine, nella Tabella 30 si leggono i valori dei coefficienti della retta di regressione e l'intercetta.

Parametro	Valore
RMSE%	31,70%
MAE%	24,53%
ACCURATEZZA	69,2%

Tabella 29: prestazioni della regressione lineare per i mesi invernali

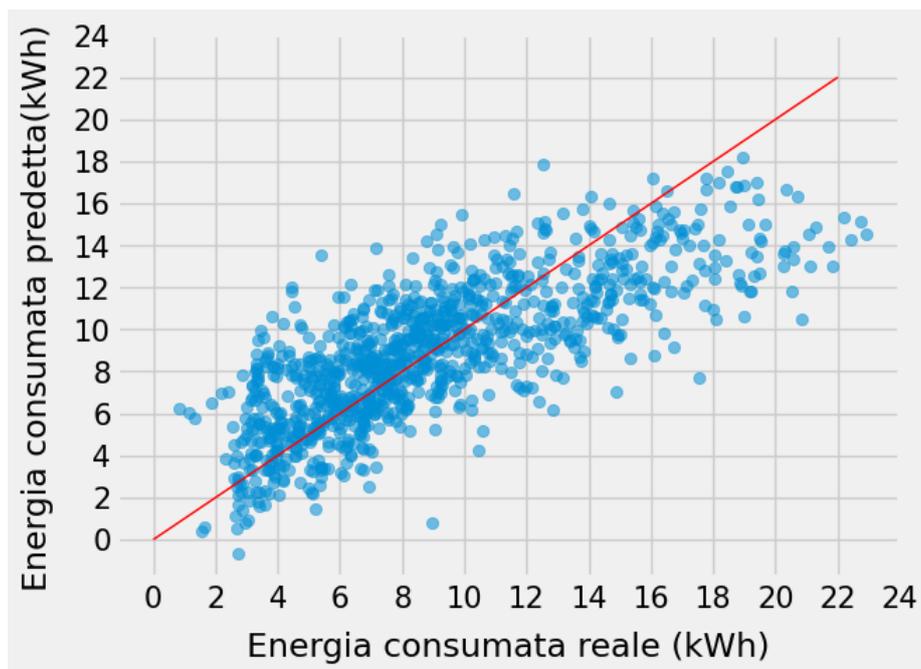


Figura 77: grafico a dispersione che mostra la relazione tra i consumi misurati e quelli previsti dalla regressione. I punti presentano una dispersione non particolarmente elevata. Uno solo presenta ordinata negativa.

Feature	Coefficiente
presenza	1,0029
temp_1h	0,2942
wind_speed_1D	0,2651
wind_speed_1h	0,2217
rh_1D	0,0735
temp_1D	0,0488
rh_1h	0,0170
solar_irr_1h	0,0066
precip_rate_1h	0,0024
precip_rate_1h_sh1	0,0004
solar_irr_1D	-5,30E-05
precip_rate_1D	-0,0005
solar_irr_1h_sh1	-0,0017
wind_speed_1h_sh1	-0,0319
rh_1h_sh1	-0,0736
temp_1h_sh1	-1,2293
Intercetta	14,9194

Tabella 30: coefficienti e intercetta della regressione lineare nel caso invernale

La previsione che ne consegue vede i consumi crescere assieme alla presenza da un minimo di 72,62 kWh tra le 7 e le 20 in assenza di persone ad un massimo di circa 168 kWh con 11 persone. Una variazione di questo genere risulta plausibile. Si noti in particolare il consumo di base che resta in assenza di persone dovuto, agli apparati IT sempre in funzione e in particolare ai radiatori elettrici dei bagni che sono rimasti sempre accesi.

Presenza media (n persone)	Percentuale presenza (%)	Consumo medio giornaliero (kWh)	Consumo rispetto al consumo base (%)
0	0	72,62	65,71
1	7,14	81,29	73,55
2	14,29	89,96	81,4
3	21,43	98,63	89,24
4	28,57	107,29	97,08
5	35,71	115,96	104,92
6	42,86	124,63	112,77
7	50	133,3	120,61
8	57,14	141,97	128,46
9	64,29	150,63	136,29
10	71,43	159,3	144,14
11	78,57	167,97	151,98

Tabella 31: previsione dei consumi invernali diurni nei giorni lavorativi calcolati con la regressione lineare su base oraria

Per provare a migliorare la previsione dei consumi e poiché, come già detto, i consumi di un certo periodo dipendono da cosa è successo in precedenza, in particolar modo per quanto riguarda le condizioni climatiche, si rieseguo le previsioni dei consumi al variare della presenza su un arco temporale giornaliero. Si considerano quindi tutte le 24 ore per i giorni in cui i dati meteorologici sono presenti in modo completo e i consumi elettrici presentano una lettura in prossimità della mezzanotte. Questa precisazione è doverosa perché non sempre i misuratori di energia hanno comunicato con il cloud e la comunicazione che può essersi interrotta ad esempio alle 22:30 lasciando la possibilità di considerare il giorno completo o può essersi ripristinata all'una di notte, potendo considerare così il giorno successivo completo. La notte, infatti, il consumo è solitamente molto minore rispetto al giorno e perdere una piccola parte di informazione non porta ad un errore significativo sul totale del consumo di un giorno intero.

Il modello usato è nuovamente una regressione lineare, e la radiazione solare è fornita come sommatoria della radiazione solare media oraria giornaliera. Per quanto riguarda le presenze del personale, la strategia è quella di considerare le ore di effettiva presenza provenienti dai dati reali e simulati insieme e quindi di sommarle in modo da ottenere totale delle ore giornaliere di tutte le persone che sono state negli uffici. Si distingue nuovamente tra mesi estivi e mesi invernali.

Non si presentano i risultati del modello realizzato con l'algoritmo XGBoost perché presentano lo stesso problema già evidenziato, ossia dell'incapacità di predire al di fuori delle zone su cui è stato allenato.

La prima previsione dei consumi è sul periodo estivo e, per avere a disposizione dei giorni con presenza nulla si considerano anche i giorni di chiusura della sede.

Le prestazioni di questo modello previsionale, come si capisce dai dati della Tabella 32, sono abbastanza insoddisfacenti. Nella Figura 78 si vede che i punti sono molto dispersi e che lasciano intendere un andamento curvilineo. Si ipotizza che questo sia collegato ad una qualche variabile che ha una correlazione non lineare con il consumo elettrico.

Parametro	Valore
RMSE%	51,03%
MAE%	40,56%
ACCURATEZZA	47,16%

Tabella 32: prestazioni della regressione lineare per i mesi estivi

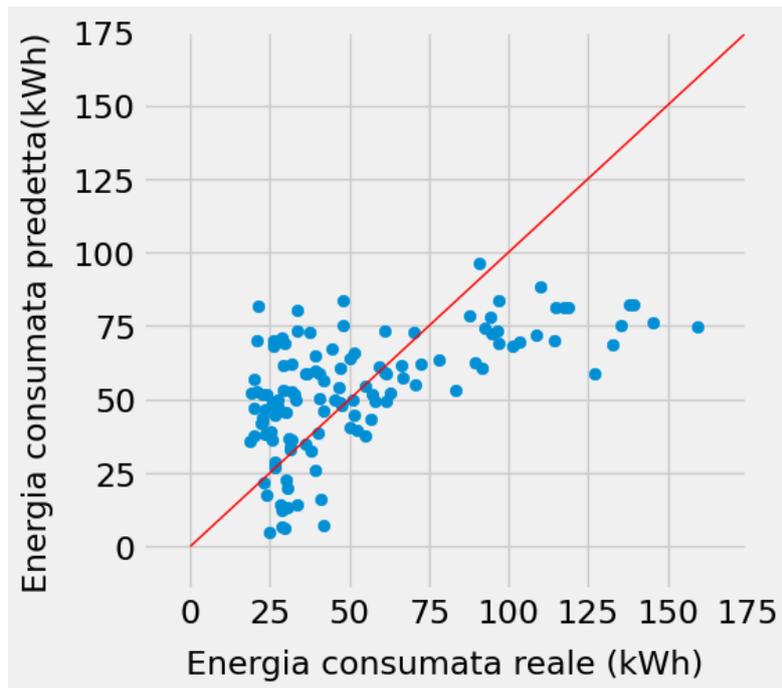


Figura 78: grafico a dispersione che mostra la relazione tra i consumi misurati e quelli previsti col modello di regressione nel caso estivo. I punti presentano una dispersione elevata ed una disposizione “ad L” che indica la mancanza di una relazione lineare con qualche variabile.

Le variabili su cui si basa il modello sono ora molte meno, non essendoci quelle su base oraria, e i coefficienti della regressione sono mostrati nella Tabella 33

Feature	Coefficiente
temp_1D	5,4183
rh_1D	0,1910
presenza	0,1798
precip_rate_1D	0,0104
solar_irr_1D	2,35E-04
wind_speed_1D	-5,5142

Tabella 33: coefficienti e intercetta della regressione lineare su base giornaliera nel caso estivo

La previsione, per quanto poco attendibile, si ottiene variando le ore di presenza totali giornaliere: si va da un minimo di 0 ore ad un massimo di 88 con 11 persone presenti per 8 ore. Il consumo stimato varia tra circa 92 kWh e 118 kWh al giorno, valori che apparentemente risentono poco di una così ampia variazione della presenza. I valori, infatti non sono affidabili quantomeno nella zona

“bassa” perché, calcolando la media del consumo misurato nei giorni di chiusura della sede del medesimo periodo, si ha un valore tra i 20 e i 40 kWh al giorno.

Presenza media (h)	Percentuale presenza (%)	Consumo medio giornaliero (kWh)	Consumo rispetto al consumo base (%)
0	0	48,66	91,86
8	7,14	49,66	93,75
16	14,29	50,67	95,66
24	21,43	51,67	97,55
32	28,57	52,67	99,43
40	35,71	53,68	101,34
48	42,86	54,68	103,23
56	50,00	55,69	105,13
64	57,14	56,69	107,02
72	64,29	57,7	108,93
80	71,43	58,7	110,82
88	78,57	59,71	112,72

Tabella 34: previsione dei consumi medi estivi giornalieri calcolati con la regressione lineare

Anche nel caso invernale il modello non mostra grandi prestazioni: si riducono l’RMSE e il MAE, ma quanto ad accuratezza il modello quasi ricalca quello estivo (Tabella 35). La Figura 79 evidenzia la dispersione dei punti e soprattutto il fatto che pochissimi punti sono sovrapposti alla retta rossa della diagonale, ragione per cui l’accuratezza della previsione è bassa.

La Tabella 36 riporta i coefficienti della regressione lineare e l’intercetta.

Infine, la Tabella 37 mostra la previsione dei consumi al variare della presenza calcolata come numero di ore di presenza totale di tutto il personale. Il consumo varia da circa l’87% a circa il 116% del consumo medio misurato nello stesso periodo. Tuttavia la previsione non può essere considerata molto attendibile.

Parametro	Valore
RMSE%	33,73%
MAE%	26,09%
ACCURATEZZA	44,77%

Tabella 35: prestazioni della regressione lineare per i mesi invernali

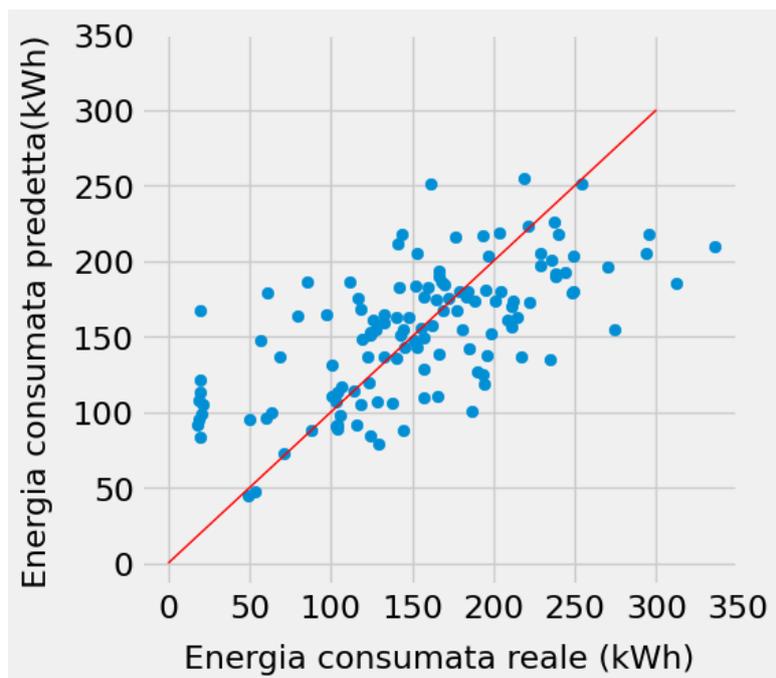


Figura 79: grafico a dispersione che mostra la relazione tra i consumi misurati e quelli previsti col modello di regressione nel caso invernale. I punti presentano una dispersione abbastanza elevata.

Feature	Coefficiente
wind_speed_1D	0,943369
presenza	0,791499
precip_rate_1D	0,002942
solar_irr_1D	-0,00048
rh_1D	-1,35828
temp_1D	-11,7539
Intercetta	361,52

Tabella 36: coefficienti e intercetta della regressione lineare su base giornaliera nel caso invernale

Presenza media (h)	Percentuale presenza (%)	Consumo medio giornaliero (kWh)	Consumo rispetto al consumo base (%)
0	0	133,35	86,94
8	7,14	137,39	89,57
16	14,29	141,43	92,2
24	21,43	145,48	94,84
32	28,57	149,52	97,48
40	35,71	153,56	100,11
48	42,86	157,6	102,74
56	50	161,65	105,38
64	57,14	165,69	108,02
72	64,29	169,73	110,65
80	71,43	173,77	113,29
88	78,57	177,82	115,93

Tabella 37: previsione dei consumi medi invernali giornalieri calcolati con la regressione lineare

4.6 Misura dati ambientali con centralina microclimatica

Per confrontare i dati provenienti dai sensori installati negli uffici e validarne la veridicità, si è usata lo strumento Delta OHM HD 32.1 THERMAL MICROCLIMATE. (Figura 80) Il principale parametro di interesse dell'analisi è stato l'anidride carbonica, ma, poiché la centralina può registrare contemporaneamente varie grandezze, si sono installati altri sensori i cui dati sono stati memorizzati, anche se non saranno analizzati in questa sede.



Figura 80: centralina microclimatica.

In generale, l'anidride carbonica è un indice della presenza di persone e del ricambio d'aria. È prodotta nella respirazione e, in assenza di ricambio d'aria, si accumula in ambiente. Poiché dall'analisi dei dati di IAQ e CO₂ equivalente provenienti dai sensori Bosch si sono osservati dei picchi particolarmente elevati e considerati insensati ad una prima analisi, si è deciso di procedere ad un approfondimento.

Con un sensore specifico di CO₂, si è misurata la sua concentrazione per confrontarla con i valori di CO₂ equivalente o eCO₂ ricavati dai sensori presenti in ambiente al fine di capire se ci fosse una correlazione tra i valori dedotti di eCO₂ dal sensore attraverso l'algoritmo proprietario e quelli reali. Obiettivo ultimo di questa analisi è stato capire se fosse possibile usare come indicatore della presenza di persone anche la CO₂ equivalente.

La misura è stata effettuata in periodi diversi nell'ufficio 18 all'inizio e successivamente nell'ufficio 15. I valori sono stati raccolti con una frequenza di campionamento di un minuto per entrambi i sensori, ma, poiché i sensori hanno un tempo caratteristico di risposta e poiché potrebbero esserci delle

leggere disuniformità temporanee nella concentrazione di CO₂ nell'ambiente, i dati sono stati mediati in un intervallo temporale di 10 minuti.

Le figure Figura 81 e Figura 82 mostrano l'andamento delle due misure nel tempo, riportato sull'asse delle ascisse. Come si osserva non c'è praticamente mai corrispondenza tra i picchi delle due misure.

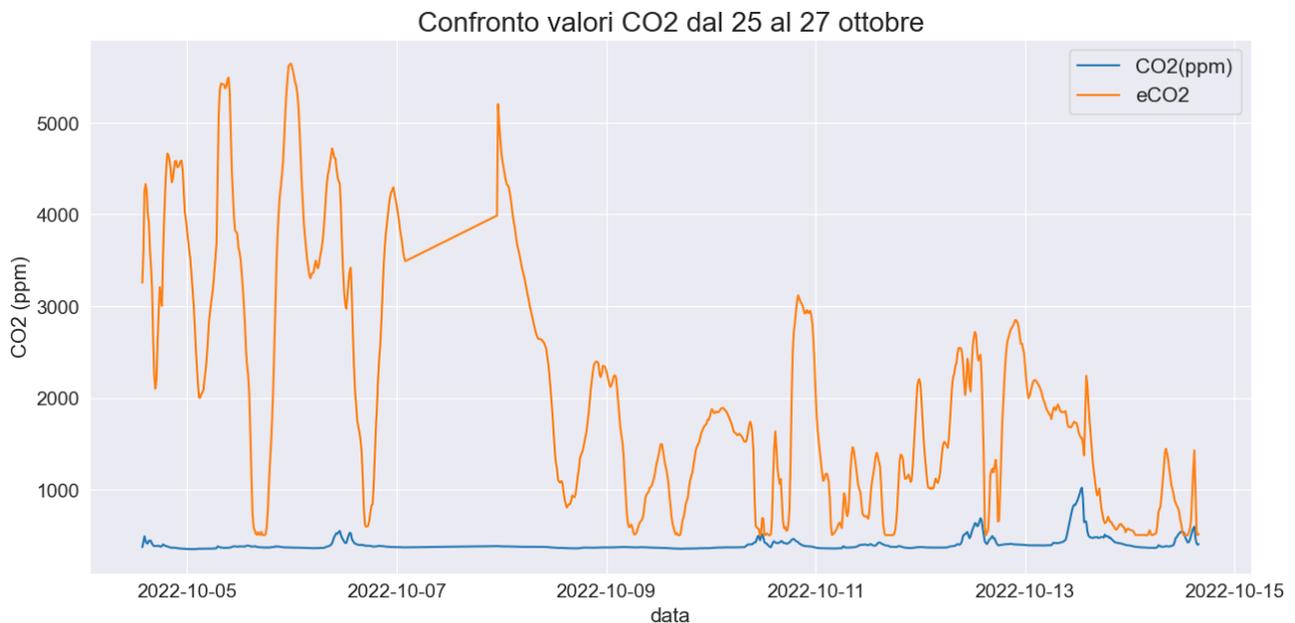


Figura 81: andamento della concentrazione di CO₂ reale misurata e della CO₂ equivalente stimata in un periodo di osservazione

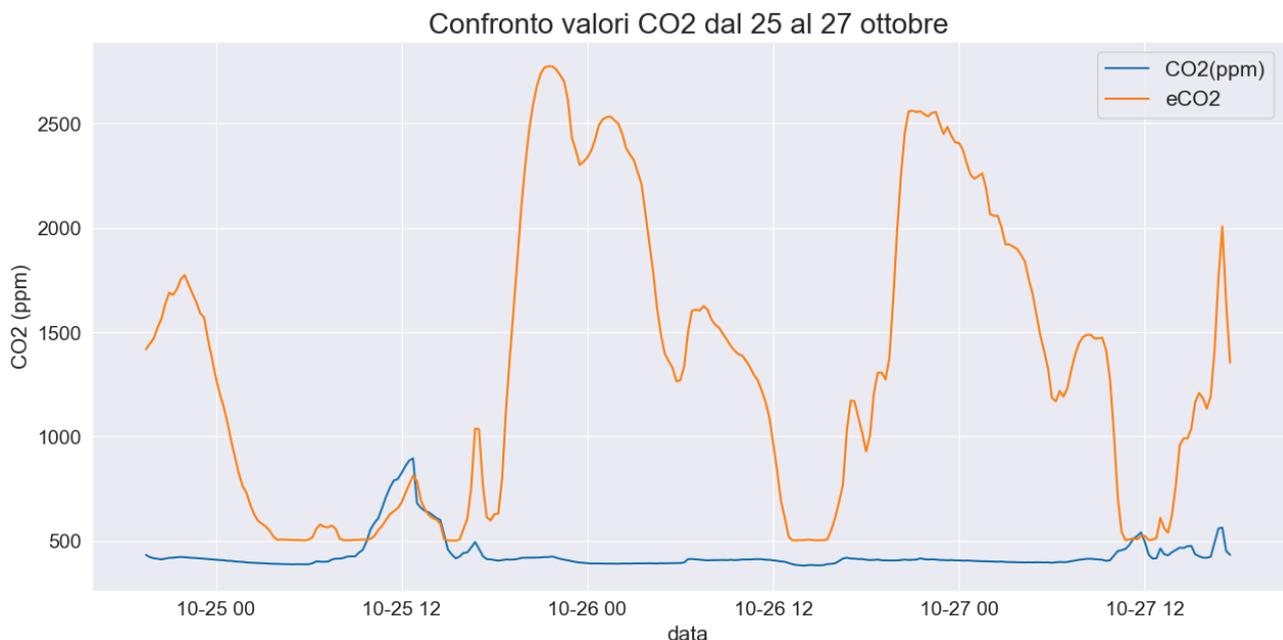


Figura 82: andamento della concentrazione di CO₂ reale misurata e della CO₂ equivalente stimata in un periodo di osservazione

Nel secondo grafico (Figura 82), che copre un periodo più breve, si notano due picchi marcati di eCO₂ durante la notte in assenza di persone. Nella stanza, inoltre non sono presenti piante di alcun genere. L'unica corrispondenza degli andamenti la si osserva il 25 ottobre attorno a mezzogiorno.

