



Ricerca di Sistema elettrico

Progetto di dettaglio del sistema energetico integrato di fonte elettrica, fotovoltaica e geotermica accoppiato ad accumulo di energia termica di tipo a termoclino a servizio di un edificio storico del Sulcis (CRS)

C. Frau, E. Loria, F. Poggi,
CINIGeo

DIMCM – Università degli Studi di Cagliari

SOTACARBO



SUSTAINABLE ENERGY
RESEARCH CENTRE

PROGETTO DI DETTAGLIO DEL SISTEMA ENERGETICO INTEGRATO DI FONTE ELETTRICA, FOTOVOLTAICA E GEOTERMICA ACCOPPIATO AD ACCUMULO DI ENERGIA TERMICA DI TIPO A TERMOCLINO A SERVIZIO DI UN EDIFICIO STORICO DEL SULCIS (CRS)

Caterina FRAU, Eusebio LORIA, Francesca POGGI
CINIGeo
DIMCM Università degli Studi di Cagliari
Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2017

Progetto: *Tecnologie e metodologie low carbon e Edifici a energia quasi zero (nZEB) – CUP I12F17000070001*

Parte B: Edifici ad energia quasi zero (nZEB)

Tema A: Riqualificazione energetica di edifici con interventi di efficientamento

Sottotema: a.3 Interazione di sistemi energetici

Responsabile del Progetto: dott.ssa Franca Rita Picchia, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Tecnologie e metodologie Low Carbon e Edifici ad energia quasi zero (nZEB)*"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Paolo Deiana

Responsabile scientifico SOTACARBO: ing. Enrico Maggio

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 IL CASO STUDIO: IL CENTRO RICERCHE SOTACARBO.....	9
3 COSTRUZIONE DEL CONSUMO ENERGETICO BASELINE.....	12
3.1 BOLLETTE ELETTRICHE.....	12
3.2 DATI DI CONSUMO QUARTORARI.....	15
3.3 DATI DERIVANTI DAL SISTEMA DI MONITORAGGIO.....	20
4 PROGETTO DI DETTAGLIO DEL SISTEMA DI PRODUZIONE DI ENERGIA TERMICA CON SONDA GEOTERMICA.....	25
4.1 CARATTERIZZAZIONE POZZO.....	25
4.2 ANALISI FEM.....	25
4.3 DIMENSIONAMENTO SISTEMA DI ACCUMULO ELETTRICO.....	26
4.4 PROGETTAZIONE DI DETTAGLIO.....	26
4.5 CONCLUSIONI.....	26
5 SVILUPPO DI UN SISTEMA INNOVATIVO DI ACCUMULO TERMICO BASATO SU MATERIALI A TRANSIZIONE DI FASE (PCM) PER LA GESTIONE OTTIMALE INTEGRATA DI UN IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE E DI UN IMPIANTO SOLARE FOTOVOLTAICO.....	28
5.1 VALUTAZIONE DELLA PRODUZIONE MEDIA ORARIA DELL'IMPIANTO FOTOVOLTAICO.....	28
5.2 ANALISI DEI PROFILI DI CARICO E DI PRODUZIONE E VALUTAZIONE DEI BILANCI ENERGETICI PER IL DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA TES.....	29
5.3 VALUTAZIONE DEI BILANCI ENERGETICI PER IL DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA TES.....	29
5.4 SVILUPPO DI UN MODELLO NUMERICO DI SIMULAZIONE DEL SISTEMA INNOVATIVO DI ACCUMULO TERMICO.....	29
5.5 SVILUPPO, DIMENSIONAMENTO E ANALISI DELLE PRESTAZIONI DEI SISTEMI DI ACCUMULO.....	30
5.6 CONFRONTO CON SISTEMI DI ACCUMULO A CALORE SENSIBILE DI TIPO CONVENZIONALE E INNOVATIVO.....	31
5.7 CONCLUSIONI.....	31

Sommario

Negli ultimi decenni, la crescente consapevolezza dei costi e dei rischi legati ai cambiamenti climatici ha portato l'Unione Europea a prendere la decisione di avviare una decisa transizione verso un sistema energetico a basse emissioni di carbonio. A tale fine ha avviato diverse politiche, tra cui il pacchetto di misure per il clima e l'energia denominato EU2020. Tale programma, entrato in vigore nel 2009, prevede la riduzione di almeno il 20% delle emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990, l'aumento al 20% della percentuale di energia prodotta da fonti rinnovabili e il miglioramento del 20% dell'efficienza energetica. L'Unione Europea ritiene che anche riqualificare energeticamente il patrimonio edilizio sia una potenziale via perseguibile per accrescere la sicurezza energetica e per conseguire gli obiettivi di riduzione delle emissioni di CO₂. Per questo ha predisposto un corpus legislativo volto a promuovere l'efficienza energetica, definendo regole e condizioni affinché, non solo le nuove costruzioni, ma anche le ristrutturazioni, rispettino standard minimi di prestazione energetica.

Gli interventi di riqualificazione energetica sugli edifici esistenti possono essere progettati ad hoc solo dopo una attenta analisi dei consumi: perché gli edifici del futuro possano essere produttori di energia è necessario ridurre il consumo e compensare l'energia richiesta con la produzione da fonti rinnovabili. La consapevolezza consumi energetici è uno dei temi principali della Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica e del relativo decreto di recepimento.

Nell'ottica del processo di miglioramento delle prestazioni energetiche perseguito dalla politica aziendale della Sotacarbo in questa annualità si è proceduto a definire il consumo di riferimento (energy baseline), vale a dire il riferimento quantitativo che fornisce una base di confronto per le prestazioni energetiche rispetto al quale verranno calcolati i suddetti obiettivi (consumi energetici dell'anno 2017).

Per poter raggiungere gli obiettivi energetici prefissati è stato necessario, nelle precedenti annualità, condurre una diagnosi energetica (o audit energetico) al fine di conoscere quali sono le principali aree di consumo di energia dell'organizzazione e le relative cause, per poi individuare gli interventi migliorativi (o di efficientamento) che permettano di ridurre tale consumo.

Nel caso di specie è emerso che tra le utilities che comportano un uso significativo dell'energia, e su cui si può intervenire per ottenere una sostanziale riduzione, compare l'impianto di climatizzazione.

Le azioni migliorative che si è ritenuto di dover adottare si basano sui risultati dell'analisi di cui sopra e sono particolarmente mirate agli utilizzi rilevati come critici dal punto di vista dei consumi. Gli interventi di efficientamento energetico presi in considerazione in tale fase sono stati i seguenti:

- Utilizzo di una pompa di calore del tipo acqua-acqua accoppiata con una sonda geotermica (verticale o ad acqua di falda) in sostituzione di una delle pompe di calore del tipo aria-acqua attualmente installate;
- Utilizzo di un accumulo termico innovativo.

A tal fine sono state predisposte delle collaborazioni rispettivamente con il Cinigeo e con il DIMCM per la progettazione delle azioni suddette.

Gli studi effettuati da Sotacarbo, dal Cinigeo e dal DIMCM sono stati svolti in team e parallelamente.

1 Introduzione

Il Ministero dello Sviluppo Economico e l'ENEA hanno stipulato data 21 Aprile 2016 l'Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2015-2017 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale. Questo lavoro si inserisce negli studi svolti in seno all'Accordo di Collaborazione tra ENEA e Sotacarbo rivolto allo sviluppo di una ricerca dal titolo "PARTE B: Edifici ad energia quasi-zero" facente capo al piano annuale di realizzazione 2016 dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, ed in particolare agli ambiti attinenti il Tema di Ricerca "Edifici a energia quasi zero (NZEB)", progetto A "Riquilificazione energetica di edifici con interventi di efficientamento".

Negli ultimi decenni, la crescente consapevolezza dei costi e dei rischi legati ai cambiamenti climatici ha portato l'Unione Europea a prendere la decisione di avviare una decisa transizione verso un sistema energetico a basse emissioni di carbonio. A tale fine ha avviato diverse politiche, tra cui il pacchetto di misure per il clima e l'energia denominato EU2020. Tale programma, entrato in vigore nel 2009, prevede la riduzione di almeno il 20% delle emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990, l'aumento al 20% della percentuale di energia prodotta da fonti rinnovabili e il miglioramento del 20% dell'efficienza energetica. Questi obiettivi, da conseguire entro il 2020, sembrano ormai raggiungibili e perfino superabili. In questo contesto, la Commissione Europea ha proposto il 2030 Climate and energy policy framework, con il quale intende rafforzare una transizione verso un'economia a basse emissioni di carbonio, con l'obiettivo di rendere l'economia e il sistema energetico dell'Unione più sicuri, competitivi e sostenibili, assicurando ai consumatori energia competitiva e a basso prezzo, riducendo la dipendenza dalle importazioni di energia e creando nuove opportunità di crescita e di lavoro.

La necessità di raggiungere gli obiettivi nel settore delle energie rinnovabili e dell'efficienza energetica e di ridurre le emissioni di carbonio ha spinto i paesi membri a sostenere progetti di ricerca e sviluppo tecnologico finalizzati a individuare e sostenere le tecnologie idonee a perseguire tali obiettivi.

Tra questi progetti vi sono lo Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan) e il Programma Quadro Europeo per la Ricerca e l'Innovazione Horizon 2020. Il SET-Plan, che ha come obiettivo lo sviluppo di tecnologie innovative nei settori energetici, prevede diverse tecnologie prioritarie per gli obiettivi della politica energetica e climatica europea, tra cui lo sviluppo delle smart cities. Le smart cities rivestono un ruolo chiave anche all'interno del programma Horizon 2020, che nell'ambito Energia sicura, pulita ed efficiente, si prefigge di rendere il sistema energetico affidabile, sostenibile e competitivo. A tale scopo, tra i diversi obiettivi specifici da raggiungere, vi è la costruzione di un mercato per tecnologie e servizi per l'uso efficiente ed intelligente dell'energia, anche attraverso lo sviluppo delle smart cities. Questo ruolo è sottolineato anche dalla presenza di tale tematica all'interno di programmi di ricerca sostenuti dall'Unione e all'interno della Energy Roadmap 2050 [1], nella quale l'Unione Europea dichiara che l'efficienza energetica deve essere considerata un obiettivo primario e che il risparmio energetico nei distretti cittadini può contribuire a risparmiare energia nel medio/lungo termine.