Tuttavia si deve notare che il valore di CO₂ effettivamente misurato supera il valore di eCO₂ ricostruito, cosa che non avviene altrove.

Nonostante la chiara mancanza di correlazione, si è voluto approfondire l'analisi.

Nelle figure Figura 83 e Figura 84 si riportano dei grafici a dispersione o *scatter plot*, che mostrano la relazione tra i valori campionati nello stesso momento. Sull'asse delle ascisse si riportano i valori misurati col sensore di CO₂ "puro", mentre su quello delle ordinate i valori di eCO₂. In presenza di una qualche correlazione tra le grandezze rappresentate, i punti si dispongono all'incirca lungo una retta nel caso di una correlazione lineare, lungo un ramo di parabola in caso di una correlazione di secondo grado o altro.

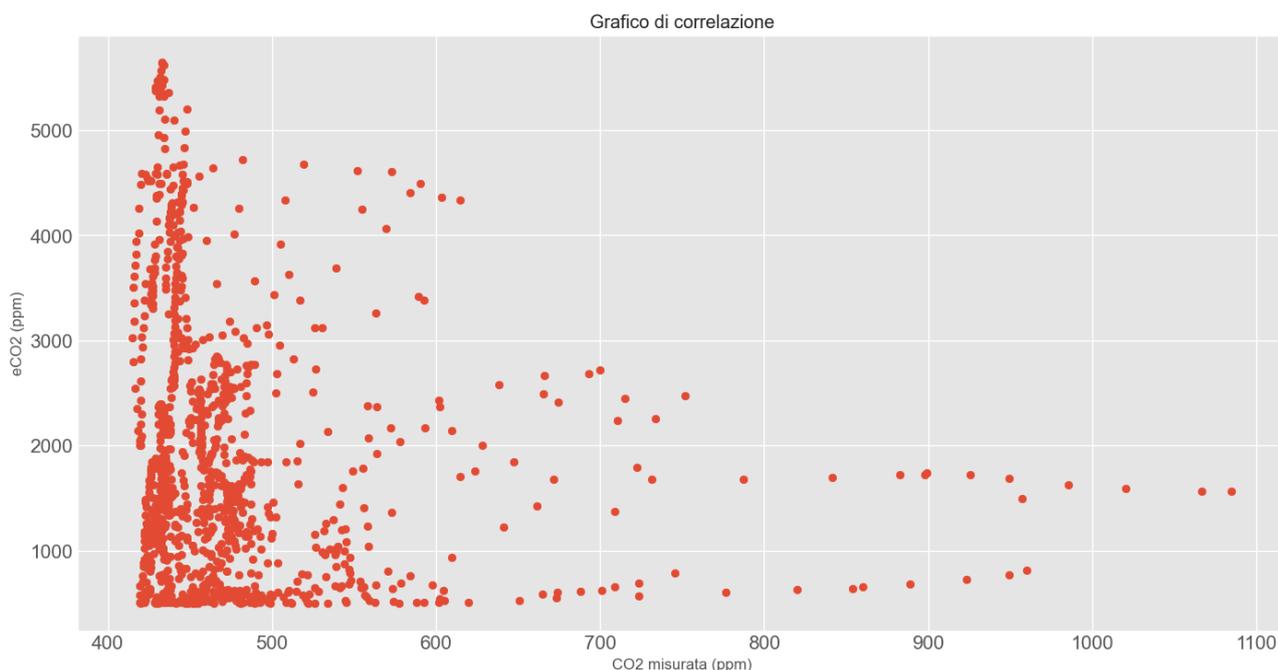


Figura 83: grafico a dispersione riportante tutti i valori di CO₂ effettivamente misurata e di CO₂ equivalente stimata

Come si può osservare, ci sono stati dei momenti in cui la concentrazione di anidride carbonica è stata molto alta, probabilmente perché la persona presente è stata a lungo con porta e finestre chiuse facendo salire la concentrazione fino ad oltre 1000 ppm, come si vede dall'asse delle ascisse, ma non si leggono valori proporzionati sull'asse delle ordinate.

Poiché la parte del grafico con la maggior concentrazione di punti rimane schiacciata sulla sinistra, si è modificato il grafico togliendo tutti i punti con i valori superiori ai 550 ppm reali per osservare meglio quell'area (Figura 83): come si vede, non c'è una chiara relazione biunivoca tra la concentrazione misurata e quella dedotta, anche se si intravedono dei punti allineati in una zona. Questo comportamento è probabilmente dovuto al fatto che la CO₂ equivalente è dedotta sulla base del rapporto medio tra i composti organici volatili e l'anidride carbonica presenti nel respiro umano. Tuttavia, in ambiente sono presenti molte altre sorgenti di VOC quali i mobili, che emettono formaldeide, in particolare da nuovi o se irraggiati dal sole, la carta, le piante (qui non presenti), gli animali o l'uomo stesso in caso di sudorazione. Per questa ragione è difficile correlare biunivocamente la concentrazione dei VOC presenti nell'aria all'effettiva concentrazione di anidride carbonica.

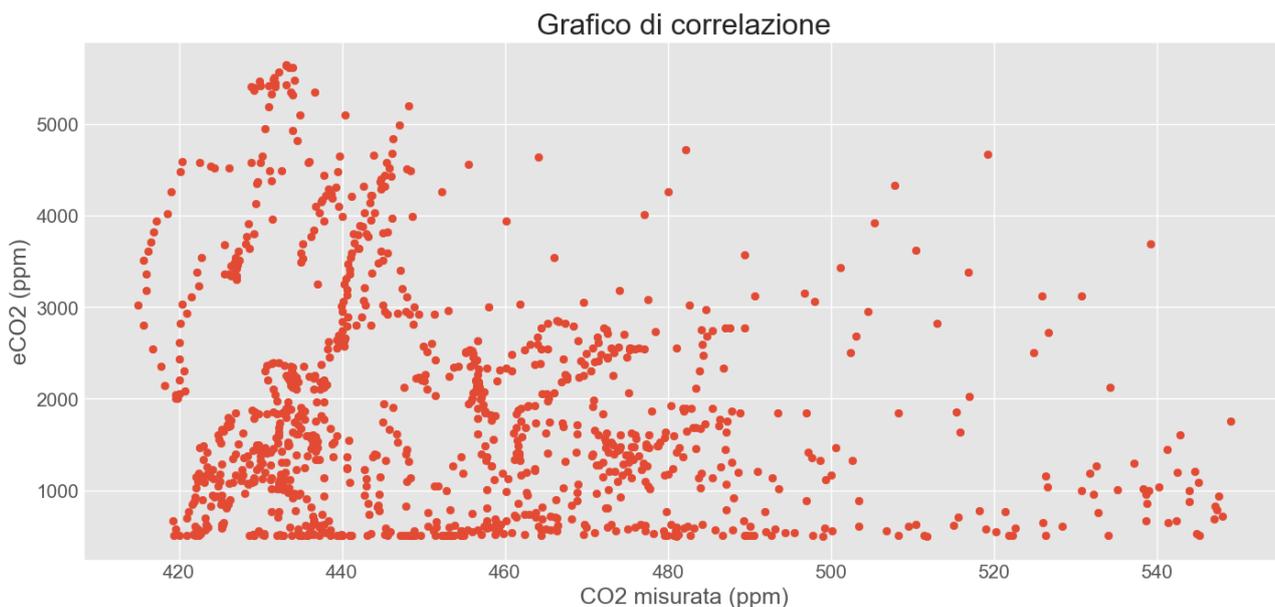


Figura 84: grafico a dispersione riportante i valori di CO₂ effettivamente misurata e di CO₂ equivalente stimata esclusi i valori di CO₂ reale superiori a 625 ppm

In qualche caso si nota un incremento della eCO₂ in corrispondenza delle ore notturne: questo comportamento ha fatto sospettare la presenza di una qualche correlazione, seppur minima tra la temperatura e la eCO₂, magari dovuta al fatto che al diminuire della temperatura, a parità di umidità assoluta, aumenta l'umidità relativa. Si è approfondito anche questo aspetto disegnando dei grafici che potessero evidenziarlo.

I grafici che seguono riportano sui due assi due delle tre variabili considerate, temperatura, umidità relativa e CO₂ equivalente scambiandole ogni volta. Sulla diagonale, invece, si riporta la distribuzione dei valori di ogni variabile.

Il primo gruppo (Figura 85) considera solo le variabili durante la notte nei mesi di giugno, luglio e agosto assieme alle rette di regressione. Non si trova alcuna particolare correlazione tra la eCO₂ e le altre variabili. Temperatura e umidità relativa, come evidenzia la retta di regressione, sono anticorrelate, ossia al diminuire di una variabile aumenta l'altra.

Il secondo gruppo (Figura 86) considera le variabili in tutti i mesi studiati, sia nelle ore diurne, sia in quelle notturne. Anche qui non si nota alcuna correlazione tra eCO₂ e le altre variabili: i punti sono uniformemente distribuiti in tutta l'area dei quadranti. I colori indicano a quale stagione dell'anno i punti appartengono.

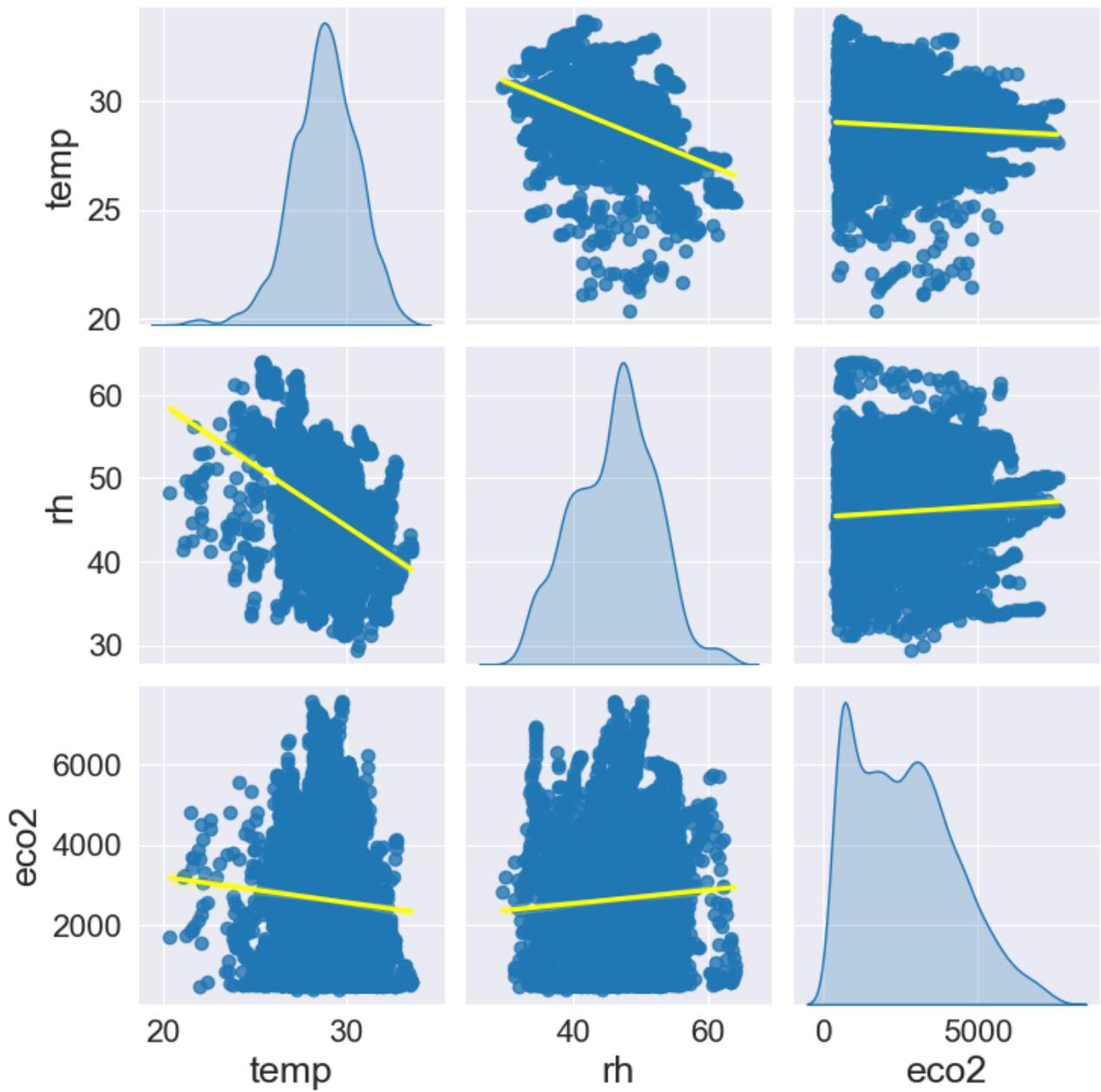


Figura 85: grafici di correlazione tra temperatura, umidità relativa ed eCO2 durante i mesi di giugno, luglio e agosto 2022 nell'ufficio 15. In giallo la retta di regressione.

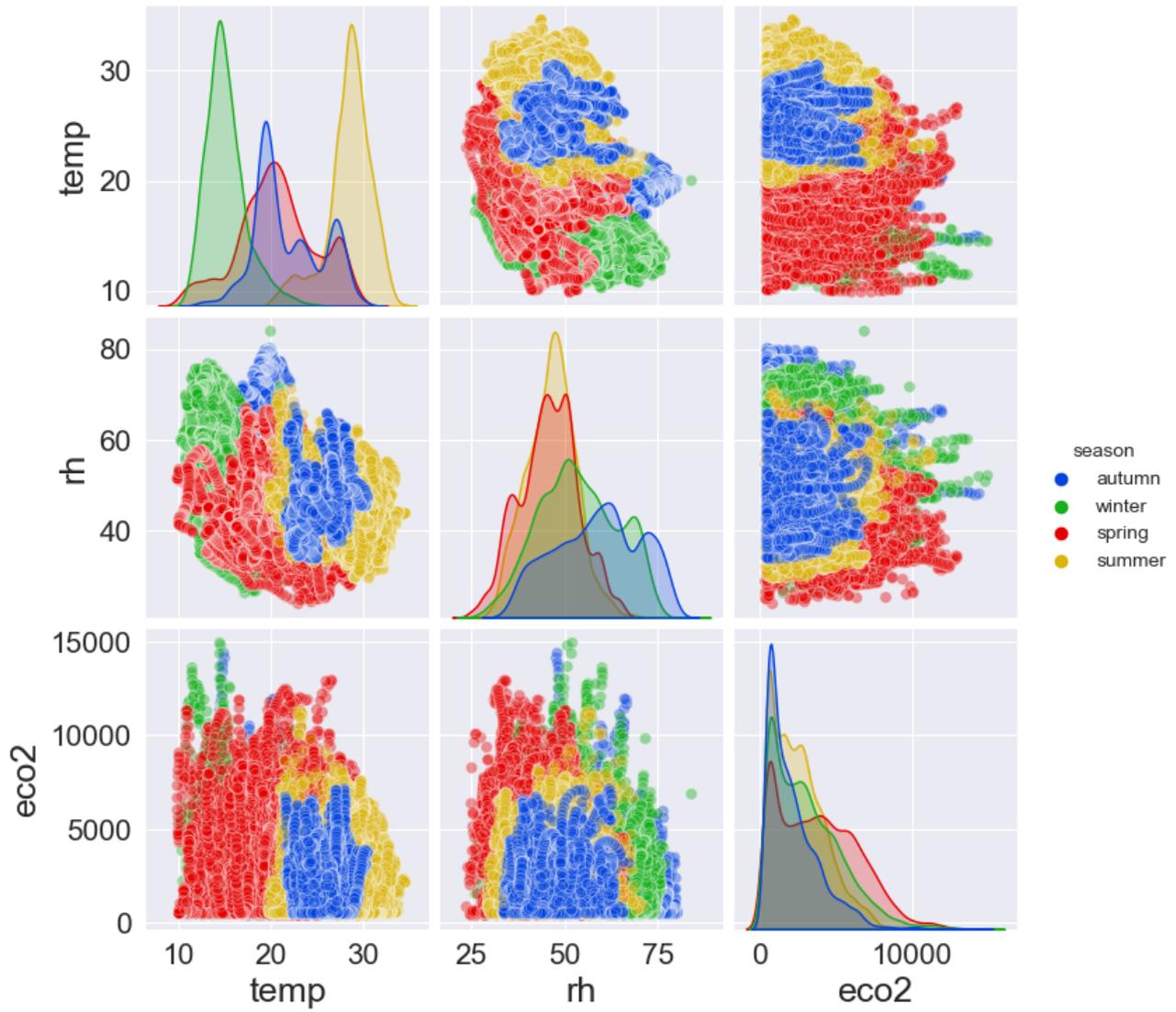


Figura 86: grafici di correlazione tra temperatura, umidità relativa ed eCO2 durante tutti i mesi di osservazione tra il 2021 e il 2022 nell'ufficio 15. I diversi colori permettono di distinguere i valori misurati nelle diverse stagioni.

5 Modello energetico con software commerciale

Si realizza un modello energetico della struttura che permetta di valutare lo stato di fatto, in questo caso con particolare attenzione agli aspetti termici, ma non solo. Nel modello si analizzano i consumi per la climatizzazione degli ambienti, l'illuminazione e tutti i dispositivi e le apparecchiature presenti. A partire dallo stato di fatto è poi possibile valutare l'efficacia di alcuni interventi migliorativi sia in termini di prestazioni energetiche, sia in termini di prestazioni economiche valutando il VAN (valore attuale netto) e il tempo di ritorno dell'investimento.

I passi seguiti sono i seguenti:

- 1) raccolta delle informazioni sulle strutture e le stratigrafie e sugli impianti presenti;
- 2) valutazioni delle caratteristiche di utilizzo in modo che siano quanto più aderenti possibile alla realtà;
- 3) creazione del modello digitale della struttura;
- 4) simulazione dinamica oraria della struttura per la valutazione delle prestazioni e dei fabbisogni energetici e dell'andamento delle temperature interne;
- 5) proposta di interventi migliorativi e valutazione della loro efficacia (capitolo 6).

5.1 Modellazione dell'edificio

Di seguito si analizzano le strutture opache e trasparenti dell'edificio e gli impianti nello stato attuale attraverso la simulazione energetica realizzata col software commerciale Termolog.

Come prima cosa si è creato un modello semplificato dell'edificio che include tutti gli elementi fondamentali per la definizione di un modello energetico. Sono state modellate le superfici disperdenti sulla base dei dati noti. Alcune informazioni derivano dall'analisi delle stratigrafie eseguite da un ricercatore ENEA. In alcuni casi limitati, invece, in mancanza di una conoscenza precisa della stratigrafia, è stato necessario ipotizzare i materiali, gli spessori e le proprietà in funzione: del rilievo tecnico eseguito nel sito, degli spessori misurati nel sopralluogo, dello stato di conservazione degli elementi costruttivi e del periodo di costruzione dell'edificio. Alcuni materiali e le relative caratteristiche sono poi stati scelti tra quelli dell'archivio del software. Nel caso del tufo dei muri perimetrali, invece, sono state inserite le caratteristiche misurate in laboratorio del tufo prodotto dall'azienda Gravina Tufi S.r.l. Questa azienda, infatti, commercializza tufo cavato a Gravina in Puglia, in provincia di Bari, per cui si ipotizza che le caratteristiche siano confrontabili col tufo usato. Dalla Figura 87 si vede che sono state inserite nel modello anche due sovrastrutture presenti sul tetto per tenere conto del loro effetto coibente. Non si mostra il piano inferiore, non riscaldato, che è stato comunque considerato ai fini del calcolo delle dispersioni termiche. Nella modellazione sono stati considerati anche i principali ponti termici.

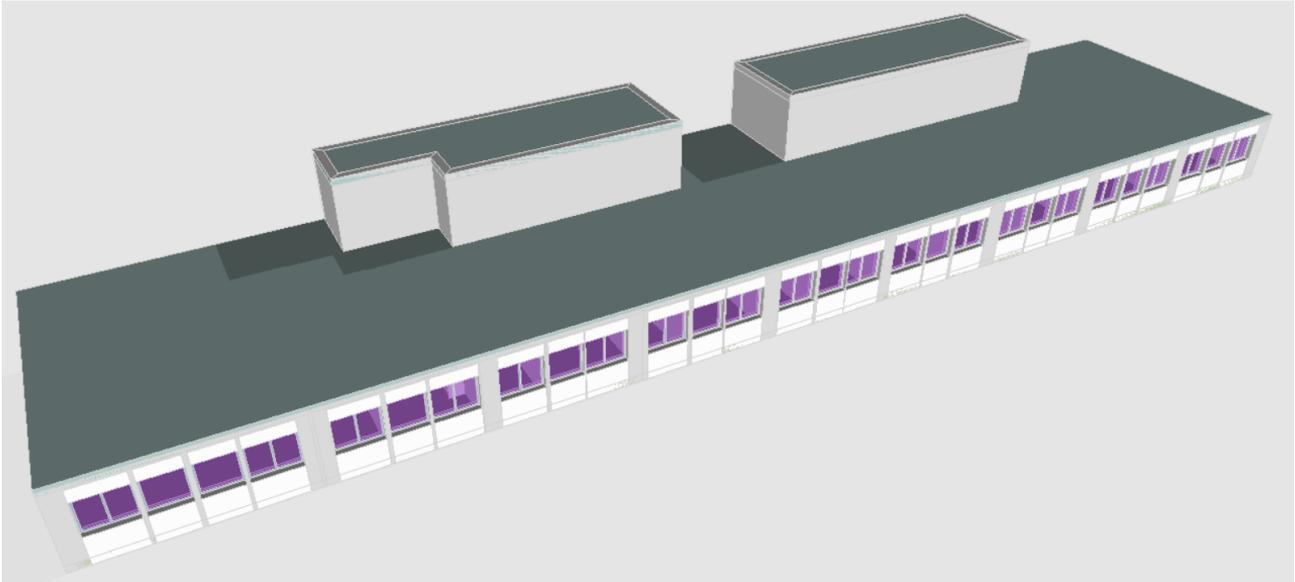


Figura 87: modello tridimensionale semplificato della struttura simulata.

Di seguito si indicano alcuni dati dell'edificio per la creazione del modello:

- Altezza dei vani non controsoffittati: 2,99m
- altezza dei vani controsoffittati: 2,44m (corridoio)
- altezza del vano controsoffittato 2,70m (dinette)
- altezza vani bagni (controsoffittati 2,60m) (bagni)
- profondità vano interno corpo di fabbrica 11,19m (il cad riporta 11,35. Se dovrò rifare tutto da capo modifico)

5.1.1 Stratigrafia e prestazioni dei muri perimetrali

I muri perimetrali sono del tipo a cassa vuota, tipici del periodo di costruzione, e presentano una stratigrafia inusuale che vede i blocchi di tufo all'esterno e mattoni forati all'interno. L'intercapedine è di 10 cm. Nella Figura 88 si mostra la stratigrafia così come modellata con Termolog: a sinistra il lato interno, a destra quello esterno.

Nella Tabella 38 si leggono le caratteristiche dei materiali da costruzione e i relativi spessori, resistenze e conducibilità termiche, densità e capacità termica massica. Ogni strato presenta una propria conducibilità termica λ , misurata in $W/(m \cdot K)$, da cui si deriva la resistenza termica R :

$$R = \frac{\text{spessore}}{\lambda}$$

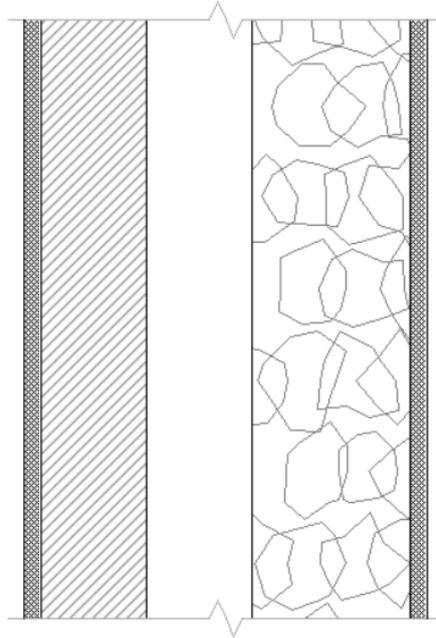


Figura 88: stratigrafia delle pareti perimetrali. Sulla destra il lato esterno e a sinistra quello interno.

La resistenza termica totale si può calcolare come:

$$R_T = R_{si} + \sum_{i=1}^N \frac{s_i}{\lambda_i} + R_{se}$$

dove:

- R_T = resistenza termica totale;
- R_{si} = resistenza superficiale interna;
- s_i = spessore di uno strato della parete;
- λ_i = conducibilità termica di uno strato della parete;
- R_{se} = resistenza termica esterna

e si misura in $m^2 \cdot K/W$.

Infine si ricava la trasmittanza termica dell'elemento come:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

la cui unità di misura è $W/(m^2 \cdot K)$.

La parete in questione ha una trasmittanza termica di 1,132 $W/(m^2 \cdot K)$ e una massa frontale di 305 kg/m^2 .

	Strati	Spessore [mm]	R [m ² ·K/W]	λ [W/m·K]	ρ [kg/m ³]	C [kJ/kg·K]
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)		0,1300	7,690		1,000
A	Intonaco interno	15,0	0,0214	0,700	1.400,000	1,000
B	Mattoni forati (R=0,310m ² k/W)	100,0	0,2583	0,387	800,000	1,000
C	Aria 100 mm (flusso orizzontale)	100,0	0,1786	0,560	1,200	1,000
D	Tufo (1500 kg/m ³)	150,0	0,2381	0,630	1.500,000	1,300
E	Intonaco esterno	15,0	0,0167	0,900	1.800,000	1,000
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)		0,0400	25,000		1,000

Tabella 38: strati delle pareti perimetrali e relative caratteristiche.

5.1.2 Stratigrafia e prestazioni dei solai

Tutti i solai presentano una struttura con pignatte in laterizio e travetti e getto in calcestruzzo armato. Sul lato inferiore è presente l'intonaco e su quello superiore o la pavimentazione o, nel caso del solaio del tetto a terrazza la guaina impermeabilizzante. Poiché le caratteristiche termofisiche sono sostanzialmente identiche, si riporta soltanto la stratigrafia del solaio costituente il tetto (Figura 89 e Tabella 39).

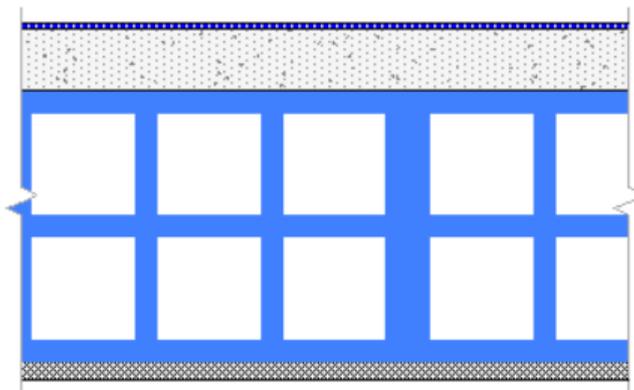


Figura 89: stratigrafia del solaio costituente il tetto dell'edificio e soffitto del piano degli uffici.

	Strati	Spessore [mm]	R [m ² ·K/W]	λ [W/m·K]	ρ [kg/m ³]	C [kJ/kg·K]
	Adduttanza interna (flusso verticale ascendente)		0,1000	10,000		1,000
A	Intonaco interno	15,0	0,0214	0,700	1.400,000	1,000
B	Pignatta in laterizio	220,0	0,3679	0,598	1.100,000	1,000
C	Calcestruzzo armato (getto)	50,0	0,0262	1,910	2.400,000	1,000
D	Guaina in bitume	5,0	0,0294	0,170	1.200,000	0,920
	Adduttanza esterna (flusso verticale ascendente)		0,0400	25,000		1,000

Tabella 39: strati del solaio del tetto e relative caratteristiche.

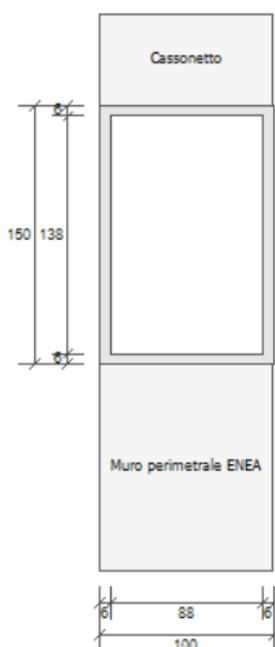
La trasmittanza termica è di 1,710 W/(m²·K) e la massa frontale di 368 kg/m².

5.1.3 Stratigrafia e prestazione dei serramenti

La struttura presenta finestre a nastro in alluminio e vetro singolo (spessore 3 mm). La tenuta all'aria è molto scarsa per la mancanza di guarnizioni, per come sono strutturati gli infissi, con apertura scorrevole, e per la difficoltà nella chiusura di alcuni. Sono presenti oscuranti, nella fattispecie tapparelle, molte delle quali bloccate. I cassonetti non sono coibentati. Al di sotto delle finestre è presente il muro perimetrale con la stratigrafia già descritta.

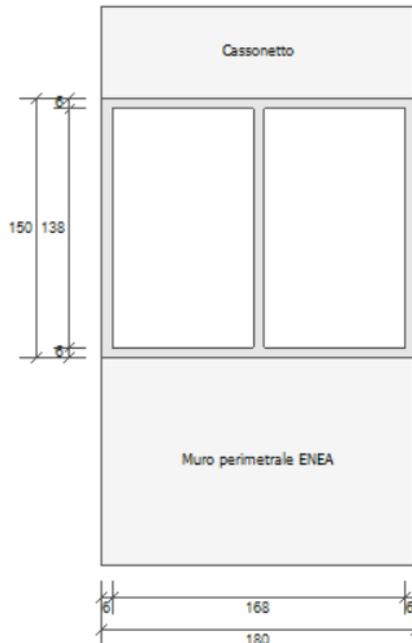
Nella definizione della geometria del serramento nel software di calcolo, si deve considerare un'altezza da terra pari al "sottofinestra" più metà dello spessore del pavimento se sotto di esso c'è un locale riscaldato, o tutto lo spessore se ci si trova sopra ad un locale non riscaldato, al terreno o si è all'esterno, ad esempio sopra un porticato.

Si imposta un elevato coefficiente di trasmissione luminosa T_L del vetro di 0,88 perché lo spessore del vetro è inferiore a quanto oggi comunemente usato e non presenta alcun trattamento risultando molto trasparente. Riguardo agli apporti solari, si considera un coefficiente di guadagno solare $g = 0,85$. I cassonetti considerati presentano una trasmittanza termica $U = 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



$$U_w = 5,985 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Figura 90: finestra fissa 100 x 150 cm.



$$U_w = 5,962 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Figura 91: finestra con apertura scorrevole 180 x 150 cm.



$$U_w = 5,942 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Figura 92: finestra fissa 145 x 150 cm.

Sono infine presenti quattro porte di emergenza in ferro, due verso l'esterno e due verso locali non riscaldati.

5.1.4 Ponti termici

In corrispondenza delle discontinuità geometriche e strutturali di un edificio il flusso del calore non è più unidimensionale, normale alle superfici che va dalla zona più calda a quella più fredda, ma bi- o tridimensionale. Inoltre, cosa fondamentale, i ponti termici comportano una maggior dispersione di calore che va considerata tanto più quanto più un edificio è isolato perché assumono un peso talvolta molto rilevante sul totale delle dispersioni termiche.

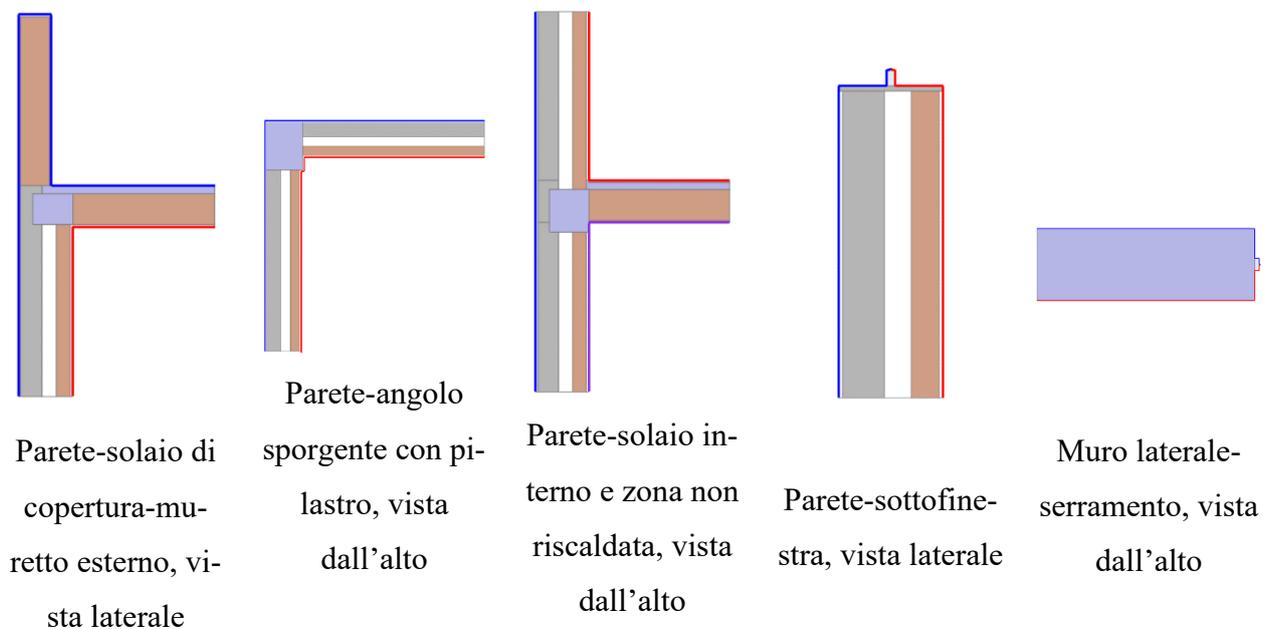


Figura 93: ponti termici simulati.

Si noti che nel caso dell'ultimo ponte termico riportato nella Figura 93, quello che comprende il muro tra due finestre contigue, si tratta di una sottile colonna in calcestruzzo armato di spessore superiore alla muratura, rispetto alla quale sporge sul lato esterno creando un grande ponte termico.

5.1.5 Impianti per la climatizzazione

Il sistema di climatizzazione per il riscaldamento e il raffrescamento degli uffici è soddisfatto dalla presenza di impianti ad espansione diretta. I climatizzatori presenti, di tipo mono-split, sono di marca Olimpia Splendid, modello NEXYA S4 E INVERTER 9 C con gas refrigerante R32. La scheda tecnica fornita dal produttore è riportata in appendice B. Si tratta di macchine abbastanza efficienti, con COP ed EER elevati che permettono di contenere molto il consumo elettrico. L'accensione e l'impostazione della temperatura sono manuali tramite telecomando. Il climatizzatore modula la potenza termica immessa tramite PID per raggiungere e mantenere la temperatura richiesta.