L'Unione Europea ritiene che anche riqualificare energeticamente il patrimonio edilizio sia una potenziale via perseguibile per accrescere la sicurezza energetica e per conseguire gli obiettivi di riduzione delle emissioni di CO₂. Per questo ha predisposto un corpus legislativo volto a promuovere l'efficienza energetica, definendo regole e condizioni affinché, non solo le nuove costruzioni, ma anche le ristrutturazioni, rispettino standard minimi di prestazione energetica. A supporto di queste azioni, l'Europa ha stanziato nel bilancio economico 2014-2020 risorse per circa 20 miliardi di euro. Le Direttive europee 2010/31 e 2012/27 prevedono che le prestazioni energetiche degli edifici del settore civile siano, progressivamente, sempre più efficienti e sempre più CO₂ free.

A livello nazionale, il decreto legge n. 63 del 2013, convertito nella legge n. 90 del 2013, che recepisce la Direttiva 2010/31, ha gettato le basi e individuato i nuovi criteri per l'aggiornamento e la programmazione di standard prestazionali degli edifici (involucro, impianti e fonti rinnovabili) al fine di raggiungere gli obiettivi fissati a livello europeo in materia di edifici a consumo quasi zero (NZEB).

Considerato che l'efficienza energetica rappresenta la prima priorità d'azione della Strategia energetica nazionale in Italia e che il settore dell'edilizia, in ambito nazionale, rappresenta un elemento dalle grandi potenzialità al fine del raggiungimento degli obiettivi di risparmio energetico indicati dal Paese al 2020, il Ministero dello Sviluppo Economico in linea con le direttive europee sulle prestazioni energetiche degli edifici, ha pubblicato recentemente il Decreto Interministeriale 19 Giugno 2017, recante l'approvazione del "Piano d'azione nazionale per incrementare gli edifici a energia quasi zero", ai sensi dell'art. 4-bis – comma 2, del decreto legislativo n. 192 del 2005, unitamente al Piano stesso (Gazzetta Ufficiale n.187 del 11 agosto 2017).

Questo piano (PanZEB), è stato elaborato da un gruppo di lavoro composto dall'ENEA, l'RSE e il CTI, con il coordinamento del Ministero dello Sviluppo Economico. Ad integrazione di questo piano, la Strategia per la riqualificazione energetica del parco immobiliare nazionale, anche detta Strepin, prevista dal decreto legislativo 4 luglio 2014, n. 102 e in corso di emanazione, indica altresì in particolare, gli obiettivi da raggiungere, le linee di azione su cui si intende puntare per il loro conseguimento, le criticità da superare e le possibili soluzioni strategiche.

PanZEB definisce univocamente l'nZEB (nearly Zero Energy Building – Edificio a energia quasi zero) come un edificio, sia esso di nuova costruzione o esistente, tale che da un lato tutti gli indici caratteristici delle prestazioni energetiche (calcolati secondo i valori dei requisiti minimi vigenti dal 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici e dal 1° gennaio 2021 per tutti gli altri edifici), risultino inferiori ai valori dei corrispondenti indici calcolati per l'edificio di riferimento (edificio virtuale geometricamente equivalente a quello di progetto ma dotato dei parametri energetici e delle caratteristiche termiche minime vigenti); e dall'altro siano rispettati gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili nel rispetto dei principi minimi di cui all'Allegato 3, paragrafo 1, lettera c), del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28.

Nel documento del piano è contenuta la valutazione dell'indice di prestazione energetica per alcuni edifici aventi diversa tipologia edilizia, destinazione d'uso e zona climatica scelti tra quelli utilizzati in precedenti studi. Si evidenzia che, al fine di soddisfare i requisiti degli nZEB e in particolare il requisito riguardante l'energia rinnovabile, sarà fondamentale valutare l'utilizzo della pompa di calore (possibilmente centralizzata e combinata per la produzione di energia termica per riscaldamento, acqua calda sanitaria e raffrescamento) eventualmente associata a sistemi fotovoltaici, ove necessario al raggiungimento della quota rinnovabile.

In un'ottica di riduzione del consumo energetico e di utilizzo di energia da fonti rinnovabili, il concetto di edificio nZEB va sicuramente associato al concetto di edificio Smart, cioè un edificio sostenibile nel quale si possono misurare e confrontare i consumi e migliorare le performance nel tempo. In un periodo in cui i costi dell'energia continuano ad aumentare, la riqualificazione in "chiave Smart" degli edifici esistenti rappresenta, oltre che una scelta di alto valore etico, anche il migliore investimento che si possa fare per valorizzare i propri capitali e, nel contempo, aumentare il valore del proprio immobile.

Il primo passo verso la riqualificazione energetica di un edificio è sicuramente costituito dalla diagnosi energetica, che determina

- a) la prestazione energetica globale sia in termini di energia primaria totale che di energia primaria non rinnovabile, attraverso i rispettivi indici;
- b) la classe energetica individuata attraverso l'indice di prestazione energetica globale, espresso in energia primaria non rinnovabile;

- c) la qualità energetica del fabbricato ai fini del contenimento dei consumi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento, attraverso gli indici di prestazione termica utile per la climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio;
- d) i valori di riferimento, quali i requisiti minimi di efficienza energetica vigenti a norma di legge;
- e) le emissioni di anidride carbonica;
- f) l'energia esportata;
- g) le raccomandazioni per il miglioramento dell'efficienza energetica con le proposte degli interventi più significativi ed economicamente convenienti.

In particolare gli interventi di riqualificazione energetica possono essere progettati ad hoc solo dopo una attenta analisi dei consumi: perché gli edifici del futuro possano essere produttori di energia è necessario ridurre il consumo e compensare l'energia richiesta con la produzione da fonti rinnovabili.

Avere consapevolezza dei consumi costituisce la base per iniziare ad affrontare un progetto di efficienza energetica e un percorso di risparmio energetico. La consapevolezza dei consumi energetici è uno dei temi principali della Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica e del relativo decreto di recepimento.

Al monitoraggio energetico viene riconosciuto un ruolo fondamentale in tali azioni.

Oltre a ciò definire e tracciare i progressi nel tempo delle performances energetiche legate agli interventi di efficientamento effettuati è fondamentale al fine di verificare i target progettuali.

La Sotacarbo considera un obiettivo strategico aziendale puntare al miglioramento continuo dell'efficienza energetica attraverso la diminuzione dei consumi di energia della propria sede e la riduzione dei conseguenti impatti ambientali.

La politica energetica della Società si basa sulla volontà di rendere nel lungo periodo le proprie strutture, compatibilmente con i vincoli di diversa natura a cui esse sono sottoposte (architettonici, storici, paesaggistici), quanto più possibile vicine alla condizione di edificio "ad energia quasi zero" o NZEB (Nearly Zero-Energy Building), ossia, secondo la definizione di cui alla Direttiva 31/2010/CE, come "un fabbricato ad altissima prestazione energetica in cui il fabbisogno energetico molto basso, o quasi nullo, dovrebbe essere coperto in misura significativa da energia proveniente da fonti rinnovabili, compresa quella prodotta in loco o nelle vicinanze da fonti rinnovabili".

Allo scopo l'azienda si impegna ad applicare un protocollo che favorisca il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- Migliorare l'efficienza energetica e ridurre le emissioni di CO₂ della sede attraverso:
 - ✓ Il monitoraggio costante dei consumi energetici;
 - ✓ La ricerca di soluzioni innovative, tecnologiche e gestionali, volte alla riduzione dei consumi energetici;
 - ✓ La ricerca di soluzioni tecnologiche innovative per l'incremento e l'utilizzo di fonti di energia rinnovabili;
 - ✓ Il sostegno all'acquisto di prodotti e servizi energeticamente efficienti e alla progettazione di impianti, macchine ed attrezzature di lavoro che producano un miglioramento dell'efficienza energetica, considerando il consumo energetico come un criterio fondamentale in fase di acquisto di prodotti e servizi;
- Garantire il pieno e sostanziale rispetto delle prescrizioni legislative (italiane ed europee) applicabili sull'utilizzo dell'energia di pertinenza dell'azienda e dei vincoli contrattuali sottoscritti dalla società nei confronti di terzi;
- Garantire la comunicazione ed il coinvolgimento della comunità e degli enti locali riguardo il comportamento virtuoso del consumatore intelligente.

Gli obiettivi energetici specifici individuati sono i seguenti (Fig. 1.1):

- Copertura del 50% dei consumi di energia elettrica totali con produzione da Fonti Energetiche Rinnovabili (FER), così da promuovere l'autoproduzione e ridurre la quantità di energia acquistata dalla rete;
- Autoconsumo del 60% della produzione da FER, al fine di ridurre al minimo l'immissione in rete dell'energia elettrica autoprodotta;
- Riduzione del 20% dei consumi di energia elettrica;
- Riduzione del 60% delle emissioni totali di CO₂.

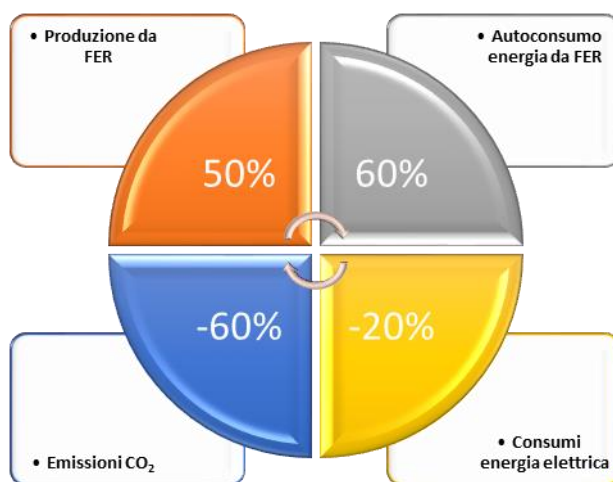


Figura 1.1. Obiettivi della politica energetica aziendale.

A tal fine durante questo anno di attività si è proceduto a definire il consumo di riferimento (energy baseline), vale a dire il riferimento quantitativo che fornisce una base di confronto per le prestazioni energetiche rispetto al quale verranno calcolati i suddetti obiettivi (consumi energetici dell'anno 2017).