Per quanto riguarda il riscaldamento dei servizi igienici sono presenti dei radiatori elettrici a resistenza che si possono considerare idealmente con $COP = 1$.

Lo stato di conservazione degli impianti è ottimo

5.1.6 Illuminazione

L'illuminazione presente è interamente a led. Ogni stanza, a seconda delle dimensioni presenta due o quattro plafoniere a soffitto ognuna con un consumo di 38 W. Nelle due sale per riunioni e conferenze, invece, ve ne sono otto. Corridoi e bagni presentano apparecchi da incasso da 23 W. Ad ogni locale è stato attribuito l'esatto numero di apparecchi per stimare sia il consumo diretto, sia dei carichi termici endogeni necessari per il calcolo del consumo della climatizzazione estiva. Il controllo è completamente manuale attraverso interruttori meccanici. È presente anche un interruttore che, all'uscita dell'ultimo utente, permette di spegnere tutte le luci di ogni locale agendo su un relè nel quadro generale.

5.2 Prestazioni energetiche

La simulazione è stata svolta considerando quali ambienti sono effettivamente usati e quali no così da avere dei consumi quanto più aderenti possibile alla realtà. Anche gli orari di lavoro e le modalità d'uso sono state impostate in modo simile, tuttavia non si è riusciti a raggiungere un livello di dettaglio tale da cogliere le variabilità nella presenza per singolo ufficio. Questo ha condotto ad uno scostamento rispetto ai consumi misurati.

Dalla simulazione emerge che l'edificio si trova in classe energetica D con un consumo di energia primaria globale non rinnovabile $EP_{gl,nren}$ di 276,32 kWh/m² e una quota di energia rinnovabile sul totale del 39,6%.

Parametro	Valore	Unità di misura
$EP_{gl,nren}$	166,96	kWh/m ²
$EP_{gl,ren}$	109,37	kWh/m ²
$EP_{gl,tot}$	276,32	kWh/m ²
QR_{gl}	39,6	%

Tabella 40: fabbisogno complessivo di energia primaria rinnovabile, non rinnovabile, globale e quota rinnovabile di energia primaria.

Per quanto riguarda i fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento, i valori al metro quadro annuali sono riportati nella Tabella 41. Si tratta di valori piuttosto elevati dovuti alle scarse prestazioni dell'involucro edilizio.

Parametro	Valore	Unità di misura
EPH_{nd}	149,62	kWh/m ²
EPC_{nd}	104,12	kWh/m ²

Tabella 41: fabbisogno termico per riscaldamento e raffrescamento.

Dalla simulazione svolta è stato anche possibile definire l'andamento delle temperature interne per ogni locale riscaldato, da cui si può valutare il livello di comfort termico, e la firma energetica simulata "di progetto".

Nella Figura 94 si osserva l'andamento della temperatura simulata dell'ufficio 18 e della temperatura esterna. La zona azzurra e la zona rossa indicano il campo di variabilità della temperatura esterna ed interna: si rileva che la temperatura media interna, in corrispondenza della linea rossa più marcata è ben al di sotto dei 20 gradi celsius impostati da progetto, segno che l'impianto ha difficoltà a raggiungere la temperatura desiderata a causa delle elevate dispersioni termiche in inverno. Relativamente all'estate il comportamento è simile e risulta difficile mantenere i 26 gradi considerati come standard stavolta per l'elevatissimo apporto termico solare. Ad impianto spento, ossia nei fine settimana, si vede che la temperatura ambiente precipita in inverno e sale particolarmente in estate.

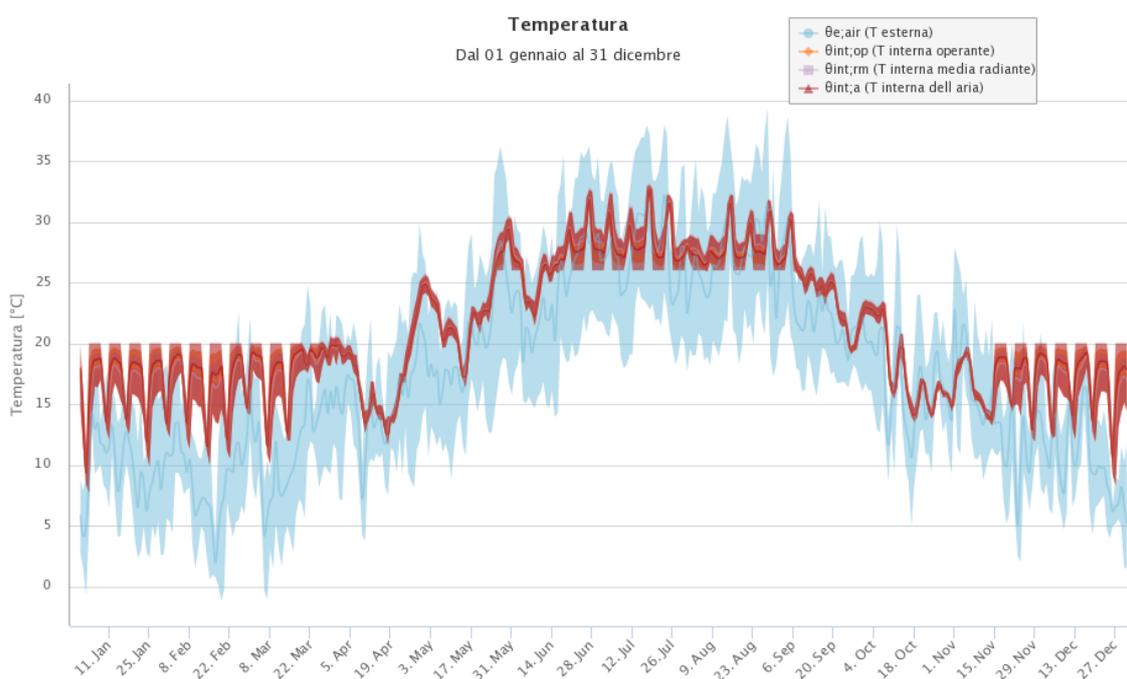


Figura 94: andamento della temperatura interna ed esterna nell'arco di un anno simulato per l'ufficio 18.

Infine, si simula la firma energetica di riscaldamento e di raffrescamento (Figura 95)

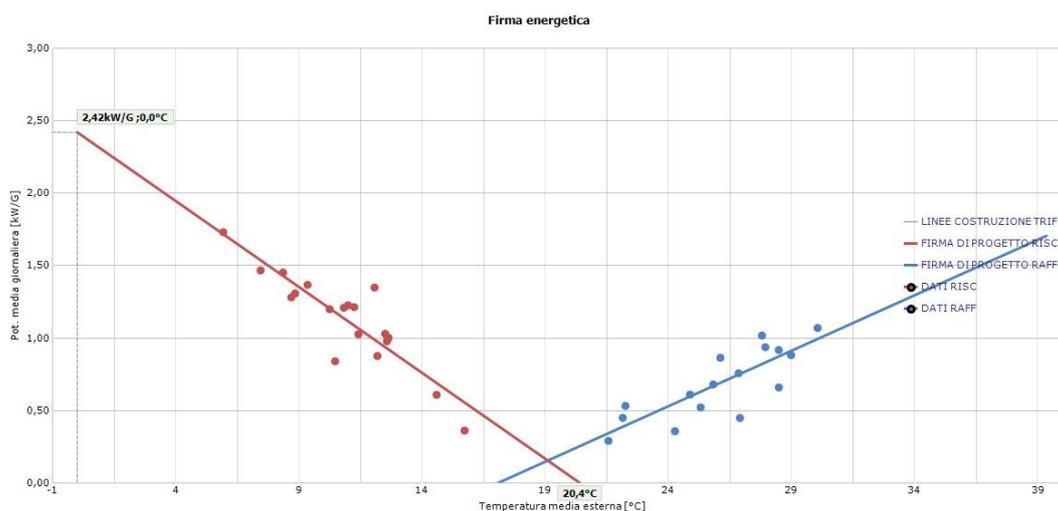


Figura 95: firma energetica di riscaldamento e raffrescamento dell'ufficio 18.

La retta ha una pendenza di 2,42 kW/G di temperatura media esterna. Anche in questo caso, come nelle firme energetiche calcolate dai dati reali, i punti sono abbastanza dispersi nel piano e non si allineano bene lungo la retta, anche se in misura meno evidente.

Si diceva poc'anzi che si ha difficoltà e talvolta non si riesce a mantenere la temperatura desiderata in ambiente. Questo fatto trova riscontro nella realtà: il personale lamenta problemi di discomfort termoigrometrico soprattutto in inverno non solo per la temperatura dell'aria inferiore a quella impostata, ma anche per la bassa temperatura media radiante e l'effetto parete fredda causato dalle finestre, dai muri esterni e dal tetto non isolati.

5.3 Confronto tra i risultati della modellazione energetica e i dati effettivamente misurati

I valori ottenuti dalla modellazione energetica e dalla misurazione in campo non sono direttamente confrontabili. Pur facendo riferimento in entrambi i casi al consumo totale del piano uffici rapportato alla sua superficie totale di 553 mq ed avendo tenuto conto nella creazione del modello degli spazi non usati (qui l'impianto di climatizzazione è stato considerato sempre spento), non si è potuta cogliere la variabilità della presenza del personale né il fattore umano nell'uso degli ambienti e degli impianti. Poiché nell'energia primaria rinnovabile calcolata attraverso il modello è computata quella proveniente dall'ambiente esterno grazie all'uso delle pompe di calore, non si può confrontare con la sola quota rinnovabile inclusa nel vettore elettrico e proveniente dalla produzione elettrica rinnovabile italiana. Gli *smart meter*, misurando esclusivamente l'energia elettrica consumata dalle varie utenze, permettono un confronto solo su questo valore. Facendo riferimento ai coefficienti di conversione di energia elettrica in energia primaria rinnovabile e non rinnovabile (Tabella 16), l'unico valore direttamente confrontabile è quello del consumo specifico di energia primaria non rinnovabile. Dal confronto di questo valore si vede che nella realtà il consumo specifico EP_{nren} è stato di 116,9

kWh/(m²·a), come riportato nella Tabella 17, mentre il valore calcolato con Termolog risulta di 166,96 kWh/(m²·a): il valore misurato è circa del 30% inferiore.

Da questo si comprende che un modello come quello realizzato è uno strumento utile per valutare e simulare i consumi e il comportamento energetico di un edificio, stimare il comfort termico, confrontare tra loro edifici che hanno un profilo d'uso simile, ma in questo caso specifico di un utilizzo variabile nel tempo e non prevedibile i risultati possono differire dalla realtà. Certamente, nel caso di un uso costante e ben definito la simulazione sarebbe stata sovrapponibile alla realtà.

Gli interventi di miglioramento sono proposti nel capitolo 6.

6 Proposta di interventi migliorativi

Si raccolgono di seguito tutti gli interventi migliorativi di cui si è accennato in precedenza ordinandoli in termini di costo e velocità di realizzazione. I primi interventi elencati sono infatti quelli più facilmente e rapidamente attuabili e presentano il massimo rapporto tra costi e benefici e il minimo tempo di rientro dell'investimento.

Per stimare il risparmio economico che si sarebbe potuto ottenere nei circa 12 mesi analizzati, si considera cautelativamente un costo dell'energia elettrica di 0,25 €/kWh, inferiore al prezzo medio di acquisto dell'energia elettrica nello stesso periodo, ma che permette di non sovrastimare i risparmi anche per un futuro in cui si spera che il costo sia minore.

6.1 Logica in cloud per lo spegnimento e l'accensione dei climatizzatori

Il primo intervento è quello relativo alla realizzazione di una logica in cloud per lo spegnimento automatizzato dei climatizzatori split.

Si ipotizza di tagliare del 90% i consumi tra le 20 e le 7 di mattina. La scelta degli orari dipende dal fatto che alcuni lavoratori restano in ufficio la sera fino a tardi e quindi si vuole evitare di creare disagio, che tuttavia sarebbe limitato perché, dopo l'invio del comando di spegnimento, il climatizzatore può essere riacceso senza alcun problema col telecomando. Si ipotizza inoltre di tagliare il consumo del 90% perché, principalmente nel periodo estivo il climatizzatore per il raffreddamento degli apparati di rete deve restare acceso.

Il risparmio così conseguibile sarebbe superiore ai 7000 kWh l'anno, sulla base dei dati storici che, ad un prezzo dell'energia di 0,25 €/kWh, corrisponde ad un risparmio annuo di 1750 €. Poiché i telecomandi connessi sono già presenti, il costo di implementazione sarebbe minimo, trattandosi solo di scrivere un piccolo blocco di codice da eseguire in cloud e di programmare il relativo calendario per definire gli orari e i giorni di accensione. Si ipotizza un tempo di programmazione di circa 12 ore e un costo di circa 900 €. Il tempo di rientro dell'investimento sarebbe di circa 16 mesi. I dati sui vari interventi sono riassunti nella Tabella 46 alla fine del capitolo.

Si sottolinea anche che questo intervento non comporta alcuna riduzione del comfort termico perché prevede esclusivamente lo spegnimento della climatizzazione in assenza di personale.

Inoltre sarebbe possibile realizzare una logica che permetta di accendere con anticipo i climatizzatori per preriscaldare in inverno o preraffreddare gli uffici in estate migliorando il comfort termico: si ha infatti che, soprattutto in inverno, le condizioni termo-igrometriche nella prima mattinata sono tali da creare discomfort per gli occupanti. Attraverso la creazione di un calendario in cloud in cui ogni ricercatore può indicare la propria presenza in ufficio nel giorno successivo, si può accendere il climatizzatore con un anticipo consono a trovare la temperatura desiderata all'arrivo. L'anticipo di accensione, inoltre dovrà essere variabile per tenere conto della temperatura interna di partenza e di quella esterna per calcolare il tempo di riscaldamento. Questo permette sia di evitare eccessivo anticipo di accensione, che si tradurrebbe in un consumo eccessivo, o un ritardo, che comporterebbe il

mancato raggiungimento della temperatura di set-point e quindi discomfort. Inoltre, con un sistema finemente messo a punto, si potrebbero realizzare delle rampe all'accensione variando gradualmente la temperatura di set-point del climatizzatore man mano che varia la temperatura del locale in modo da far lavorare la macchina in una zona di più alta efficienza ed evitare picchi di assorbimento.

6.2 Accensione e spegnimento automatizzato del riscaldamento dei bagni

Questo secondo intervento presenta dei costi di realizzazione maggiori, tuttavia limitati e di molto inferiori al beneficio ottenibile.

Poiché i radiatori elettrici sono alimentati da due linee monofase, si possono inserire nel quadro elettrico due contattori controllati attraverso il relè dello *smart meter* Shelly EM. Lo Shelly EM, infatti, può ricevere dal cloud un segnale per attivare o spegnere un carico attraverso un relè interno. Poiché detto relè sopporta correnti fino a 2 A, è del tutto inadatto per il controllo diretto di questo carico. Si propone quindi di sfruttare il relè interno per comandare i due contattori da installare nel quadro. Inoltre, è opportuno aggiungere un selettore automatico/manuale per escludere il controllo del carico dal cloud e forzare spegnimenti o accensioni in caso di bisogno. L'intervento è possibile grazie allo spazio libero, per quanto limitato, presente nel quadro elettrico.

Da ultimo, un controllo di questo tipo permette anche di rispondere ad eventuali richieste dell'operatore dei servizi di rete per attuare logiche di *peak shaving* e *load shifting* senza creare particolari problemi di discomfort se il taglio del riscaldamento avviene per un tempo limitato: il riscaldamento dei bagni si considera come un carico non critico.

Anche in questo caso, a meno di brevi distacchi richiesti dall'operatore di rete, non si va ad inficiare il comfort termico perché si prevede lo spegnimento nelle ore di non occupazione.

Il costo di intervento è stato calcolato facendo riferimento al prezzario regionale della Marche, che riporta costi molto aderenti alla realtà e prossimi al prezzario nazionale. La stima del costo può essere quindi considerata attendibile anche per la Puglia. Si prevede totale imponibile di 430,41€ che comprende sia i lavori elettrici, sia l'aggiornamento della documentazione relativa al quadro, ossia dello schema elettrico e della certificazione. Per sicurezza si considera un costo leggermente maggiorato di 500 €. In appendice (Allegato A) si riportano le voci da capitolato con i relativi costi. A questo costo va poi aggiunto un costo per la programmazione logica di controllo e del calendario per l'accensione/spegnimento in cloud per un totale di 900 €. Il costo complessivo dell'operazione risulta di circa 1400 € e il tempo di rientro è valutato in circa 16 mesi. I dati sono riassunti nella Tabella 46.

6.3 Spegnimento dei boiler durante le chiusure

Per quanto il consumo dei boiler per l'ACS sia piccolo rispetto al resto dei consumi e il margine di guadagno limitato, si propone di spegnere manualmente i boiler nei periodi di chiusura della sede attraverso gli interruttori nel quadro elettrico generale. Il risparmio ottenibile è molto limitato, ma il costo è zero.

Infine, in un'ottica di flessibilità della domanda, anche questo carico può partecipare al *peak shaving* e al *load shifting* senza creare alcun problema di discomfort.

6.4 Sostituzione degli infissi e degli oscuranti

Un altro intervento necessario per tutto l'edificio, non solo per il settimo piano, riguarda la sostituzione degli infissi. Come si è più volte detto, le prestazioni sono davvero scadenti, e la sostituzione porterebbe non solo a ridurre drasticamente sia i consumi estivi, sia quelli invernali, ma permetterebbe anche di ridurre drasticamente le fluttuazioni di temperatura in caso di spegnimento della climatizzazione grazie alla minore dispersione termica.

Da un punto di vista del comfort termico, infissi dalle elevate prestazioni invernali permettono di limitare il cosiddetto "effetto parete fredda", dovuto alla bassa temperatura superficiale di una superficie come un muro o una finestra. Poiché la superficie vetrata è molto grande, il miglioramento sarebbe notevole. In estate, scegliendo dei vetri con trattamento selettivo per limitare il fattore solare, si limiterebbe notevolmente il riscaldamento degli ambienti.

Scegliendo ad esempio un vetro come il Saint Gobain PLANITHERM Infinity montato in una configurazione standard 4 mm – 16 mm argon 90% - 4 mm, ossia con due vetri di spessore 4 mm separati da una camera di 16 mm riempita con argon al 90%, si raggiungono le prestazioni riportate nella seconda riga della Tabella 42

Vetro	Trasmissione luminosa % (Tl)	Fattore solare (g)	Trasmittanza termica vetro (Ug)
Vetro chiaro singolo (ante intervento)	88 %	0,88	5,75 W/(m ² K)
Vetro PLANITHERM Infinity (post intervento)	72 %	0,38	1,0 W/(m ² K)

Tabella 42: confronto tra le prestazioni dei vetri esistenti e i nuovi vetri proposti a titolo di esempio.

Grazie alla sostituzione degli infissi, degli oscuranti e dei cassonetti, dalla simulazione con Termolog si prevede una riduzione del fabbisogno termico di riscaldamento del 19% e di quello per il raffreddamento del 65% (Tabella 43).

Questo intervento è quello che da solo comporta il maggior beneficio in termini di riduzione di consumo di energia primaria, in particolare grazie ad una notevolissima riduzione del surriscaldamento estivo. Il basso fattore solare g del vetro scelto per la riqualificazione permette di limitare al 38% il passaggio di calore del sole attraverso il vetro pur mantenendo una elevata trasparenza e le tapparelle apportano un ulteriore beneficio in termini di schermatura solare. Alla combinazione di questi due fattori si deve la drastica riduzione dei consumi per la climatizzazione estiva.

Parametro	Stato di fatto kWh/(m ² ·a)	Post-intervento kWh/(m ² ·a)	Variazione
EPH,nd	149,62	120,69	-19%
EPC,nd	104,12	36,7	-65%
EPgl,nren	166,96	119,7	-28%
EPgl,ren	109,37	93,58	-14%
EPgl,tot	276,32	213,29	-23%
QR,gl	39,6	43,9	4,3 pt perc

Tabella 43: confronto tra le prestazioni post-intervento di sostituzione degli infissi e lo stato di fatto.

Con un consumo di energia primaria non rinnovabile di 119,7 kWh/(m²·a) si salirebbe alla classe energetica C.

Per rapportare il risparmio calcolato ai consumi effettivamente misurati, si può pensare tagliare il consumo di energia elettrica della stessa percentuale di energia primaria non rinnovabile: poiché l'energia primaria non rinnovabile corrisponde al consumo elettrico per 1,95, tagliare questo consumo del 28% significa tagliare anche il consumo elettrico della stessa cifra.

6.5 Isolamento a cappotto del tetto

Come già detto, il tetto non presenta alcun genere di isolamento termico. Si propone di realizzare un isolamento a cappotto, ossia sull'esterno, con lastre di isolante adatto a sopportare elevate sollecitazioni di compressione perché il lastrico solare è calpestabile. L'intervento andrà realizzato prima della posa di un impianto fotovoltaico onde evitare di doverlo smontare per eseguire l'opera e rimontare. Infine, il tetto andrà rivestito con una guaina riflettente per limitare al minimo l'assorbimento della radiazione solare nel periodo estivo e per massimizzare l'assorbimento di luce da parte di eventuali moduli fotovoltaici bifacciali. Posizionare l'isolante sul lato esterno permette di mantenere l'elevata massa termica della struttura all'interno inalterata, con i benefici che questo comporta.

Il materiale scelto per l'intervento è il Neodur SBK 150 – polistirene Neopor, un polistirene a celle chiuse additivato con grafite per ottenere una elevata riflessione della radiazione termica migliorando le prestazioni e presenta una resistenza alla compressione di 150 kPa. La conducibilità termica dichiarata dal produttore $\lambda = 0,030 \text{ w/(m}\cdot\text{K)}$ e lo spessore di 100 mm: non si sceglie uno spessore maggiore perché il beneficio ottenibile è minimo. Piuttosto che incrementare questo spessore sarebbe conveniente intervenire anche sull'isolamento delle facciate, ma questo cambierebbe l'aspetto esterno dell'edificio. Dalla simulazione svolta con Termolog il risparmio conseguibile sarebbe del 42% sul consumo per il riscaldamento e avrebbe un effetto leggermente negativo in estate perché la dispersione del calore verso l'esterno nelle ore notturne più fresche. I risultati dell'intervento sono riassunti nella Non è stato possibile invece stimare il risparmio estivo portato dal rivestimento riflettente perché non è possibile inserire il valore di riflessione della superficie.

Con un consumo di energia primaria non rinnovabile di 144,25 kWh/(m²·a) si salirebbe alla classe energetica C.

Parametro	Stato di fatto kWh/(m ² ·a)	Post-intervento kWh/(m ² ·a)	Variazione
EPH,nd	149,62	86,51	-42%
EPC,nd	104,12	111,08	7%
EPgl,nren	166,96	144,25	-14%
EPgl,ren	109,37	76,15	-30%
EPgl,tot	276,32	220,4	-20%
QR,gl	39,6	34,6	-5 pt perc.

Tabella 44: confronto tra le prestazioni post-intervento di isolamento del tetto e lo stato di fatto.

6.6 Isolamento a cappotto del tetto e sostituzione degli infissi

Gli interventi, ovviamente, possono essere combinati. Nel caso specifico, l'isolamento del tetto migliora sensibilmente le prestazioni invernali e la sostituzione degli infissi quelle estive: dalla loro combinazione si possono ottenere i risultati migliori. Dalla Tabella 45 si legge che la riduzione del fabbisogno di riscaldamento è del 53% e quello di raffrescamento di ben il 57%. Il risultato è notevole. Anche il fabbisogno di energia primaria non rinnovabile si riduce di molto.

Parametro	Stato di fatto kWh/(m ² ·a)	Post-intervento kWh/(m ² ·a)	Variazione
EPH,nd	149,62	70,26	-53%
EPC,nd	104,12	44,72	-57%
EPgl,nren	166,96	112,08	-33%
EPgl,ren	109,37	63,94	-42%
EPgl,tot	276,32	176,01	-36%
QR,gl	39,6	36,3	-3,3 pt perc.

Tabella 45: confronto tra le prestazioni post-intervento di isolamento del tetto e di sostituzione degli infissi e lo stato di fatto.

Analizzando nel dettaglio le prestazioni (Figura 96) si osserva come con questi interventi portino ad un netto miglioramento delle condizioni termo-igrometriche con la temperatura interna che ora riesce a raggiungere sempre il set-point estivo ed invernale.

Questo miglioramento permetterebbe di realizzare con maggiore successo logiche di *peak shaving* e *load shifting* senza creare particolare discomfort sugli occupanti: se dall'operatore dei servizi di rete arrivasse la richiesta di ridurre la potenza assorbita per un breve periodo in un momento della giornata,

sarebbe possibile limitare la potenza dei climatizzatori senza che la temperatura subisca variazioni eccessive e si creino problemi legati al comfort.

Guardando invece alla firma energetica, ora la pendenza della retta di riscaldamento scende da 2,42 a 0,52 kW/G di temperatura media esterna, un valore quasi 5 volte inferiore. Un comportamento simile si ha per la retta del raffreddamento.

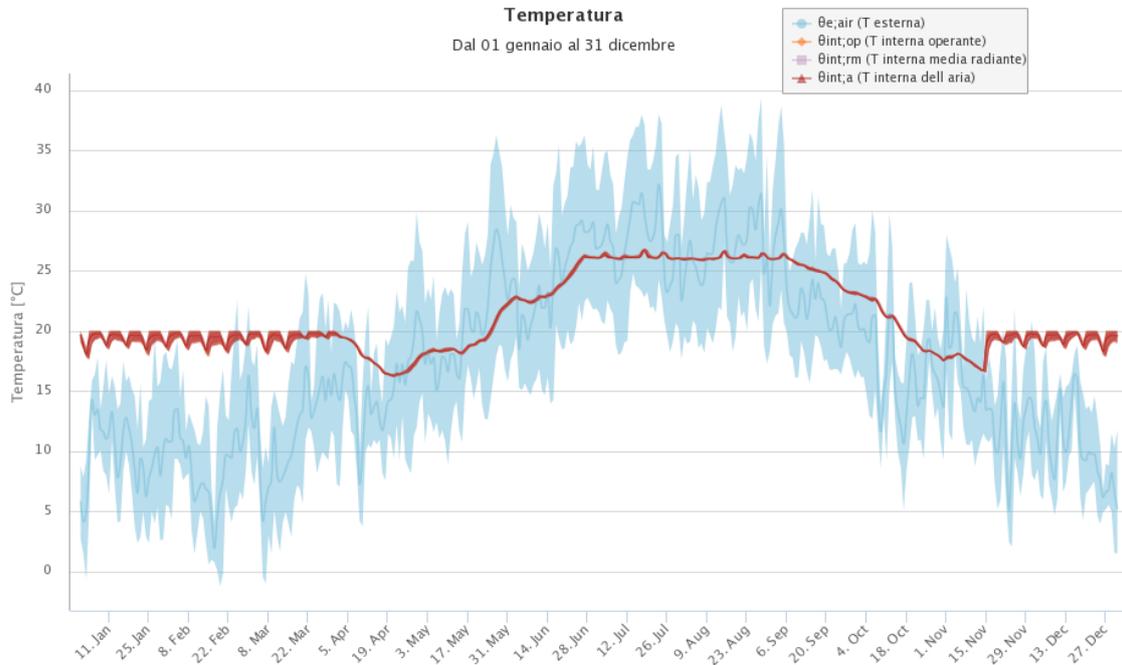


Figura 96: andamento della temperatura interna post-efficiantamento complessivo ed esterna nell'arco di un anno simulato per l'ufficio 18.

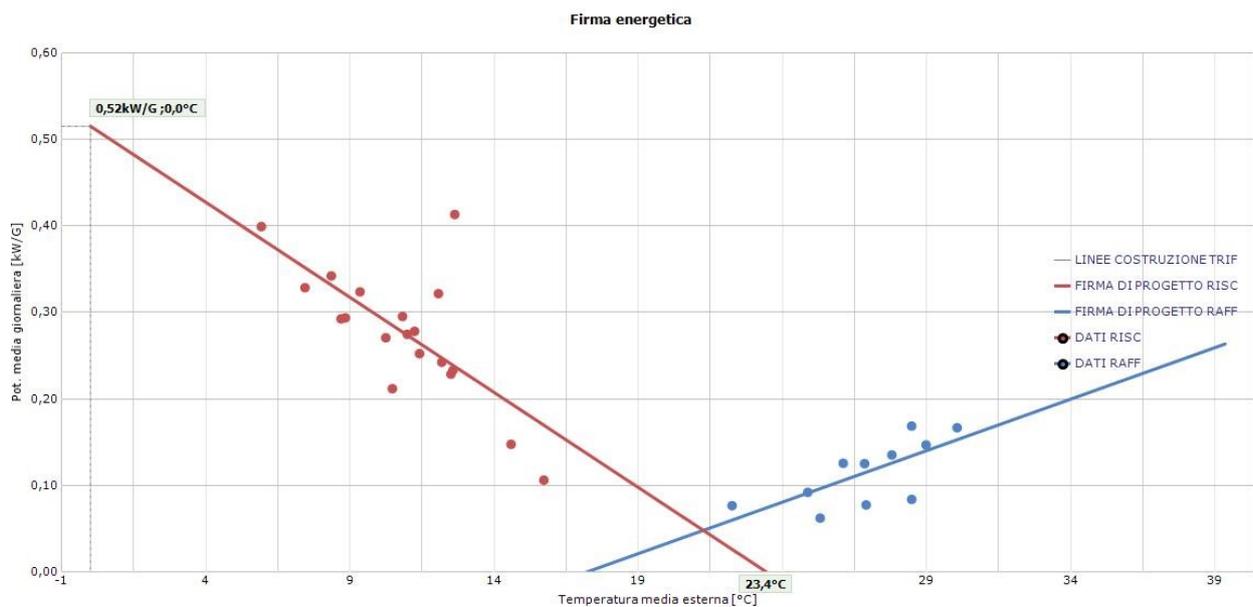


Figura 97: firma energetica di riscaldamento e raffreddamento dell'ufficio 18 post intervento di efficientamento con la sostituzione degli infissi e l'isolamento del tetto.

Nelle tabelle Tabella 46 e Tabella 47 si riassumono i risparmi ottenibili attraverso gli interventi proposti. Nel caso degli interventi di automazione si indicano riportano i consumi ante intervento, i risparmi previsti in termini di energia ed economici, il costo di intervento ipotizzato e il tempo ritorno dell'investimento. Nel caso degli interventi sulla struttura, poiché non è stato possibile stimarne il costo, questo dato e quelli correlati non sono riportati. Inoltre il risparmio previsto presenta una maggiore incertezza in quanto non deriva da una misura diretta, ma è stimato attraverso un software di simulazione ed è correlato al risparmio ottenibile con i sistemi di automazione.

Utenza	Consumo tot (kWh)	% fuori orario di lavoro	Consumo fuori orario lavoro (kWh)	% risparmio su consumo fuori orario di lavoro	% risparmio sul totale	Risparmio (kWh)	Risparmio (€)	Costo implementazione (€)	Tempo ritorno (mesi)
Radiatori bagni	6373	66,7%	4251	100%	66,7%	4251	1063	1400	16
Climatizzatori	9686	30,7%	2977	90%	27,7%	2680	670	900	16

Tabella 46: Consumi, risparmi previsti con interventi di automazione, costo dell'intervento e tempi di ritorno dell'investimento.

Intervento	Variatione EP _{gl,nren}
Sostituzione infissi	-28%
Isolamento tetto	-14%
Isolamento tetto + sostituzione infissi	-33%

Tabella 47: Riduzione del fabbisogno di energia primaria non rinnovabile con gli interventi sull'involucro edilizio.

7 Valutazione di massima installazione impianto fotovoltaico

Le analisi fin qui svolte hanno permesso di valutare con discreta precisione i consumi reali e di fare previsioni su alcuni scenari futuri, per quanto non esaustivi.

Ora, sulla base dei consumi storici e considerando i risparmi ottenibili con i più semplici interventi indicati nel capitolo 6, si confronta la produzione fotovoltaica con i consumi reali e ottimizzati.

7.1 Impianto fotovoltaico

Il tetto piano ben si presta all'installazione di un impianto fotovoltaico. Inoltre, grazie al rivestimento con un trattamento riflettente, presenta durante tutto l'anno una temperatura superficiale più bassa, a beneficio della produzione dei pannelli fotovoltaici (maggiore è la temperatura del modulo, minore è la produzione), e una elevata riflessione della luce che rende conveniente installare moduli bifacciali. I pannelli fotovoltaici bifacciali hanno il vantaggio di sfruttare la luce incidente su ambo le facce e permettono, a seconda dell'albedo della superficie sottostante, di incrementare la produzione dal 5 al 25 % circa.

In prima battuta si ipotizza di installare un impianto della potenza di picco di 25 kW che presenta il 10% di perdite di sistema (dovute a cavi, fusibili, inverter, mppt, perdite di efficienza dei moduli) ipotizzando di acquistare componenti top di gamma e di avere inclinazione e azimut ottimali.

I dati di produzione sono calcolati attraverso lo strumento PVGIS, realizzato dalla Commissione Europea e liberamente accessibile in internet. Nella Figura 98 si riporta la schermata con i risultati del calcolo fatto con PVGIS posizionando l'impianto nella sua posizione reale. In questa prima analisi si sceglie di considerare la produzione media mensile e di ricavare da questa la produzione media giornaliera di ogni mese. Non si scende al livello di simulazione oraria perché si vuole ottenere una stima di massima e per perché i dati di consumo orari non sono sempre disponibili per i problemi di misura riscontrati. Una simulazione oraria che consideri il profilo medio di produzione e di consumo permette di valutare la contemporaneità nell'arco delle 24 ore tra produzione e consumo.

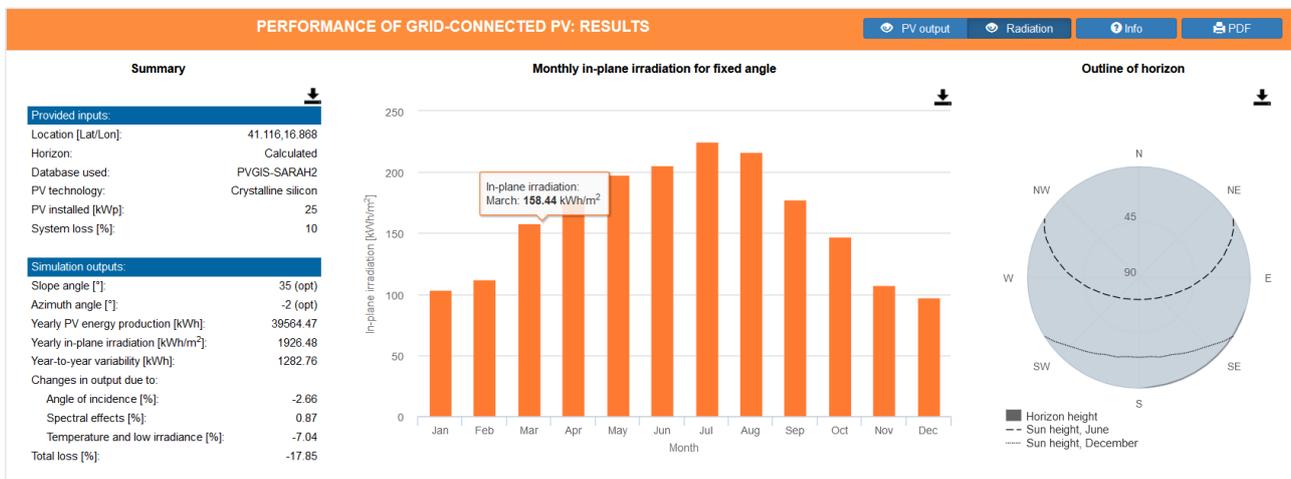


Figura 98: risultati del calcolo svolto con PVGIS

7.2 Confronto tra produzione fotovoltaica e consumi

7.2.1 Scenario con consumi reali misurati

Il primo confronto si svolge tra i consumi reali registrati tra ottobre 2021 e settembre 2022 e la produzione dell'impianto fotovoltaico sopra descritto. I risultati sono riassunti nel grafico della Figura 99. I dati relativi ai mesi di ottobre e novembre 2021, purtroppo, non sono affidabili per via di problemi riscontrati nell'acquisizione dei dati per cui il primo dato con cui calcolare il consumo mensile è del 12 del mese. Per gli altri mesi, invece, i dati sono corretti.