Per poter raggiungere gli obiettivi energetici prefissati è stato necessario, nelle precedenti annualità, condurre una diagnosi energetica (o audit energetico) al fine di conoscere quali sono le principali aree di consumo di energia dell'organizzazione e le relative cause, per poi individuare gli interventi migliorativi (o di efficientamento) che permettano di ridurre tale consumo.

Nel caso di specie è emerso che tra le utilities che comportano un uso significativo dell'energia, e su cui si può intervenire per ottenere una sostanziale riduzione, compare l'impianto di climatizzazione.

Le azioni migliorative che si è ritenuto di dover adottare si basano sui risultati dell'analisi di cui sopra e sono particolarmente mirate agli utilizzi rilevati come critici dal punto di vista dei consumi. Gli interventi di efficientamento energetico presi in considerazione in tale fase sono stati i seguenti:

- Utilizzo di una pompa di calore del tipo acqua-acqua accoppiata con una sonda geotermica (verticale o ad acqua di falda) in sostituzione di una delle pompe di calore del tipo aria-acqua attualmente installate;
- Utilizzo di un accumulo termico innovativo.

A tal fine sono state predisposte delle collaborazioni rispettivamente con il Cinigeo e con il DIMCM per la progettazione delle azioni suddette.

2 Il caso studio: il Centro Ricerche Sotacarbo

Il Centro Ricerche Sotacarbo - CRS è situato a Carbonia, nel sud-ovest della Sardegna, all'interno della area denominata Grande Miniera di Serbariu.

Gli edifici afferenti al CRS occupano una superficie utile coperta pari a circa 1800 metri quadrati suddivisa tra laboratori, uffici, archivi e servizi tecnologici, e sono inseriti all'interno di un'area attrezzata aperta di circa 10000 metri quadri che comprende un'area denominata Piattaforma Pilota, ospitante gli impianti sperimentali, l'area verde e i parcheggi.

L'edificio principale è una costruzione del periodo anteguerra, risalente alla fine degli anni '30, di cui riporta fortemente le caratteristiche costruttive. Esso fa parte di una serie di fabbriche dalle robuste ossature in cemento armato che all'epoca furono realizzate per sostenere la produzione della miniera di carbone di Serbariu, chiusa poi a metà degli anni '60. In particolare vennero realizzate una centrale elettrica, gli uffici, le officine, la lampisteria e la laveria, nonché i vari servizi annessi, tra cui l'infermeria, i magazzini. L'edificio oggetto di questo studio fu allora costruito come "Magazzino materiali".

Nell'ultimo decennio l'area complessiva, ormai preda di un totale abbandono, è stata oggetto di un ripristino urbanistico da parte del Comune di Carbonia, che ha destinato i vari edifici a musei, uffici, e centri di cultura. I vari interventi hanno previsto però solo in maniera marginale azioni di efficientamento energetico.

In particolare, nel 2002 l'edificio ha subito un intervento di ristrutturazione importante, realizzato per permettere il riuso dello stabile destinandolo ad ospitare uffici e laboratori (vedi figura 2.1).



Figura 2.1. Centro Ricerche Sotacarbo (prospetto anteriore).

Sulla base della destinazione d'uso dei vari ambienti, l'area del Centro Ricerche Sotacarbo può essere suddivisa in tre blocchi principali:

- un primo blocco costituito dall'edificio principale, su cui è stato eseguito l'intervento di ristrutturazione ed è oggetto del presente studio, con locali adibiti a uffici, laboratori, archivio e sale riunioni e conferenze (vedi figura 2.2);
- un secondo blocco costituito dal locale di nuova costruzione, adibito ad officina meccanica,
- un terzo blocco che comprende le aree aperte, quali l'area della Piattaforma Pilota, che alloggia gli impianti sperimentali ed i services ad essa collegati, i parcheggi e le aree di accesso e verdi.

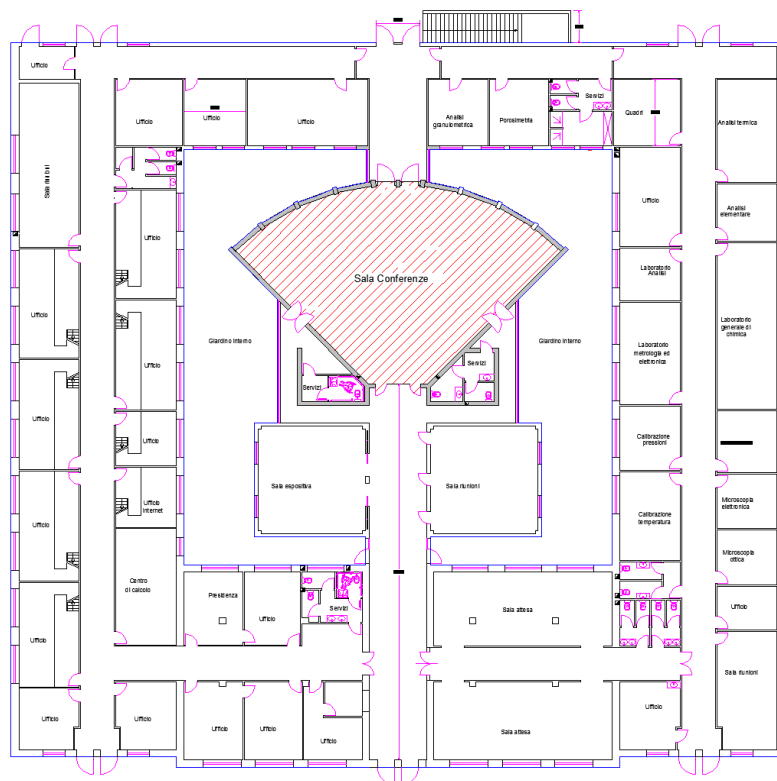


Figura 2.2. Usi funzionali della struttura principale.

Nell'ala esposta a NE sono collocati gli uffici e nell'ala a SE/SO i laboratori, mentre una parte del corpo centrale preesistente insieme alla nuova struttura occupante la ex corte interna ospitano l'area conferenze. L'ala destinata agli uffici è articolata in singoli locali collegati tra loro da un corridoio interno. La maggior parte degli ambienti è a doppia altezza, ricavata attraverso soppalchi in acciaio che coprono i 2/3 della superficie, posti ad un'altezza di 2,5 m c.a. dalla quota pavimento e raggiungibili con scale interne a L in ferro parallele alla muratura del corridoio interno (vedi figura 2.3).

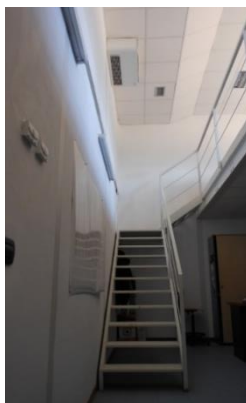


Figura 2.3. Interno degli uffici: accesso al soppalco.

La zona laboratori è suddivisa in locali mediante pareti modulari mobili (locale-locale) o tramezzi in muratura tradizionale (locale-corridoio).

Nella corte interna è stato realizzato ex novo un Auditorium da 100 posti con i relativi servizi, e due sale espositive caratterizzate da ampie aperture finestrate che mostrano una piccola area verde in cui sono inserite.

La parte con maggior utilizzo da parte del personale è quella che ospita gli uffici ed è costituita da 17 ambienti.

L'illuminazione degli ambienti avviene attraverso lampade a fluorescenza di dimensione e potenze differenti.

L'edificio è fornito di un sistema di condizionamento dell'aria, del tipo ad unità centrale, alloggiata all'esterno dell'edificio, con ventilconvettori ubicati su ciascun locale destinato ad ufficio o laboratorio, in aderenza all'intradosso del controsoffitto, ad un'altezza di c.a. 5,15 m dalla quota pavimento. L'impianto di climatizzazione è costituito da due generatori a pompa di calore reversibile (per il funzionamento in riscaldamento e raffrescamento) del tipo aria-acqua marca Uniflair, modello ARAC – F 0744A, posizionati nella parte retrostante dell'edificio principale. La logica di funzionamento prevede, normalmente, il funzionamento di una sola pompa di calore (funzionamento on-off) e l'inserimento in funzione della seconda solamente nel caso in cui la prima non sia in grado di soddisfare la richiesta energetica.

Nel CRS sono occupate 32 persone. Le diverse attività lavorative sono svolte con i medesimi orari di lavoro, con inizio alle ore 8.00 del mattino fino alle 18.00 della sera, con una pausa pranzo di un'ora.

Nel corso delle precedenti annualità, l'edificio è stato oggetto di

- audit energetico (PAR 2014), che ha permesso di realizzare l'inventario delle utenze energetiche;
- diagnosi energetica (PAR 2015) che ha identificato la classe di prestazione energetica globale dell'edificio in classe B (in una scala da A4 - edificio più efficiente- a G - edificio meno efficiente), con un indice di prestazione energetica globale (EPgl,nren) pari a 154,15 kWh/m²anno e alcuni punti di criticità tra cui le strutture opache e le strutture trasparenti. In virtù di ciò, sono stati elaborati scenari di miglioramento e fra questi quelli che risultano maggiormente significativi sono la realizzazione di un cappotto interno e la coibentazione del solaio confinante verso ambiente non climatizzato;
- monitoraggio energetico (PAR 2016), iniziato nell'annualità 2016 e continuato nell'annualità 2017, ha consentito la definizione di una baseline dei consumi reali legati alla struttura e al suo utilizzo.

Nell'ottica del processo di miglioramento delle prestazioni energetiche perseguito dalla politica aziendale della Sotacarbo e al fine di rispettare gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili nella sede è stata prevista l'installazione di un impianto solare fotovoltaico per la produzione di energia elettrica posto in parallelo alla rete. Nel caso specifico, i vincoli monumentali-artistici della struttura che ospiterà l'impianto hanno determinato il ricorso a installazioni che permettessero di ottenere il perfetto mascheramento dei pannelli da parte della struttura muraria. L'impianto sarà montato sulle parti piane della copertura del corpo principale e sulle due falde della copertura dell'officina (Figura 2.4) e sarà realizzato con pannelli fotovoltaici in silicio policristallino. L'energia prodotta dall'impianto sarà principalmente destinata a soddisfare i fabbisogni della struttura, mentre l'eventuale eccesso temporaneo di produzione sarà immesso in rete (Scambio Sul Posto). Tutti i componenti dell'impianto saranno mascherati dalla struttura muraria e non altereranno la sagoma dell'edificio, né saranno visibili dall'esterno.

Il progetto prevede l'installazione di 324 moduli in silicio policristallino di potenza nominale di 270 kWp ciascuno ed estensione totale di 518 m², e di 4 inverter. La potenza totale è pari a 87,48 kWp, che determina una produzione di energia di circa 116.000 kWh/anno (stima eseguita con Meteonorm).

L'impianto sarà del tipo *grid-connected*, con allaccio trifase in bassa tensione multisezione. Infatti, la disposizione delle aree utilizzate per l'installazione dei pannelli fotovoltaici ha permesso l'organizzazione dell'impianto in più sezioni.

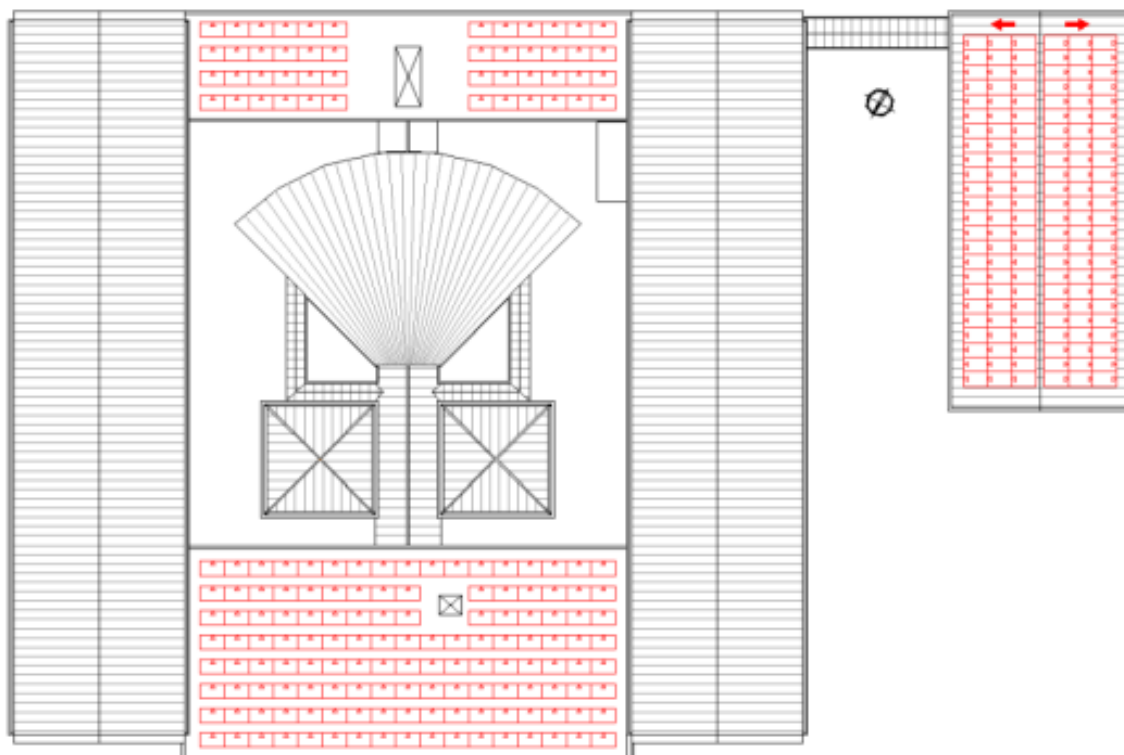


Figura 2.4. Disposizione dei pannelli.

Nella parte posteriore dell'edificio, in prossimità delle pompe di calore, allo stato attuale, è presente un pozzo di età superiore ai 10 anni, mai utilizzato per scopi idrici, che potrebbe supportare l'installazione di una sonda geotermica accoppiata a una pompa di calore acqua-acqua che utilizzi l'acqua di falda.

Studio energetico da manuale

3 Costruzione del consumo energetico baseline

Per la valutazione dei consumi della struttura in esame sono stati utilizzati i seguenti dati:

- Bollette elettriche;
- Dati di consumo elettrico quart'orari;
- Dati del sistema di monitoraggio.

3.1 Bollette elettriche

Sulla base delle bollette elettriche disponibili, sono stati analizzati i consumi mensili di energia elettrica del 2017. In particolare, sono stati valutati i consumi totali, quelli suddivisi per fasce (F1, F2 e F3), ed i relativi costi totali, oltretutto la loro suddivisione tra costi fissi e variabili.

Le fasce F1, F2 e F3 seguono questa suddivisione temporale (Fig. 3.1):

- Fascia F1: dalle 8:00 alle 19:00, dal lunedì al venerdì;
- Fascia F2: dalle 7:00 alle 8:00 e dalle 19:00 alle 23:00, dal lunedì al venerdì; dalle 7:00 alle 23:00 il sabato;
- Fascia F3: dalle 00:00 alle 7:00 e dalle 23:00 alle 24:00, dal lunedì al sabato; tutte le ore del giorno nelle giornate di domenica e dei giorni festivi.

Di seguito si riportano i consumi e i costi rilevati dalle bollette elettriche del 2017.

Ore	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lun	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F2	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F2	F2	F2	F2	F3	F3
Mar	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F2	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F2	F2	F2	F2	F3	F3
Mer	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F2	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F2	F2	F2	F2	F3	F3
Gio	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F2	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F2	F2	F2	F2	F3	F3
Ven	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F2	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F2	F2	F2	F2	F3	F3
Sab	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F3	F3
Dom	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3	F3

La fascia F3 comprende anche le festività del 1 gennaio, 6 gennaio, lunedì di Pasqua, 25 aprile, 1 maggio, 2 giugno, 15 agosto, 1 novembre, 8 e 25 e 26 dicembre.

Figura 3.1. Suddivisione delle fasce di consumo elettrico.

Di seguito si riportano i consumi e i costi rilevati dalle bollette elettriche del 2017.

Tabella 3.1 Consumi e costi anno 2017.

Mese	Consumi [kWh/mese]				Costo [€/mese]
	F1	F2	F3	Totale	
Gennaio	16.250	3.531	4.846	24.627	5.116
Febbraio	12.894	3.630	5.000	21.523	4.471
Marzo	9.832	3.056	4.790	17.678	3.672
Aprile	4.100	1.720	3.297	9.117	1.888
Maggio	3.295	1.419	2.560	7.274	1.484
Giugno	9.869	1.665	2.251	13.785	2.660
Luglio	11.851	2.179	2.692	16.721	3.226
Agosto	11.832	1.809	2.522	16.163	3.229
Settembre	7.580	1.994	2.437	12.011	2.330
Ottobre	6.157	1.820	2.564	10.541	2.079
Novembre	10.673	2.456	2.873	16.002	3.517
Dicembre	12.153	2.729	4.835	19.717	4.144
TOTALE	116.485	28.008	40.666	185.159	37.818

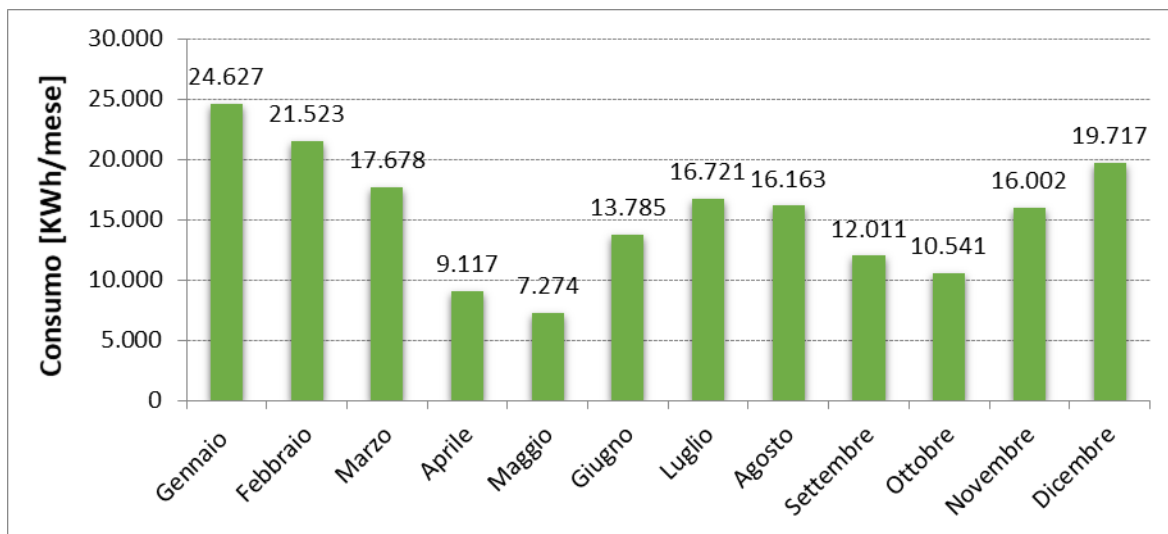


Figura 3.2. Consumi mensili.