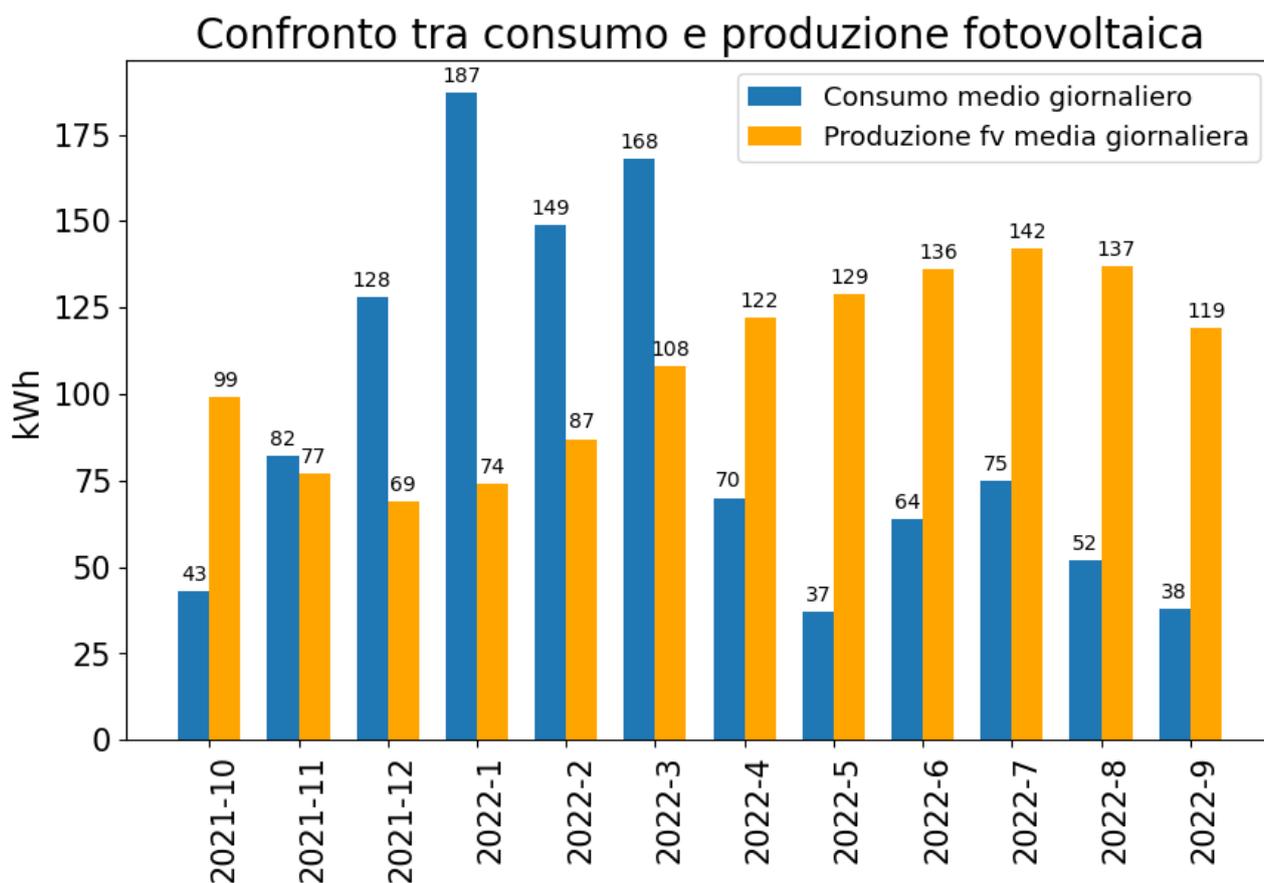


Figura 99: confronto tra produzione di un impianto fotovoltaico da 25 kWp e il consumo misurato nel periodo di studio.

Si osserva subito come il consumo medio giornaliero nei mesi da dicembre a marzo supera ampiamente la produzione fotovoltaica arrivando, nel mese di gennaio, ad un valore di oltre 2,6 volte la produzione. Questo avviene principalmente a causa del consumo incontrollato dei radiatori elettrici dei bagni. In generale, in tutto il periodo in cui i radiatori elettrici sono in funzione, il consumo supera la produzione. A partire dal mese di aprile, infatti, la situazione si capovolge con la produzione che supera ampiamente il consumo.

Tagliare i consumi i consumi invernali è in questo caso fondamentale per far avvicinare i consumi alla produzione e ragionare sulla possibilità di una autonomia energetica.

7.2.2 Scenario con consumi ottimizzati attraverso interventi di gestione degli impianti

Si analizza un secondo scenario che prevede la riduzione del consumo grazie all'attuazione degli interventi per lo spegnimento dei radiatori dei bagni e dei climatizzatori quando la sede è chiusa. Non si include il risparmio proveniente dai boiler perché piccolo rispetto agli altri e limitato a brevi periodi come le ferie estive e la chiusura sotto Natale. Anche l'illuminazione è esclusa dal calcolo del risparmio perché i consumi residui a sede chiusa dipendono in toto o quasi dall'illuminazione di emergenza e da una luce che resta accesa per sicurezza. In aggiunta il risparmio sarebbe minimo, ammontando ad appena qualche centinaio di wattora all'anno.

Nella Figura 100 si confrontano la produzione del medesimo impianto fotovoltaico e il nuovo consumo elettrico ottenuto attuando le misure appena descritte e sottraendo il risparmio al consumo di base misurato. Questo fa sì che il consumo calcolato può essere effettivamente raggiunto. Impressionante è il dato di gennaio in cui il consumo si è ridotto mediamente di 52 kWh, corrispondente ad un -27% con un deficit di produzione che scende da 113 kWh a 61 kWh, ossia viene quasi dimezzato. Si ricorda sempre che i dati dei mesi di ottobre e novembre 2021 non sono affidabili.

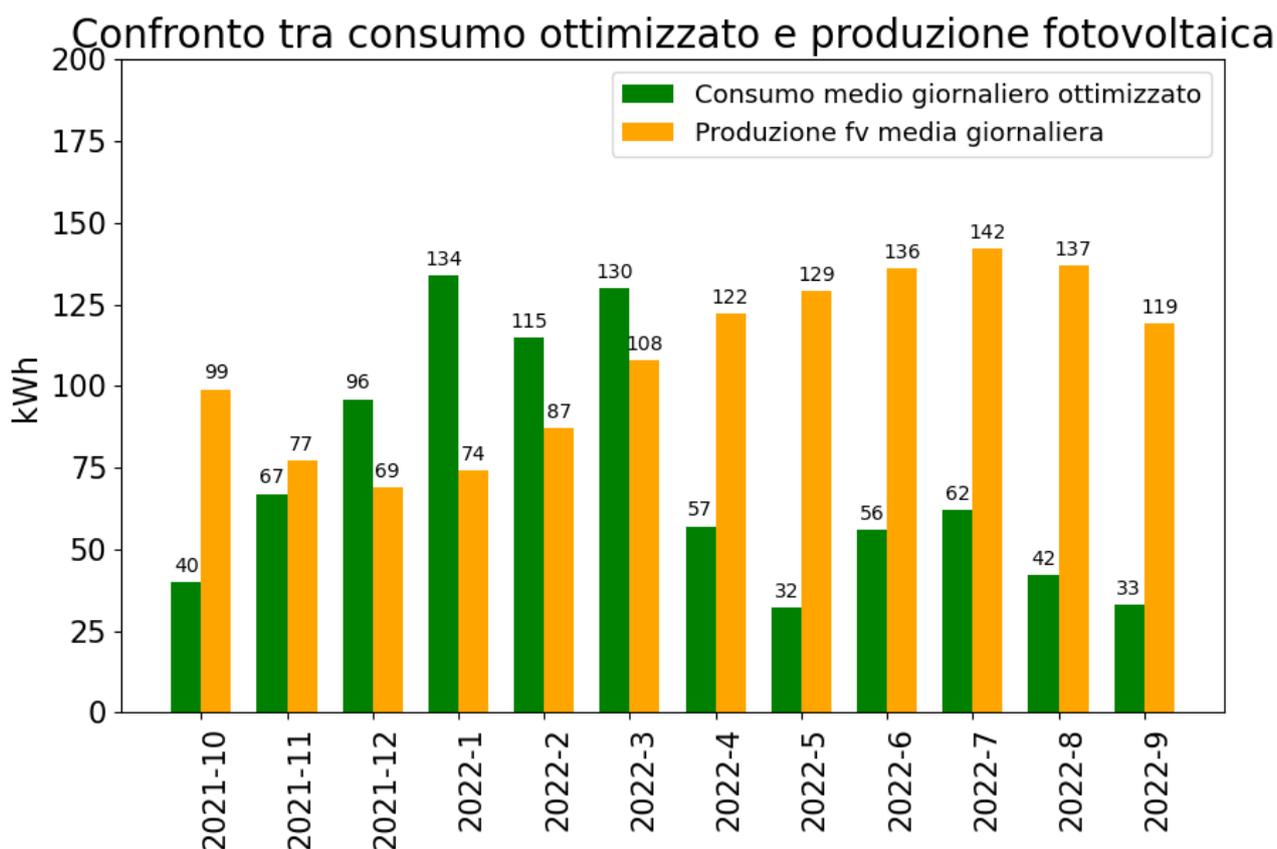


Figura 100: confronto tra produzione di un impianto fotovoltaico da 25 kWp e il consumo ottimizzato sottraendo il consumo al di fuori dell'orario di occupazione per la climatizzazione nel periodo di studio.

In questo modo diventa molto più facile e soprattutto meno costoso avvicinarsi all'autosufficienza energetica. Da ultimo si vede che il surplus di produzione estivo aumenta. L'energia prodotta in

eccesso può essere condivisa ad altre utenze che potrebbero avere un maggiore fabbisogno dovuto al raffrescamento.

La Figura 101 evidenzia i deficit e i surplus di produzione nei due casi finora descritti. La curva verde è relativa al caso ottimizzato, la curva rosso scuro al caso base. Le barre gialle indicano la riduzione dei consumi e sono di altezza pari alla differenza tra le sue curve.

Differenza tra energia prodotta e consumata nei casi base e ottimizzato

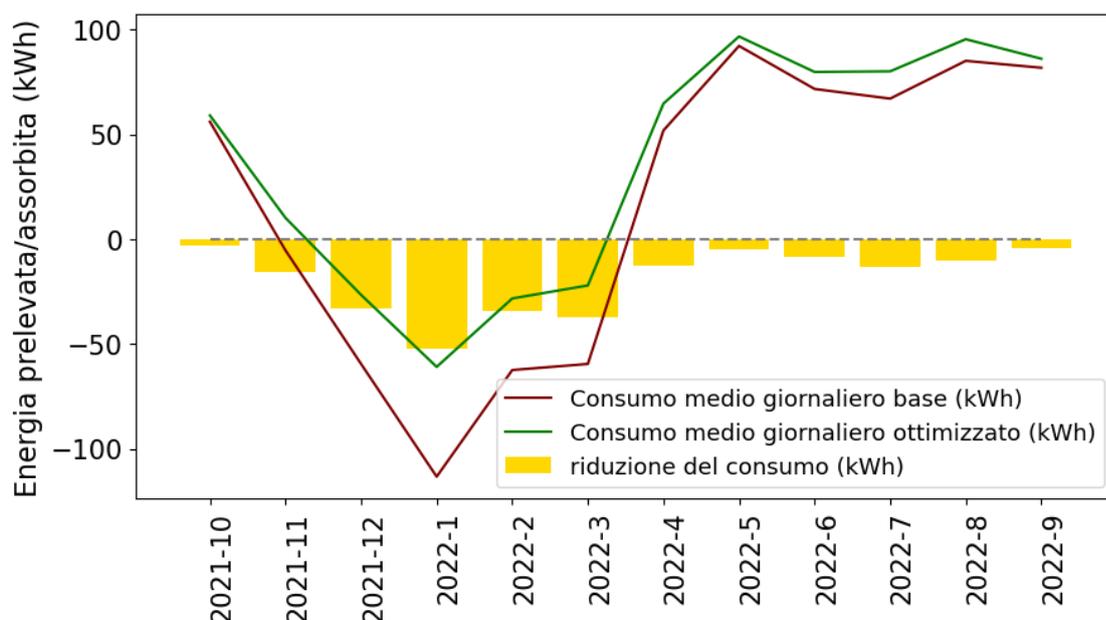


Figura 101: differenza tra produzione di energia e consumo nel caso base e ottimizzato e risparmio di energia grazie all'ottimizzazione dei consumi elettrici. Nella zona positiva la produzione supera il consumo, nella zona negativa il consumo è maggiore della produzione.

Ulteriori interventi di efficientamento dell'edificio che siano in grado di aggredire soprattutto i consumi invernali porterebbero ad una maggiore autosufficienza energetica e alla scelta di un impianto fotovoltaico di taglia più piccola.

7.3 Considerazioni su una eventuale batteria

Per incrementare il livello di autoconsumo di energia elettrica e l'autosufficienza e per fare fronte ai momenti in cui non c'è produzione è necessario installare un accumulo di corrente.

In generale, un edificio adibito ad uso uffici presenta un profilo di carico che ben si accoppia con la produzione da fotovoltaico perché la maggior parte dei consumi avviene nelle ore centrali della giornata, contestualmente alla produzione. Tuttavia, quando le ore di sole sono poche come in inverno, nel tardo pomeriggio è necessario alimentare gli uffici ancora occupati. Nelle giornate nuvolose la produzione potrebbe non essere sufficiente e potrebbe essere necessario sfruttare l'energia prodotta in eccesso accumulata nel giorno precedente. Una batteria per accumulare l'energia non consumata nell'immediato diviene necessaria per favorire l'indipendenza energetica.

Con un profilo d'uso tipico delle attività del terziario, i consumi notturni sono molto limitati poiché dovuti al breve periodo di attività dopo il tramonto in inverno, ad eventuali server in funzione h24, all'illuminazione di emergenza e al consumo degli impianti che ripartono al mattino seguente. Questo permette di limitare le dimensioni della batteria e i relativi costi associati, monetari e ambientali dovuti all'estrazione dei materiali e la produzione.

Restando al caso analizzato, ridurre i consumi invernali per la climatizzazione porta a tagliare il fabbisogno di energia sia diurno, sia nel periodo tra il tramonto e l'alba. Diviene quindi possibile installare un impianto fotovoltaico e una batteria più piccoli per garantire l'autosufficienza energetica.

8 La flessibilità energetica

La transizione verso un sistema energetico a zero emissioni dipende dalla penetrazione delle fonti di energia rinnovabile che, ad eccezione degli impianti elettrici a bacino e di pompaggio/accumulo, sono per loro natura non programmabili, sebbene prevedibili nella produzione. Questo passaggio richiede un cambio di mentalità e di tecnologie: l'elettificazione dei carichi termici è indispensabile per sfruttare al meglio questa energia che è di tipo elettrico; inoltre, per far incontrare produzione (per buona parte al di fuori del nostro diretto controllo) e domanda (su cui si può agire), ossia per raggiungere il bilanciamento della rete, è necessario realizzare dei meccanismi capaci di modificare i carichi, riducendoli in caso di necessità, come una produzione insufficiente, o incrementandoli in un momento di abbondanza di produzione per poi ridurli in momenti successivi.

Questi meccanismi richiedono sistemi di controllo avanzati che permettono di modificare la domanda di energia elettrica in risposta a delle richieste, ad esempio, del gestore dei servizi di rete o della comunità energetica rinnovabile.

La flessibilità della domanda, la cosiddetta *demand side response* (DSR), ossia la risposta sul lato della domanda, che prevede una forma di controllo dei carichi quasi diretta, è un'alternativa efficace e a basso costo ai tradizionali sistemi di riserva ad avviamento rapido (flessibilità sul lato della generazione), ossia quei sistemi di generazione elettrica che sono in grado di entrare in funzione rapidamente nel caso in cui i gruppi di produzione principali non riescono a seguire un carico in rapido aumento oppure, in uno scenario con alta penetrazione di fonti rinnovabili, in caso di mancanza di produzione.

La flessibilità energetica può prevedere almeno due situazioni: la prima è quella della risposta sul lato della domanda (DSR), che interviene nel breve periodo variando il carico per una necessità immediata della rete, la seconda è quella della programmazione del consumo su un periodo "lungo", che prevede anche in questo caso una variazione programmata dei consumi rispetto a quello che sarebbe il profilo di consumo "di base" o standard, ma sulla base ad esempio di una richiesta del gestore dei servizi di rete comunicata con largo anticipo, ad esempio il giorno prima.

Secondo Francesco Nancini e Benedetto Nastasi in [9], i carichi possono essere suddivisi in cinque categorie tra flessibili e non flessibili:

- a) carichi "accumulabile": prevedono la possibilità accumulo e quindi possono essere ricaricati e spenti avendo un backup che permette di continuare ad usufruire del servizio;
- b) carichi "spostabili": non si possono interrompere nell'immediato, ma è possibile un loro spostamento temporale;
- c) carichi interrompibili: è possibile una loro immediata interruzione;
- d) carichi non interrompibili: non si possono né interrompere nell'immediato, né spostare nel tempo;
- e) autoproduzione: produzione di energia in loco.

Nel caso delle abitazioni in particolare, i carichi sono principalmente di tipo "accumulabile", ossia riscaldamento, raffrescamento, ACS quando equipaggiati con batterie/accumuli termici, e di tipo "spostabile", come quelli relativi a lavatrici, asciugatrici, lavastoviglie, aspirapolvere e ai fornelli.

In questo complesso sistema giocano un ruolo anche gli edifici, che possono fornire servizi di rete come la regolazione di frequenza modificando la domanda di energia e ricevendo una remunerazione in base al servizio fornito [3], [9].

In [3] si spiega come le abitazioni, ad esempio, prese singolarmente hanno una limitata capacità di fornire flessibilità dei consumi alla rete elettrica, ma, se considerate come aggregato, hanno la possibilità di partecipare al mercato della flessibilità. Considerando che la maggior parte degli edifici italiani (oltre il 98%) ad oggi è ancora riscaldata con sistemi a combustione così come basata sulla combustione è la produzione di ACS (oltre l'85%), l'elettrificazione permetterebbe di incrementare il potenziale di flessibilità. Inoltre, la sostituzione di generatori di calore a combustione con pompe di calore permette di ridurre le emissioni locali di CO₂ e di altri inquinanti e il consumo di energia primaria e permette una maggiore penetrazione delle fonti rinnovabili.

Il potenziale di flessibilità dipende da vari fattori [10] tra cui:

- le caratteristiche termofisiche dell'edificio, ossia dalla capacità termica e dalla dispersione termica: maggiore è la capacità termica, maggiore è la quantità di calore che può essere accumulata nelle strutture e che può essere ceduto in un secondo momento; minore è la dispersione termica, più tempo è necessario a disperdere il calore accumulato;
- i sistemi impiantistici da cui dipendono la capacità di regolare la potenza erogata e di accumulare calore in accumuli di acqua calda o refrigerata in modo da spostare temporalmente la produzione di calore e l'utilizzo;
- i sistemi di controllo, in grado di interagire con gli occupanti, di rispondere a segnali esterni e di programmare opportunamente la produzione di calore;
- la destinazione d'uso, il comportamento degli occupanti e i requisiti di comfort da cui dipende la capacità, in alcuni momenti, di "forzare" i parametri ambientali, fondamentale la temperatura, incrementandola leggermente o diminuendola così da spostare il carico elettrico richiesto alla rete.

Nella ristrutturazione degli edifici, i soli interventi di isolamento dell'involucro, sebbene abbiano un impatto decisamente positivo sui consumi complessivi, non producono variazioni apprezzabili nella flessibilità dei carichi elettrici: a questi interventi è necessario accompagnare l'installazione delle pompe di calore. Svolgono un ruolo positivo anche gli accumuli di calore, che permettono un maggiore sfasamento tra produzione e consumo e possono essere tanto più piccoli, quanto minore è il fabbisogno termico [3].

Inoltre, guardando ad intervalli temporali molto ristretti nell'ordine dei minuti o dei secondi [9], gli impianti HVAC, in particolare negli edifici commerciali, ma non solo, sono adatti a fornire elevata flessibilità e possono essere regolati semplicemente variando la temperatura di set-point. Questo per tre motivi:

- 1) negli edifici commerciali il consumo per la climatizzazione vale circa un terzo del carico elettrico totale;
- 2) per l'effetto di volano termico dato dalle strutture: una riduzione o interruzione temporanea di durata limitata dei carichi HVAC non ha effetto immediato sugli occupanti;

- 3) gli impianti HVAC presentano di solito almeno una parziale automazione attraverso dei sistemi di controllo come i BMS (*building management systems*) o BEMS (*building energy management system*).

Anche negli edifici residenziali, con i carichi controllati attraverso opportuni termostati, è possibile fornire un servizio di flessibilità energetica alla rete elettrica.

In generale, la variazione di potenza disponibile non è una costante e varia con la temperatura esterna e con le condizioni interne contingenti.

Secondo un'interpretazione data dai ricercatori dell'ENEA [10], si possono definire una funzione di flessibilità FF e un indice di flessibilità energetica IF che misura la reazione di un edificio alla variazione del prezzo dell'energia.

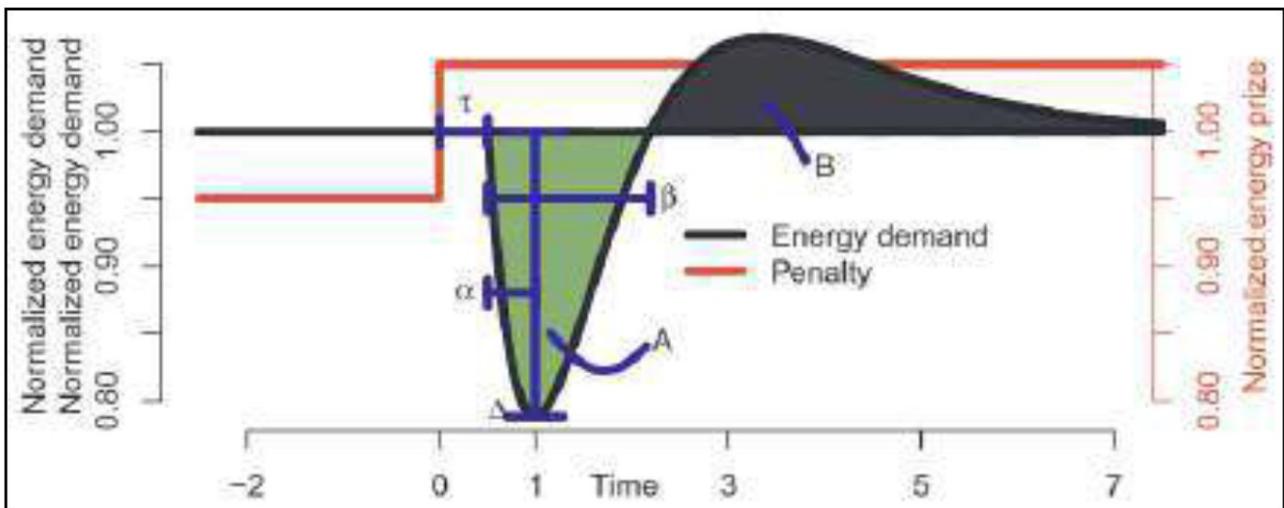


Figura 102: funzione di flessibilità analizzata in [10]

La Funzione di Flessibilità presenta le caratteristiche seguenti:

- τ : tempo di ritardo tra la variazione di prezzo e l'effetto sulla domanda di energia;
- Δ : variazione massima di potenza come conseguenza della variazione di prezzo;
- α : tempo, misurato a partire dalla variazione della domanda, necessario per raggiungere il livello di potenza minimo;
- β : tempo totale di diminuzione della domanda di energia.
- A: quantità totale di energia non consumata durante la riduzione della potenza;
- B: energia aggiuntiva richiesta al termine della riduzione di potenza.

L'Indice di Flessibilità si calcola come segue:

- sia p_t la penalità sul consumo di energia al tempo t
- si calcola il consumo di energia di base $e_{standard,t}$ al tempo t , ossia il consumo che sia avrebbe senza una penalità di prezzo;

- si calcola il consumo di energia $e_{flex,t}$ a seguito dell'intervento attivo sull'edificio per limitare i consumi in risposta al segnale di prezzo;
- si calcola il costo operativo totale del controllo dell'edificio che non considera il segnale di prezzo:

$$C_{standard} = \sum_{t=0}^N p_t e_{standard,t}$$

- si calcola il costo operativo totale a seguito del controllo consapevole:

$$C_{flex} = \sum_{t=0}^N p_t e_{flex,t}$$

- si calcola l'Indice di Flessibilità:

$$IF = 1 - \frac{C_{flex}}{C_{standard}}$$

- si può calcolare il risparmio economico:

$$S = C_{standard} - C_{flex}$$

L'Indice di Flessibilità è quindi un valore compreso tra zero e uno e indica la capacità dell'edificio di evitare una certa parte del costo aggiuntivo correlato alla penalità di prezzo.

Questo criterio di azione permette sia di agire nell'immediato, sia di programmare una strategia volta alla minimizzazione dei costi operativi in un arco temporale più lungo, ad esempio giornaliero. Infatti, conoscendo il prezzo dell'energia elettrica per le varie ore del giorno seguente, sulla base delle previsioni meteo, del fabbisogno termico di un edificio e della sua risposta termica e degli impianti, si può prevedere definire la potenza di funzionamento degli impianti in modo tale che, rimanendo all'interno dei limiti di comfort considerati accettabili, si minimizza la spesa giornaliera per l'energia.

Nella figura Figura **103**, tratta da [10] ad esempio, si mostra la differenza dei profili di potenza termica per riscaldamento tra il caso con controllo standard e controllo flessibile basato sul prezzo orario. Sfruttando la capacità termica dell'edificio e spingendosi ai limiti di set-point accettabili per il comfort termico, si sono anticipati i carichi termici della mattina e del pomeriggio per sfruttare dei momenti in cui l'energia è acquistabile a costi inferiori.

Lo stesso approccio, opportunamente adattato, può essere usato ad esempio per massimizzare lo sfruttamento della produzione da fonti rinnovabili in modo tale da massimizzare il consumo contestuale alla produzione.

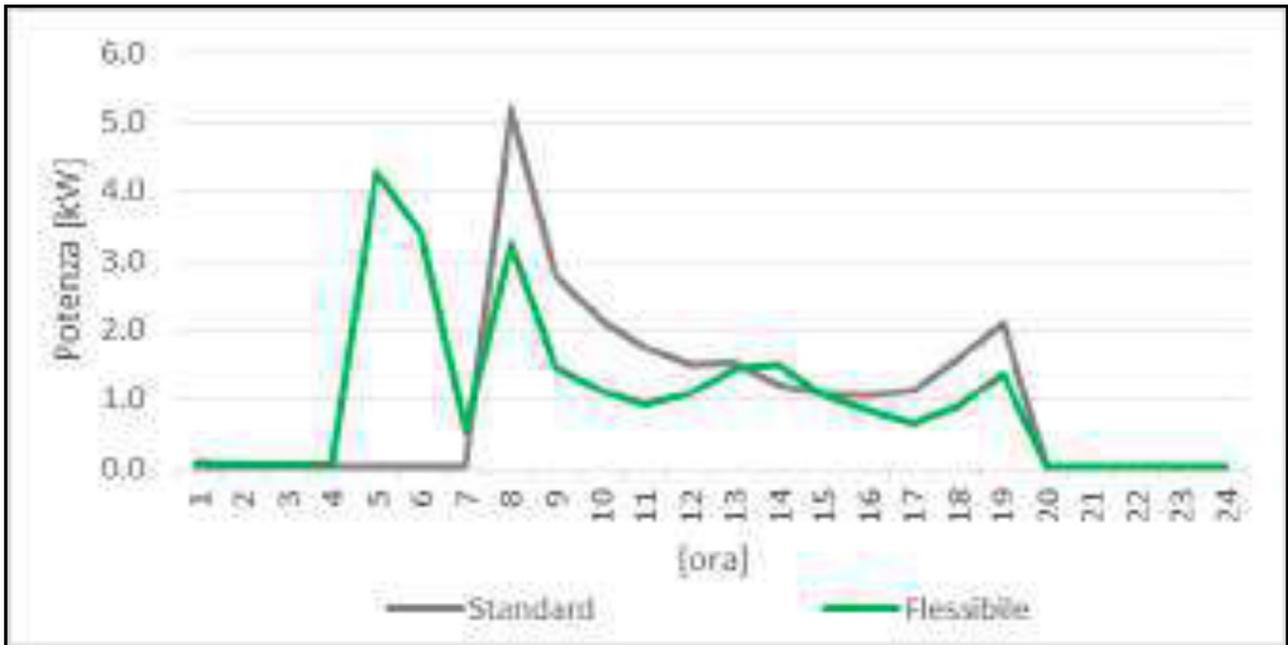


Figura 103: confronto tra i profili di potenza termica richiesti per il riscaldamento di un edificio con controlli standard e flessibile

9 Proposte di miglioramento e sviluppi

Si propongono ora dei possibili sviluppi dello studio per comprendere come si può evolvere il sistema di monitoraggio, quali nuove analisi si possono svolgere e quali strategie di attuazione si possono sviluppare per attuare alcuni meccanismi di flessibilità energetica e ridurre i costi di gestione.

1. Per permettere una più agevole analisi dei dati di monitoraggio ambientale ed energetico, è opportuno migliorare il database dove vengono memorizzati i dati per ridurre drasticamente la quantità migliorandone al contempo il contenuto informativo. Sarebbe inoltre molto utile migliorare le modalità di accesso al database per velocizzare lo scaricamento.

Attualmente viene memorizzata una grandissima mole di dati che purtroppo non porta con sé altrettanta informazione: la quantità di dati può essere ridotta senza una sostanziale perdita di informazione, ad esempio memorizzando un dato al minuto o ogni cinque minuti ed eliminando alcuni dati ridondanti. Nel database sarebbe opportuno inserire un *flag* indicante la mancanza di comunicazione per permettere, in corrispondenza dei dati mancanti, la ricostruzione del consumo sulla base del profilo storico del periodo e per tenere traccia dell'accaduto. Questo è dovuto al fatto che alcune informazioni possono essere recuperate solo parzialmente al ritorno della comunicazione e solo per alcuni dispositivi. Infine, va migliorata l'affidabilità della comunicazione che in alcuni periodi non ha raggiunto livelli soddisfacenti inficiando le analisi: si potrebbe puntare a raggiungere un tempo di comunicazione minimo del 98% dei minuti ogni mese.

2. Confrontare i risparmi effettivamente conseguiti attraverso l'adozione di misure volte a contenere i consumi dei radiatori elettrici dei bagni e dei climatizzatori con i risparmi ipotizzati.
3. Migliorare la predizione dei consumi in base agli scenari di occupazione con nuovi modelli o affinando quelli finora usati con più dati e su un orizzonte temporale superiore ad un anno.
4. Valutare se e come si possono simulare nuovi scenari come la variazione dei consumi in conseguenza del cambiamento climatico con un margine di errore sufficientemente piccolo da rendere le previsioni significative.
5. Per migliorare le insufficienti condizioni di comfort termo-igrometrico *indoor*, vanno studiate delle strategie per la preaccensione dei climatizzatori, soprattutto nel periodo invernale, per garantire la temperatura di set point programmata all'ingresso del lavoratore in ufficio. La strategia deve garantire l'obiettivo di raggiungimento della temperatura di set point minimizzando il consumo complessivo di energia dall'accensione al raggiungimento delle condizioni di regime termico.
6. Ipotizzando che lo schema misto fra lavoro agile ed in presenza, diventi lo schema del futuro lavorativo post pandemico negli uffici, potrebbero essere adottate due possibili soluzioni:
 - a. calendarizzazione programmata delle presenze in ufficio;
 - b. sviluppo di una applicazione per smartphone per l'accensione e lo spegnimento da remoto dei climatizzatori negli uffici (preriscaldamento dell'ambiente prima dell'arrivo del lavoratore).

7. Identificazione delle taglie corrette di impianto fotovoltaico e di accumulo sulla base di analisi di dettaglio a scala giornaliera ed oraria, che includa anche la variazione dell'uso degli spazi nei periodi non lavorativi.
8. Progettare e testare con un operatore di rete le strategie di flessibilità energetica,
9. Progettare l'impianto fotovoltaico da installare sul tetto dell'edificio.
10. Analizzare i margini fattibilità per la creazione di una CER e analizzare gli edifici e le utenze che si possono aggregare sulla base della complementarietà dei carichi.
11. Completare il trasferimento del codice usato per le analisi su repository condiviso per facilitare la collaborazione e ristrutturarlo per rendere più agevole, automatizzata ed efficiente nell'uso delle risorse di calcolo l'analisi in tempo quasi reale delle informazioni provenienti dal sistema di monitoraggio.

10 Conclusioni

Si delineano di seguito, in modalità schematica, le conclusioni del presente lavoro basato sullo studio degli uffici ENEA di Bari, un edificio con vettore energetico esclusivamente elettrico monitorato con un articolato sistema di misura dei consumi elettrici e dei parametri ambientali, al fine di ridurre i consumi proponendo alcuni interventi migliorativi, prevedere futuri scenari di consumo e di fare una prima basilare valutazione per un impianto fotovoltaico per autoconsumo e da integrare in una CER.

- Attraverso il monitoraggio dei consumi elettrici, si sono potuti individuare e quantificare sprechi nascosti dovuti alla gestione non ottimale di alcuni impianti. La naturale conseguenza è stata l'individuazione di alcune azioni da intraprendere per tagliare i consumi e di alcuni semplici sistemi di automazione da applicare allo scopo.
- Integrando metodi di *machine learning* e di regressione si sono realizzati dei modelli previsionali sui consumi in base alla variazione della presenza del personale al fine di valutare i consumi elettrici con nuove condizioni di presenza. L'analisi ha evidenziato alcune criticità legate alla mancanza di dati in quantità sufficiente, ma si possono trarre chiare indicazioni sulla direzione da seguire per migliorare i modelli di previsione del fabbisogno energetico.
- La modellazione energetica della struttura ha permesso di valutare i risparmi ottenibili dal miglioramento delle prestazioni dell'involucro edilizio, rivelandosi nel caso specifico un utile strumento per la valutazione dello stato di fatto e dell'efficacia degli interventi.
- Migliorando l'involucro edilizio si otterrebbe una riduzione non trascurabile dei consumi invernali avvicinandoli notevolmente alla produzione da fotovoltaico. In questo specifico caso, si ritiene perciò che, pur trovandosi in regioni dal clima temperato-mediterraneo, sia opportuno avere delle ottime prestazioni di isolamento termico nel periodo invernale. Questo perché la bassa produzione fotovoltaica dovuta allo scarso soleggiamento invernale soddisfa degli altrettanto bassi consumi. Nel periodo estivo, invece, grazie all'elevato soleggiamento, è possibile soddisfare più agevolmente una maggiore domanda di energia per il condizionamento.
- Il metodo di valutazione dei consumi tramite la firma energetica è stato inficiato molto probabilmente dagli elevati apporti solari delle vetrate particolarmente ampie e dell'elevata permeabilità all'aria degli infissi associata ad una elevata ventosità del luogo.

11 Bibliografia e sitografia

- [1] <https://www.rinnovabili.it/ambiente/cambiamenti-climatici/disastri-naturali-cambiamenti-climatici-2022/>
- [2] <https://www.swissre.com/risk-knowledge/mitigating-climate-risk/hail-damage-risk-france-2022.html>
- [3] *Energy Retrofitting Effects on the Energy Flexibility of Dwellings*. Francesco Mancini, Benedetto Nastasi, MDPI, 2019, Energies
- [4] *Energy Use in Residential Buildings: Impact of Building Automation Control Systems on Energy Performance and Flexibility*. Francesco Mancini, Gianluigi Lo Basso, Livio de Santoli. 15, Roma: MDPI, 2019, Energies, Vol. 12.
- [5] https://www.corriere.it/economia/casa/21_dicembre_09/case-classificazione-energetica-ue-italia-11-milioni-edifici-rischio-f429233a-58de-11ec-95ed-0f7dcc6ae2dd.shtml
- [6] <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Cities-and-buildings#heating-and-cooling>
- [7] <https://www.theguardian.com/environment/2015/oct/26/cold-economy-cop21-global-warming-carbon-emissions>
- [8] <http://drewconway.com/zia/2013/3/26/the-data-science-venn-diagram>
- [9] *Quantifying flexibility of commercial and residential loads for demand response using setpoint changes*, Rongxin Yin, Emre C. Kara, Yaping Li, Nicholas DeForest, Ke Wang, Taiyou Yong, Michael Stadler, Elsevier, Applied Energy, 2016
- [10] *Implementazione delle logiche di gestione per gli smart building di seconda generazione*, F. De Lia, R. Schioppo, R. Lo Presti, S. Pizzuti, S. Romano, A. Tundo, P. Zangheri, P. Zini, M. Zinzi
- [11] <https://www.rinnovabili.it/ambiente/politiche-ambientali/anche-la-cina-da-un-giro-di-vite-alle-emissioni-di-metano/>
- [12] *Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change*, Morna Isaac, Detlef P. van Vuuren, Elsevier, Energy policy, 2009
- [13] *La firma energetica*, Laurent Socal, Franco Soma, Progetto 2000, numero 36, giugno 2009, Editore Edilclima
- [14] <https://www.cnr.it/en/press-release/9775/n20-una-crescente-minaccia-per-il-clima>
- [15] International Energy Agency, *Coping with the Crisis, Increasing Resilience in Small Business in Europe through Energy Efficiency*, ottobre 2022

12 Allegati

A Preventivo di spesa per le lavorazioni sul quadro elettrico

Si riporta il preventivo di spesa con valori presi dal prezzario regionale delle Marche per le modifiche al quadro elettrico proposte. I costi riportati trovano riscontro nella realtà nazionale, per cui si possono considerare validi anche per la regione Puglia.