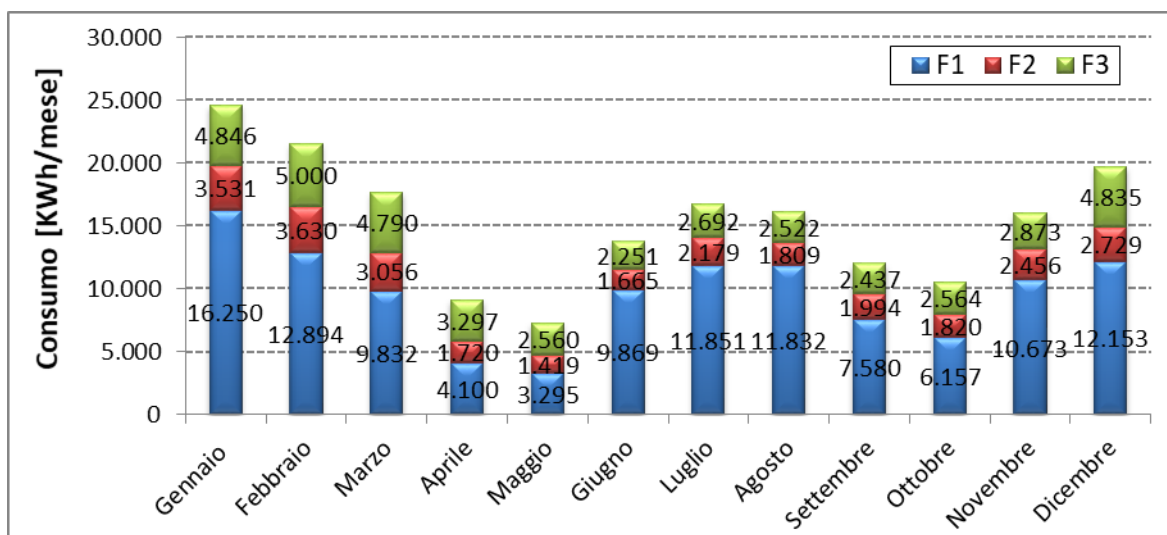


Figura 3.3. Consumi mensili e ripartizione per fasce.

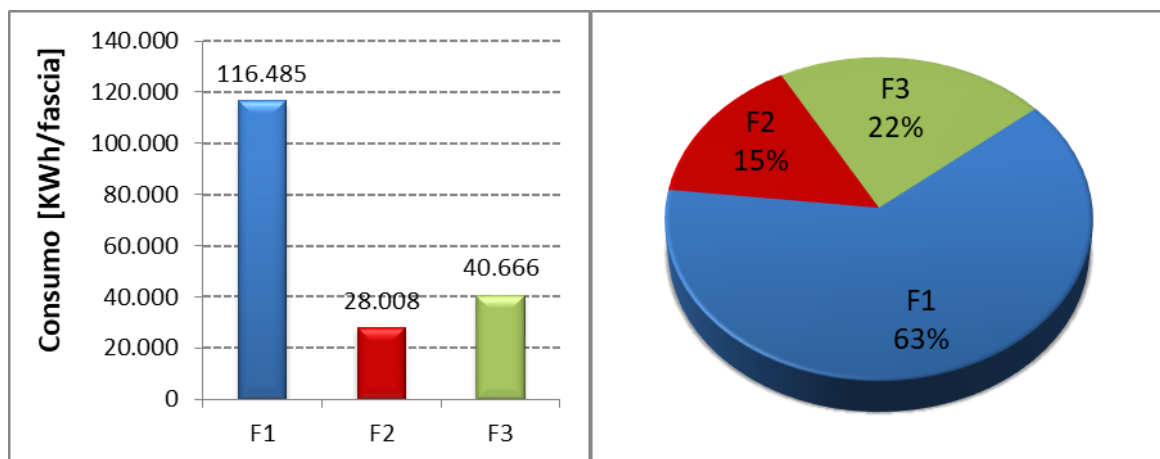


Figura 3.4. Consumi mensili e ripartizioni percentuali.

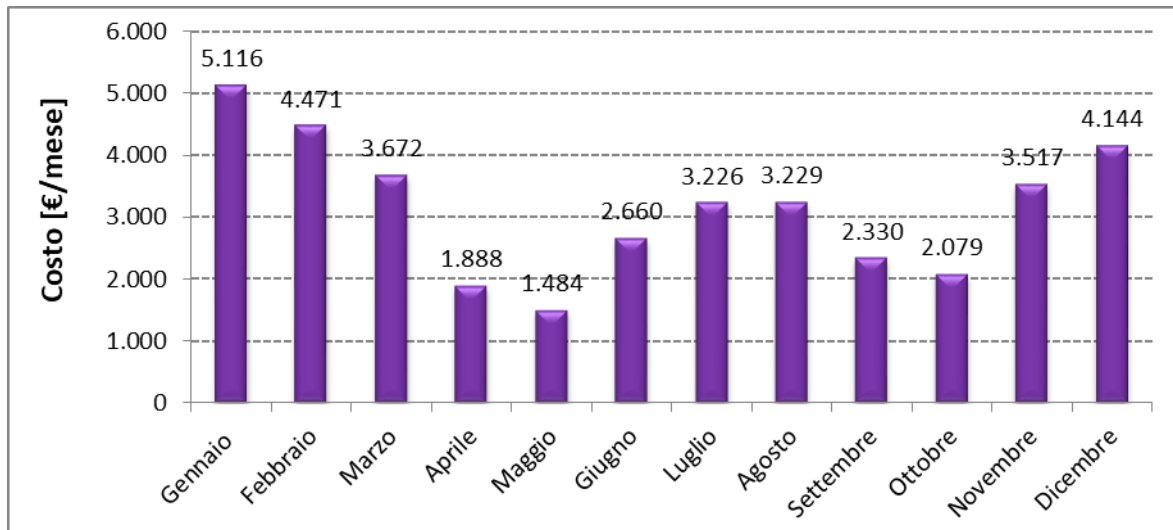


Figura 3.5.Costi mensili.

3.2 Dati di consumo quartorari

A partire dai dati dei consumi di energia elettrica su base quart'oraria è stata effettuata l'analisi dei consumi orari giornalieri relativamente all'anno 2017.

I consumi quart'orari sono stati sommati per ottenere il corrispondente dato orario, tramite cui è stato costruito il diagramma dei consumi orari giornalieri su scala annuale (Fig. 3.6).

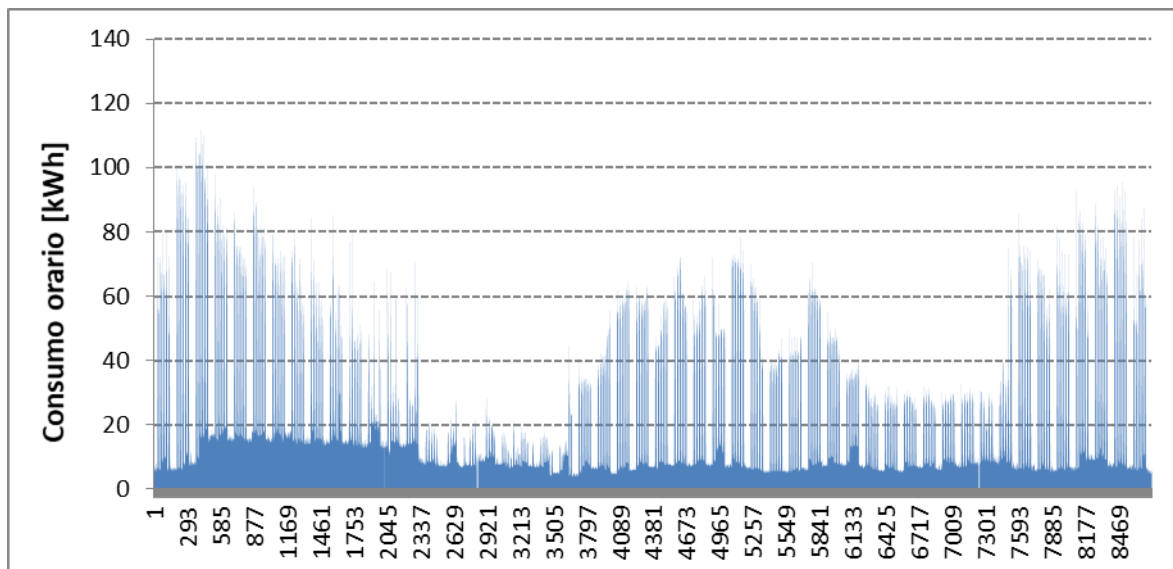
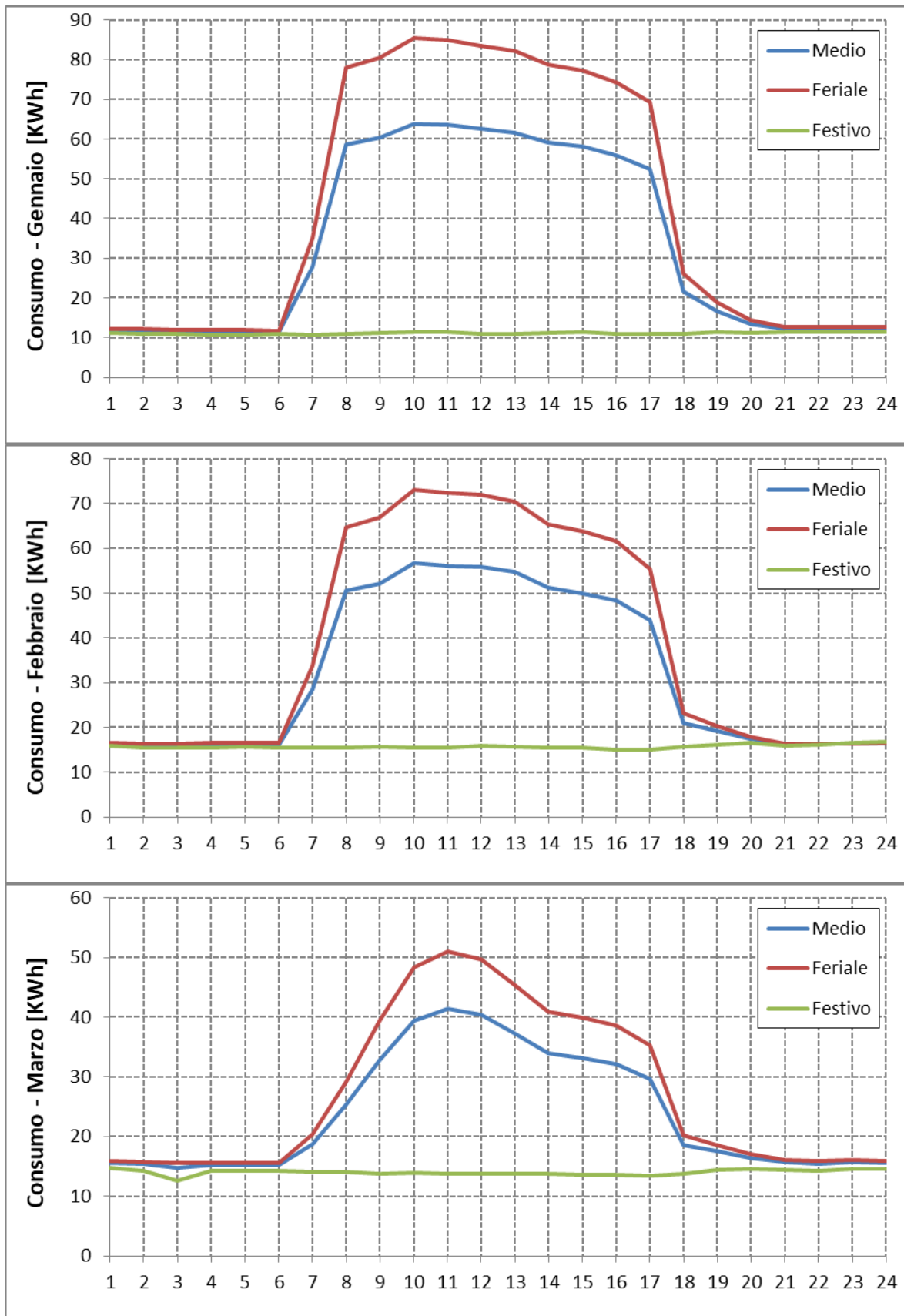
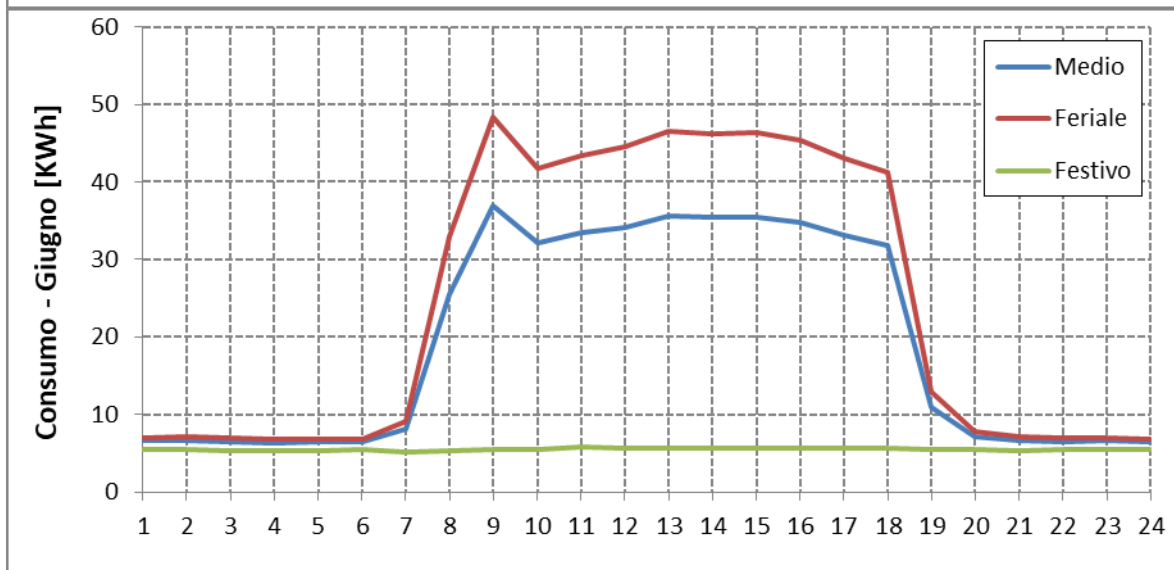
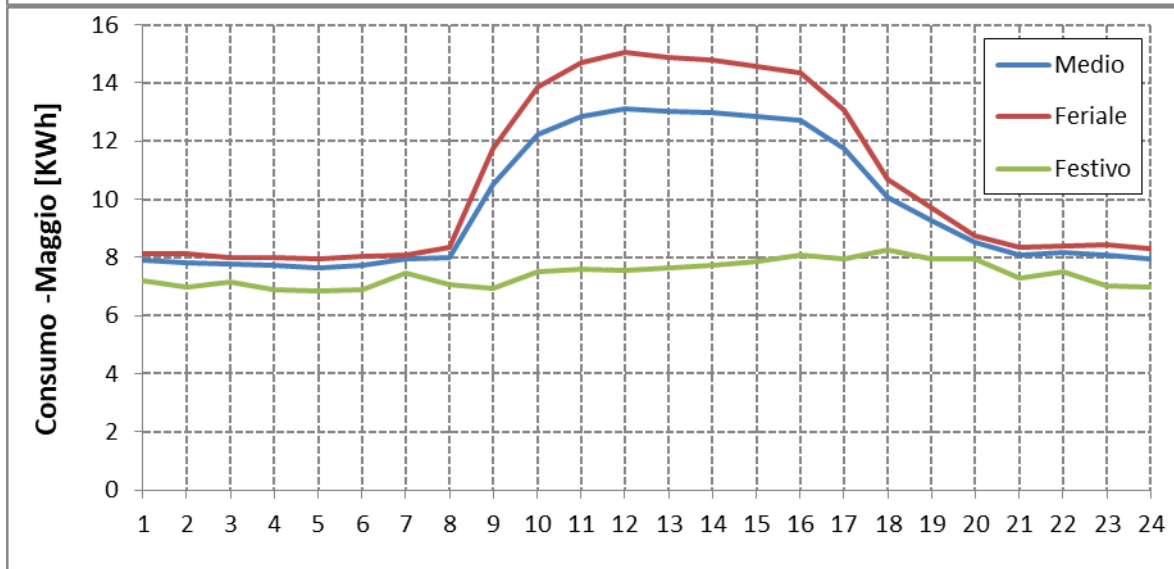
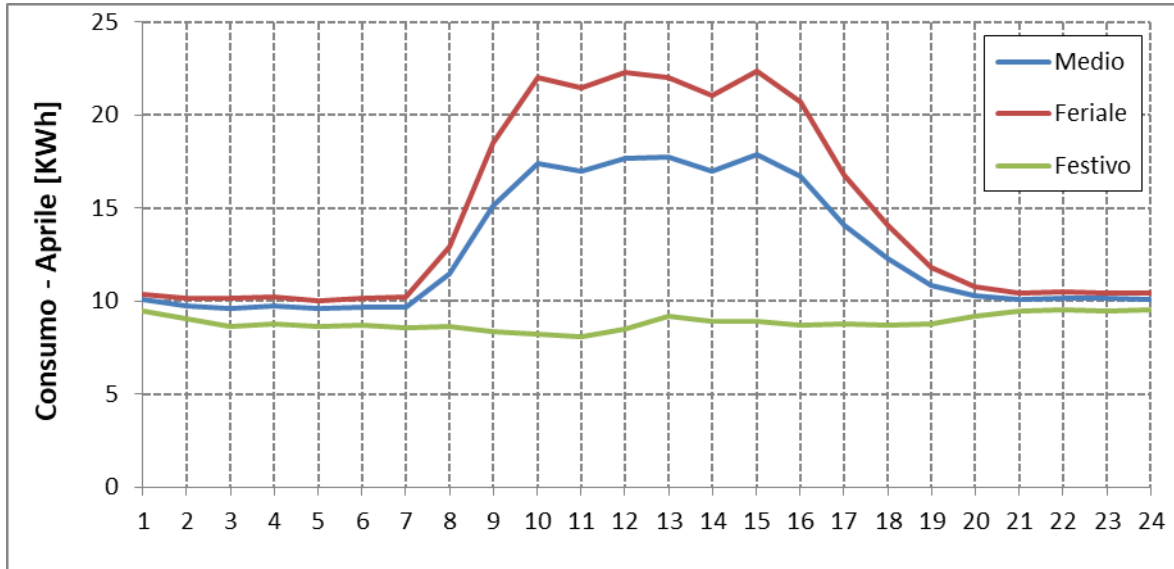


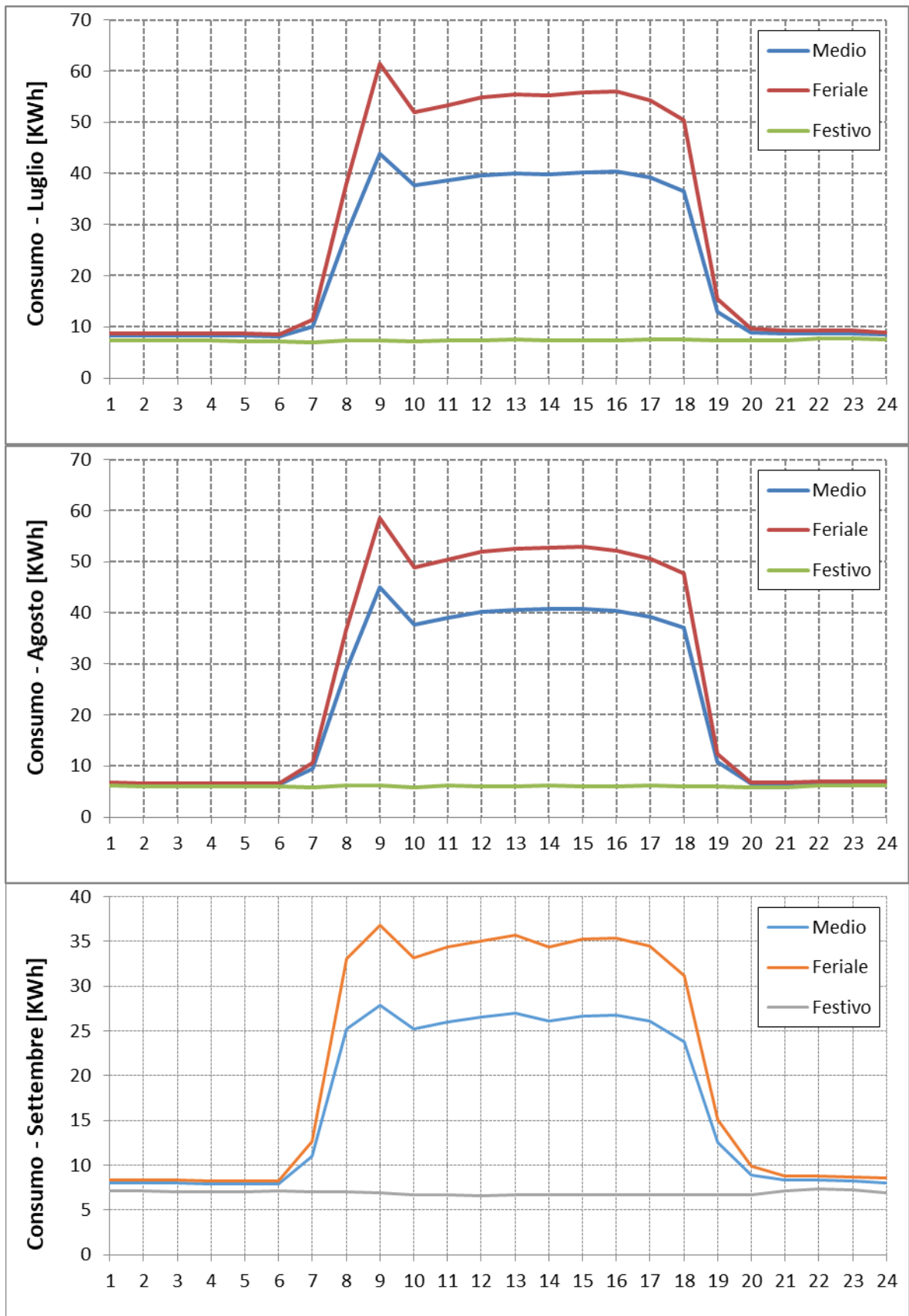
Figura 3.6.Consumi orari giornalieri su scala annuale.