codice	descrizione	um.	quantità	prezzo	parziale
n.p1	Contattore in corrente alternata a 220/380V con bobina di eccitazione comandabile a 24V o 48V o 220V, fornito e posto in opera su profilato DIN, o con fissaggio a vite. Sono comprese le quote relative al montaggio e al cablaggio. È inoltre compreso quanto altro occorre per dare il lavoro finito. Bipolare fino 40A (su profilato).	n	2	87,80	175,60
n.p2	Apparecchi modulari da inserire su quadro elettrico con attacco DIN, forniti e posti in opera. Sono compresi: il cablaggio; gli accessori; il montaggio. È compreso quanto altro occorre per dare il lavoro finito. È esclusa la quota di carpenteria. Commutatore di linea 0-1-2 massimo 16A.	n	1	66,81	66,81
n.p3	Quota a corpo per aggiornamento documentazione tecnica quadro esistente oggetto di ampliamento.	corpo			188,00
				totale imponibile intervento	430,41

B Scheda tecnica climatizzatore Olimpia Splendid

Codice: OS-KENEH09EI / OS-SENEH09EI		 OLIMPIA SPLENDID SPA - VIA INDUSTRIALE 1/3 25060 CELLATICA (BS) - ITALIA						
Modello: NEXYA S4 E INVERTER 9 C								
Data / Date: 15 / 10 / 2020								
Revisione / Revision: 00								
TABELLA DATI TECNICI		TECHNICAL DATA						
Descrizione		Description						
		Simbolo	Unità	Valore				
		Symbol	Unit	Value				
Funzione raffreddamento		Cooling function						
Funzione riscaldamento		Heating function						
Funzione riscaldamento stagione MEDIA		Heating function AVERAGE season						
Funzione riscaldamento stagione PIU' CALDA		Heating function WARMER season						
Funzione riscaldamento stagione PIU' FREDDA		Heating function COLDER season						
CARICHI PREVISTI DAL PROGETTO (EN 14825)	Raffreddamento	Cooling	P _{designc}	kW	2,8			
	Riscaldamento / medio	Heating / Average	P _{designh}	kW	2,8			
	Riscaldamento / più caldo	Heating / Warmer	P _{designh}	kW	2,8			
	Riscaldamento / più freddo	Heating / Colder	P _{designh}	kW	-			
EFFICIENZA STAGIONALE (EN 14825)	Raffreddamento	Cooling	SEER		6,3			
	Riscaldamento / medio	Heating / Average	SCOP (A)		4,0			
	Riscaldamento / più caldo	Heating / Warmer	SCOP (W)		5,1			
	Riscaldamento / più freddo	Heating / Colder	SCOP (C)		-			
Capacità di raffreddamento dichiarata a temperatura interna pari a DB 27°C - WB 19°C con temperatura esterna Tj	Tj = 35°C	Declared capacity for cooling at indoor temperature	P _{dc}	kW	2,801			
	Tj = 30°C	DB 27°C - WB 19°C	P _{dc}	kW	1,867			
	Tj = 25°C	and outdoor temperature Tj	P _{dc}	kW	1,280			
	Tj = 20°C		P _{dc}	kW	1,077			
Indice di efficienza energetica dichiarato per il raffreddamento a temperatura interna pari a DB 27°C - WB 19°C con temperatura esterna Tj	Tj = 35°C	Declared energy efficiency ratio for cooling at indoor temperature	EERd		3,31			
	Tj = 30°C	DB 27°C - WB 19°C	EERd		4,96			
	Tj = 25°C	and outdoor temperature Tj	EERd		7,36			
	Tj = 20°C		EERd		11,38			
STAGIONE MEDIA a temperatura interna pari a DB 20°C con temperatura esterna Tj	Tj = -15°C	AVERAGE SEASON at indoor temperature DB 20°C and outdoor temperature Tj	Tj = -15°C	P _{gh}	kW	-		
	Tj = -7°C		Tj = -7°C	P _{gh}	kW	2,3		
	Tj = 2°C		Tj = 2°C	P _{gh}	kW	1,5		
	Tj = 7°C		Tj = 7°C	P _{gh}	kW	0,9		
	Tj = 12°C		Tj = 12°C	P _{gh}	kW	1,1		
	Tj = temperatura bivalente		Tj = bivalent temperature	P _{gh}	kW	2,3		
	Tj = limite di esercizio		Tj = operating limit	P _{gh}	kW	2,0		
Coefficiente di prestazione dichiarato STAGIONE MEDIA a temperatura interna pari a DB 20°C con temperatura esterna Tj	Tj = -15°C	Declared coefficient of performance AVERAGE SEASON at indoor temperature DB 20°C and outdoor temperature Tj	Tj = -15°C	COPd		-		
	Tj = -7°C		Tj = -7°C	COPd		2,9		
	Tj = 2°C		Tj = 2°C	COPd		4,1		
	Tj = 7°C		Tj = 7°C	COPd		4,7		
	Tj = 12°C		Tj = 12°C	COPd		5,9		
	Tj = temperatura bivalente		Tj = bivalent temperature	COPd		2,9		
	Tj = limite di esercizio		Tj = operating limit	COPd		2,6		
Capacità di riscaldamento dichiarata STAGIONE PIU' CALDA a temperatura interna pari a DB 20°C con temperatura esterna Tj	Tj = 2°C	Declared capacity for heating WARMER SEASON at indoor temperature DB 20°C and outdoor temperature Tj	Tj = 2°C	P _{gh}	kW	2,600		
	Tj = 7°C		Tj = 7°C	P _{gh}	kW	1,617		
	Tj = 12°C		Tj = 12°C	P _{gh}	kW	0,828		
	Tj = temperatura bivalente		Tj = bivalent temperature	P _{gh}	kW	2,600		
	Tj = limite di esercizio		Tj = operating limit	P _{gh}	kW	2,600		
	Coefficiente di prestazione dichiarato STAGIONE PIU' CALDA a temperatura interna pari a DB 20°C con temperatura esterna Tj		Tj = 2°C	Declared coefficient of performance WARMER SEASON at indoor temperature DB 20°C and outdoor temperature Tj	Tj = 2°C	COPd		3,13
			Tj = 7°C		Tj = 7°C	COPd		5,07
Tj = 12°C		Tj = 12°C	COPd			6,24		
Tj = temperatura bivalente		Tj = bivalent temperature	COPd			3,13		
Tj = limite di esercizio		Tj = operating limit	COPd			3,13		
Capacità di riscaldamento dichiarata STAGIONE PIU' FREDDA a temperatura interna pari a DB 20°C con temperatura esterna Tj		Tj = -22°C	Declared capacity for heating COLDER SEASON at indoor temperature DB 20°C and outdoor temperature Tj		Tj = -22°C	P _{gh}	kW	-
		Tj = -10°C			Tj = -10°C	P _{gh}	kW	-
	Tj = -7°C	Tj = -7°C		P _{gh}	kW	-		
	Tj = 2°C	Tj = 2°C		P _{gh}	kW	-		
	Tj = 7°C	Tj = 7°C		P _{gh}	kW	-		
	Tj = 12°C	Tj = 12°C		P _{gh}	kW	-		
	Tj = temperatura bivalente	Tj = bivalent temperature		P _{gh}	kW	-		
Coefficiente di prestazione dichiarato STAGIONE PIU' FREDDA a temperatura interna pari a DB 20°C con temperatura esterna Tj	Tj = -22°C	Declared coefficient of performance COLDER SEASON at indoor temperature DB 20°C and outdoor temperature Tj	Tj = -22°C	COPd		-		
	Tj = -10°C		Tj = -10°C	COPd		-		
	Tj = -7°C		Tj = -7°C	COPd		-		
	Tj = 2°C		Tj = 2°C	COPd		-		
	Tj = 7°C		Tj = 7°C	COPd		-		
	Tj = 12°C		Tj = 12°C	COPd		-		
	Tj = temperatura bivalente		Tj = bivalent temperature	COPd		-		
Temperatura bivalente in riscaldamento STAGIONE MEDIA	Bivalent temperature in heating mode AVERAGE SEASON		T _{br}	°C	-7			
	Bivalent temperature in heating mode WARMER SEASON		T _{br}	°C	2			
Temperatura bivalente in riscaldamento STAGIONE PIU' FREDDA	Bivalent temperature in heating mode COLDER SEASON		T _{br}	°C	-			
	Operating limit temperature in heating mode AVERAGE SEASON		T _{ol}	°C	-15			
Temperatura limite di funzionamento in riscaldamento STAGIONE MEDIA	Operating limit temperature in heating mode WARMER SEASON		T _{ol}	°C	2			
	Operating limit temperature in heating mode COLDER SEASON		T _{ol}	°C	-			
Ciclicità degli intervalli di capacità per il raffreddamento	Power consumption of cycling in cooling mode		P _{cycc}	kW	-			
	Efficiency of cycling in cooling mode		EER _{cycc}		-			
Ciclicità degli intervalli di capacità per il riscaldamento	Power consumption of cycling in heating mode		P _{cyhc}	kW	-			
	Efficiency of cycling in heating mode		COP _{cyhc}		-			
Coefficiente di degradazione in raffreddamento	Degradation coefficient in cooling mode		C _{dc}		0,25			
	Degradation coefficient in heating mode		C _{dh}		0,25			
Potenza elettrica assorbita in modo SPENTO	Electric power input in OFF mode		P _{off}	W	1,0			
	Electric power input in STAND BY mode		P _{sa}	W	1,0			
Potenza elettrica assorbita in modo TERMOSTATO SPENTO	Electric power input in THERMOSTAT-OFF mode		P _{to}	W	19,26			
	Electric power input in CRANKCASE HEATER mode		P _{ck}	W	0,0			
Controllo capacità FISSO	Capacity control FIXED				NO			
	Capacity control STAGED				NO			
Controllo capacità VARIABILE	Capacity control VARIABLE				SI / YES			
	Energy Efficiency Class in cooling mode				A++			
Classe di efficienza energetica in riscaldamento STAGIONE MEDIA		Energy Efficiency Class in heating mode AVERAGE SEASON			A+			
Classe di efficienza energetica in riscaldamento STAGIONE PIU' CALDA		Energy Efficiency Class in heating mode WARMER SEASON			A+++			
Classe di efficienza energetica in riscaldamento STAGIONE PIU' FREDDA		Energy Efficiency Class in heating mode COLDER SEASON			-			
Consumo annuo di energia in raffreddamento		Yearly energy consumption in cooling mode			kWh/annum			
Consumo annuo di energia in riscaldamento STAGIONE MEDIA		Yearly energy consumption in heating mode AVERAGE SEASON			156			
Consumo annuo di energia in riscaldamento STAGIONE PIU' CALDA		Yearly energy consumption in heating mode WARMER SEASON			910			
Consumo annuo di energia in riscaldamento STAGIONE PIU' FREDDA		Yearly energy consumption in heating mode COLDER SEASON			714			
Capacità dichiarata per il calcolo dello SCOP STAGIONE MEDIA		Declared capacity for the SCOP calculation AVERAGE SEASON			kW			
Capacità del sistema di back up per il calcolo dello SCOP STAGIONE MEDIA		Back up heating capacity assumed for the calculation of SCOP AVERAGE SEASON			kW			

Capacità dichiarata per il calcolo dello SCOP STAGIONE PIU' CALDA		Declared capacity for the SCOP calculation WARMER SEASON		kW	2,6	
Capacità del sistema di back up per il calcolo dello SCOP STAGIONE PIU' CALDA		Back up heating capacity assumed for the calculation of SCOP WARMER SEASON		kW	0,0	
Capacità dichiarata per il calcolo dello SCOP STAGIONE PIU' FREDDA		Declared capacity for the SCOP calculation COLDER SEASON		kW	-	
Capacità del sistema di back up per il calcolo dello SCOP STAGIONE PIU' FREDDA		Back up heating capacity assumed for the calculation of SCOP COLDER SEASON		kW	-	
Potenza resa in raffreddamento (1) (min / nominale / max)		Cooling capacity (1) (min / rated / max)		kW	0,91/2,6/3,40	
Potenza resa in riscaldamento (2) (min / nominale / max)		Heating capacity (2) (min / rated / max)		kW	0,82/2,9/3,37	
Potenza assorbita in modalità raffreddamento (1) (min / nominale / max)		Power consumption in cooling mode (1) (min / rated / max)		kW	0,10/7,3/1,24	
Potenza assorbita in modalità riscaldamento (2) (min / nominale / max)		Power consumption in heating mode (2) (min / rated / max)		kW	0,12/0,73/1,2	
Corrente assorbita in modalità raffreddamento (1) (min / nominale / max)		Current consumption in cooling mode (1) (min / rated / max)		A	0,4/3,2/5,4	
Corrente assorbita in modalità riscaldamento (2) (min / nominale / max)		Current consumption in heating mode (2) (min / rated / max)		A	0,5/3,2/5,2	
EER (1) (nominale)		EER (1) (rated)			3,60	
COP (2) (nominale)		COP (2) (rated)			4,00	
Tensione di alimentazione		Power supply		V-F-Hz	220-240 -1 -50	
Tensione di alimentazione minima/massima		Power supply min / max		V	198/264	
Potenza assorbita massima in modalità raffreddamento (3)		Max Power absorption in cooling mode (3)		W	2150	
Potenza assorbita massima in modalità riscaldamento (4)		Max Power absorption in heating mode (3)		W	2150	
Assorbimento massimo in modalità raffreddamento (3)		Maximum absorption in cooling mode (4)		A	10	
Assorbimento massimo in modalità riscaldamento (4)		Maximum absorption in heating mode (4)		A	10	
UNITA' INTERNA	Livello della potenza sonora (EN 12102)		Sound power level (EN 12102)	LWA	dB(A)	54
	Pressione sonora (alta/media/bassa velocità silenzioso)		Sound pressure level (high/med/low/s)		dB(A)	39/32/25/1
	Portata aria in modalità raffreddamento (max/med/min)		Air volume in cooling mode (max/med/min)		m³/h	466/360/325
	Portata aria in modalità riscaldamento (max/med/min)		Air volume in heating mode (max/med/min)		m³/h	466/360/325
	Velocità di ventilazione		Fan speeds			1030 / 800 / 750
	Grado di protezione		Protection level			IPX0
	Dimensioni (Larg. x Alt. x Prof.)		Dimensions (W x H x D)		mm	805x285x194
UNITA' ESTERNA	Livello della potenza sonora (EN 12102)		Sound power level (EN 12102)	LWA	dB(A)	62
	Pressione sonora		Sound pressure level		dB(A)	55,5
	Portata aria (max)		Air volume (max)		m³/h	1750
	Velocità di ventilazione		Fan speeds			-
	Grado di protezione		Protection level			IP24
	Dimensioni (Larg. x Alt. x Prof.)		Dimensions (W x H x D)		mm	726x495x270
	Peso (senza imballo)		Weight (without packing)		kg	23,2
Capacità di deumidificazione		Dehumidification capacity		l/h	1,0	
Diametro tubo linea di collegamento liquido		Ø Connecting pipe (liquid)		inch - mm	14" - 6,35	
Diametro tubo linea di collegamento gas		Ø Connecting pipe (gas)		inch - mm	3/8" - 9,52	
Lunghezza massima tubazioni		Max connecting length		m	25	
Dislivello massimo		Max height difference		m	10	
Massima pressione di esercizio		Maximum operating pressure		MPa	4,3/1,7	
Gas refrigerante		Refrigerant gas		Type	R-32	
Potenziale di riscaldamento globale		Global warming potential of refrigerant	OWP	kgCO ₂ eq.	675	
Potenziale di raffreddamento globale		Global warming potential of refrigerant		Tonnes CO ₂ equivalent	0,37	
Carica gas refrigerante		Refrigerant gas charge		kg	0,55	
Carica aggiuntiva gas refrigerante (oltre 5 m di tubo)		Additional refrigerant gas charge (over 5 m pipe length)		g/m	12	
Cavo di alimentazione (N° poli x sezione mmq)		Power cable (N° pole x section mmq)			3x1,5	
Cavo di collegamento (N° poli x sezione mmq)		Connecting cable (N° pole x section mmq)			5x1,5	
Portata massima telecomando (distanza / angolo)		Maximum remote control range (distance / angle)		m / °	8/120	
Fusibile		Fuse			20A/250V	
Marcature di conformità		Conformity mark			CE	
Enti certificatori		Certification mark			-	
CONDIZIONI LIMITE DI FUNZIONAMENTO		OPERATIONAL LIMITS		Temp. ambiente interno	Temp. ambiente esterno	
Temperature di esercizio massime in raffreddamento		Maximum operating temperature in cooling mode		Indoor temperature	Outdoor temperature	
Temperature di esercizio minime in raffreddamento		Minimum operating temperature in cooling mode		DB 32°C	DB 43°C	
Temperature di esercizio massime in riscaldamento		Maximum operating temperature in heating mode		DB 17°C	DB -15°C	
Temperature di esercizio minime in riscaldamento		Minimum operating temperature in heating mode		DB 30°C	DB 30°C	
				DB 0°C	DB -15°C	
CONDIZIONI DI PROVA - EN 14511		TEST PARAMETERS - EN 14511		Temp. ambiente interno	Temp. ambiente esterno	
				Indoor temperature	Outdoor temperature	
(1) Verifica della potenza resa e assorbita in raffreddamento		(1) Cooling capacity and power absorption test		DB 27°C - WB 19°C	DB 35°C - WB 24°C	
(2) Verifica della potenza resa e assorbita in riscaldamento		(2) Heating capacity and power absorption test		DB 20°C - WB 15°C	DB 7°C - WB 6°C	
(3) Prova ad alto carico in raffreddamento		(3) High charge test in cooling mode		DB 32°C - WB 26°C	DB 43°C - WB 32°C	
(4) Prova ad alto carico in riscaldamento		(4) High charge test in heating mode		DB 27°C	DB 24°C - WB 18°C	

Ringraziamenti

Finisce oggi un percorso durato molti anni, qualcuno più del previsto, e vorrei ringraziare tutte le persone che hanno lo hanno reso possibile.

Un grazie speciale ad ogni persona che mi ha sopportato, oltre che supportato, agli amici conosciuti al Poli e a quelli di Macerata, a quelli dell'oratorio San Paolo di Torino e ai salesiani che ho incontrato.

Un grande grazie anche a chi ha reso possibile la realizzazione di questa tesi, anzitutto Angelo e Antonella che per mesi mi hanno guidato nell'imparare moltissime nuove cose, che mi hanno dedicato molto tempo e con cui ho sempre avuto la possibilità di confrontarmi, ai professori che non sono mai mancati nel supportarmi, ai vari amici a cui ho chiesto molte volte aiuto quando non sapevo fare qualcosa o per un parere, e anche ai salesiani di Bari che, ospitandomi, mi hanno dato la possibilità di lavorare alcuni giorni in presenza e non da remoto. E poi Paola, mia sorella, che mi ha aiutato molto in questi ultimi giorni con le immagini e non solo che altrimenti non so bene cosa sarebbero state.

Infine la mia famiglia tutta, che ha atteso pazientemente fino ad ora senza farmi mai pesare nulla.

Si ringrazia anche il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare per la fornitura dei dati meteorologici usati in questo lavoro.