A partire dai dati orari è stato inoltre possibile ricostruire i profili di consumo orario del giorno tipo mensile medio, del giorno lavorativo e di quello festivo (Figg. 3.7).

Si nota che i consumi importanti si manifestano a partire dalle 6, ora in cui si avvia la pompa di calore, alle 20, ora di chiusura della struttura. Negli orari di inutilizzo, dalle 20 alle 6, e nei giorni festivi, pur non effettuandosi alcuna attività permangono alcuni consumi. La causa è dovuta alla presenza di alcuni impianti comunque in funzione (es. illuminazione esterna) e di alcuni macchinari che per esigenze di funzionamento non possono essere spenti (es. forno).







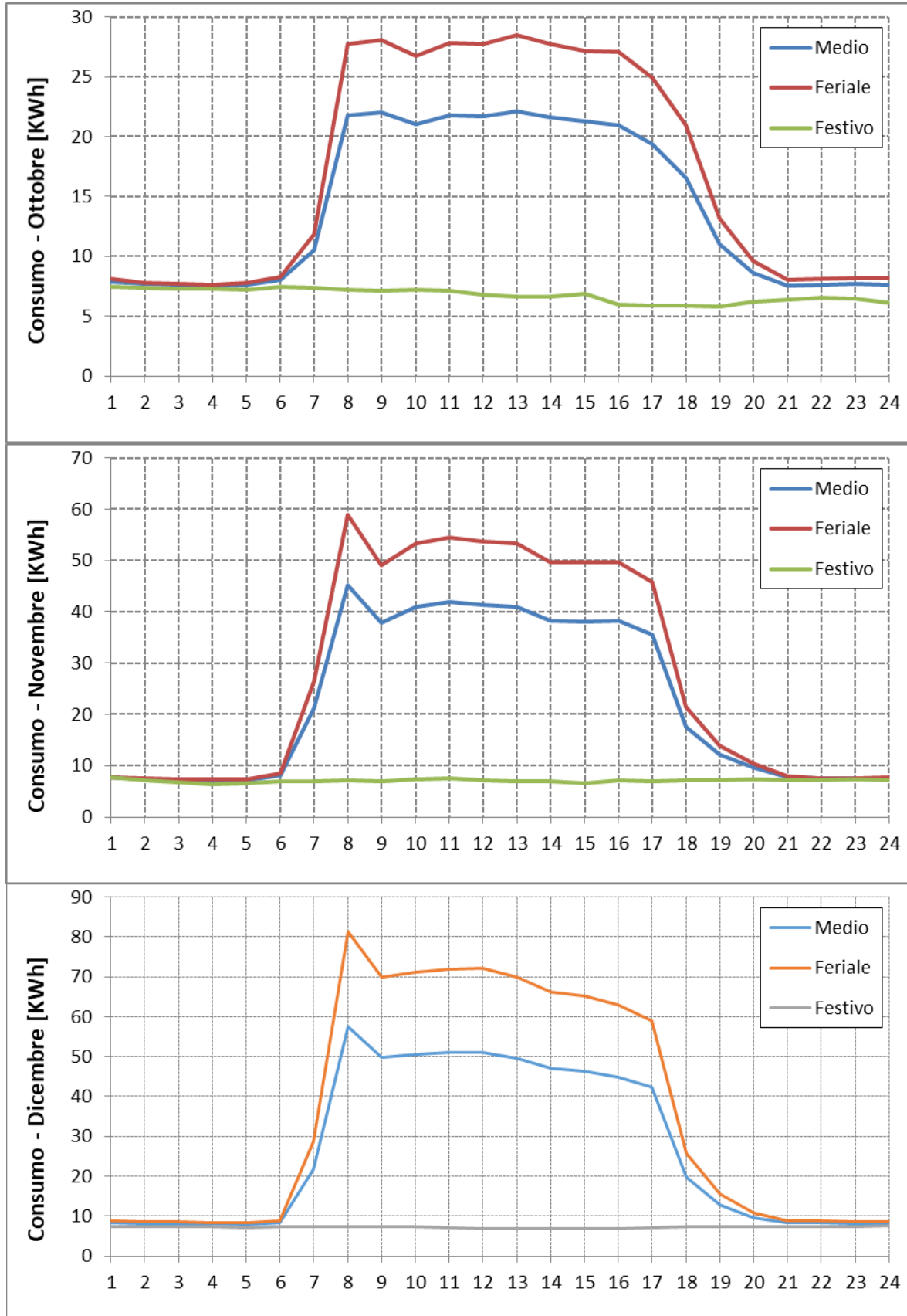


Figura 3.7. Profili di consumo orario del giorno tipo mensile medio, del giorno lavorativo e di quello festivo

Nella seguente Fig. 3.8 sono riportati i valori di consumo orario massimo rispettivamente del giorno medio, feriale e festivo. Si nota che i consumi crescono in estate e inverno per via dell'utilizzo dell'impianto di climatizzazione, mentre nei mesi di aprile e maggio, i consumi sono minimi.

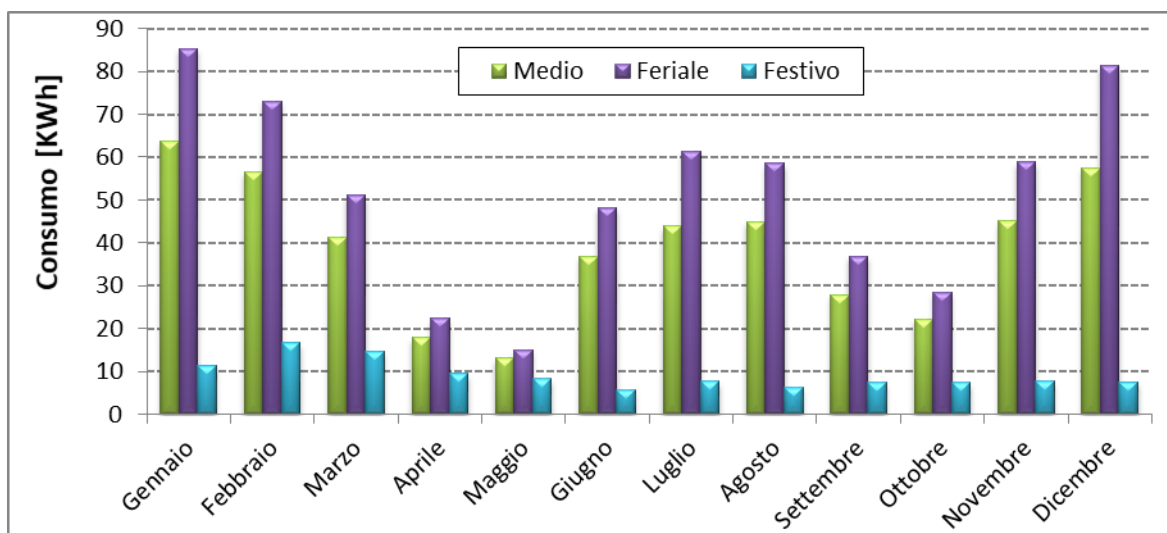


Figura 3.8. Consumo orario massimo.

3.3 Dati derivanti dal sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio della ditta Acotel installato presso la sede della Sotacarbo è in grado di rilevare i dati di consumo di diverse sezioni dell'impianto:

- Cabina elettrica;
- Generale uffici;
- Ufficio tipo;
- Generale laboratori;
- Pompa di calore.

Nella seguente Tab. 3.2 sono riportati i valori di consumo delle diverse sezioni monitorate.

Tabella 3.2. Consumo delle sezioni monitorate.

Sezione	Consumo [kWh/anno]
Generale uffici	28.178
Generale laboratori	28.057
Pompa di calore	59.275
Ufficio tipo	3.669

Dal dato del consumo globale e quelli delle zone principali (Generale uffici, Generale laboratori) è stato possibile ricavare il consumo annuo dell'Officina, pari a 69.649 kWh.

Per ciascuna sezione monitorata sono stati infine ricavati i consumi giornalieri dell'anno 2017 (Figg. 3.9-12).

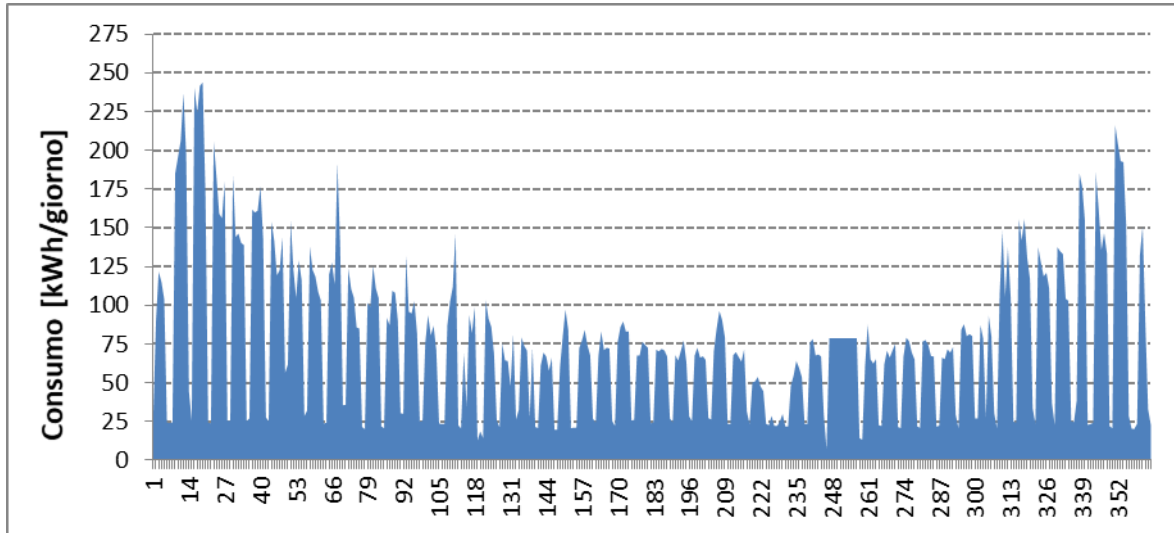


Figura 3.9. Consumo giornaliero Generale uffici.

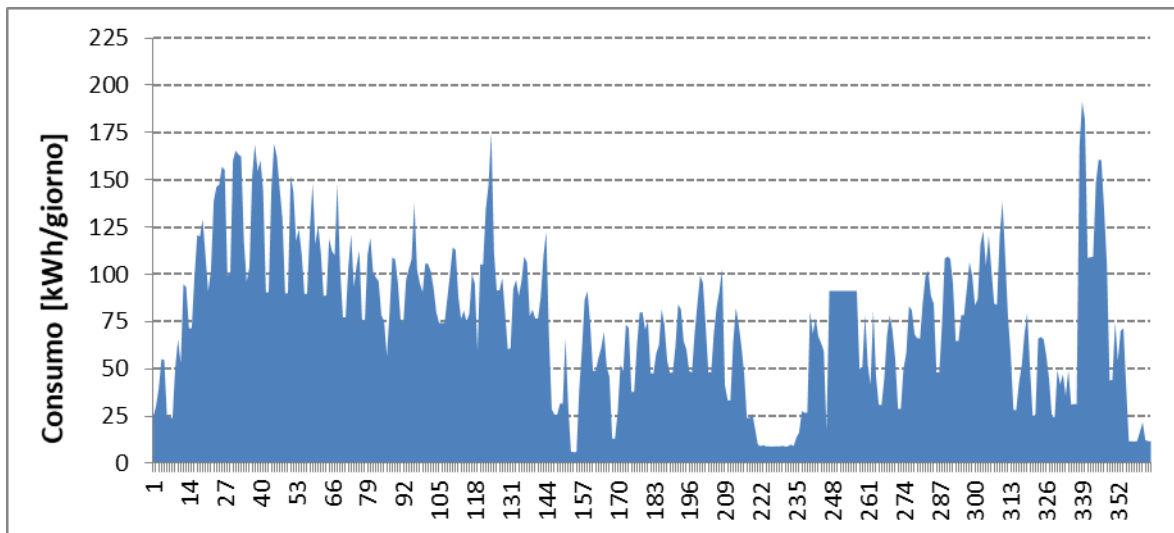


Figura 3.10. Consumo giornaliero Generale laboratori.

Nelle seguenti Figg. 4.4.3.3.5-8 sono riportati i valori di consumo orario massimo rispettivamente del giorno medio, feriale e festivo per le varie sezioni monitorate.

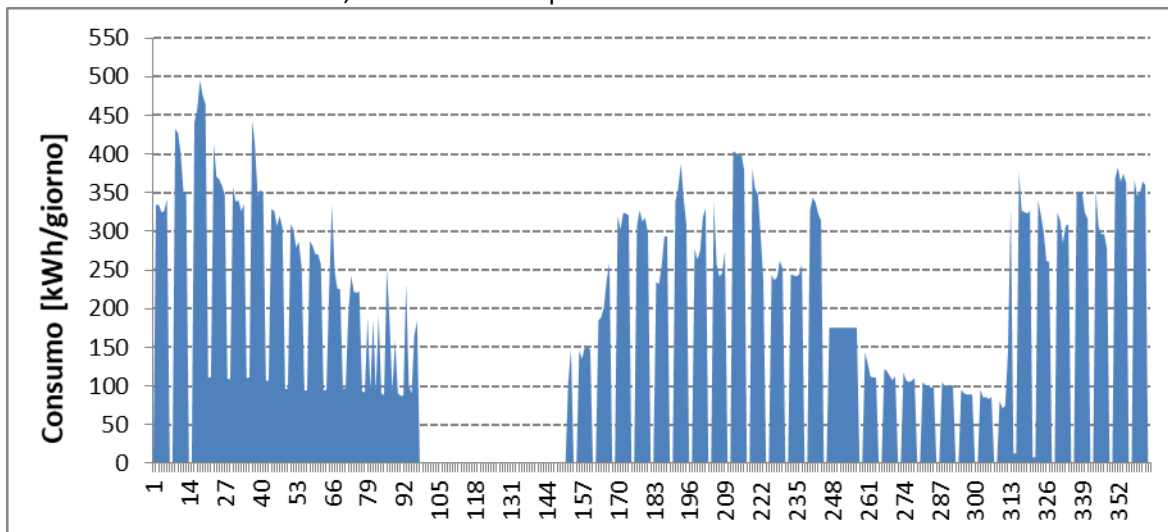


Figura 3.11. Consumo giornaliero Pompa di calore.

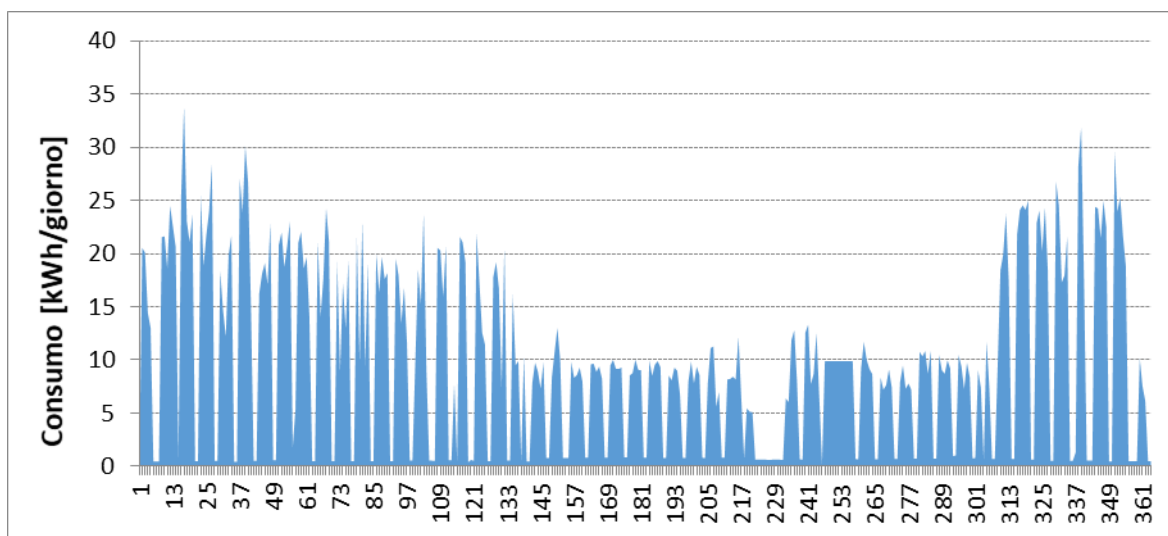


Figura 3.12. Consumo giornaliero Ufficio tipo

Nelle seguenti Figg. 3.13-16 sono riportati i valori di consumo orario massimo rispettivamente del giorno medio, feriale e festivo per le varie sezioni monitorate.

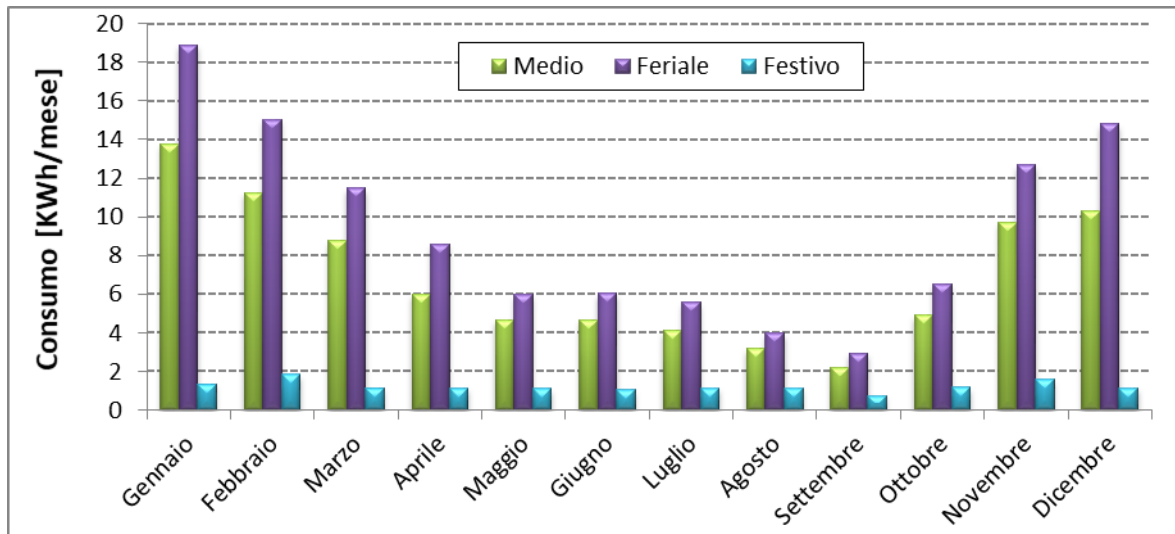


Figura 3.13. Consumo orario massimo Generale uffici.

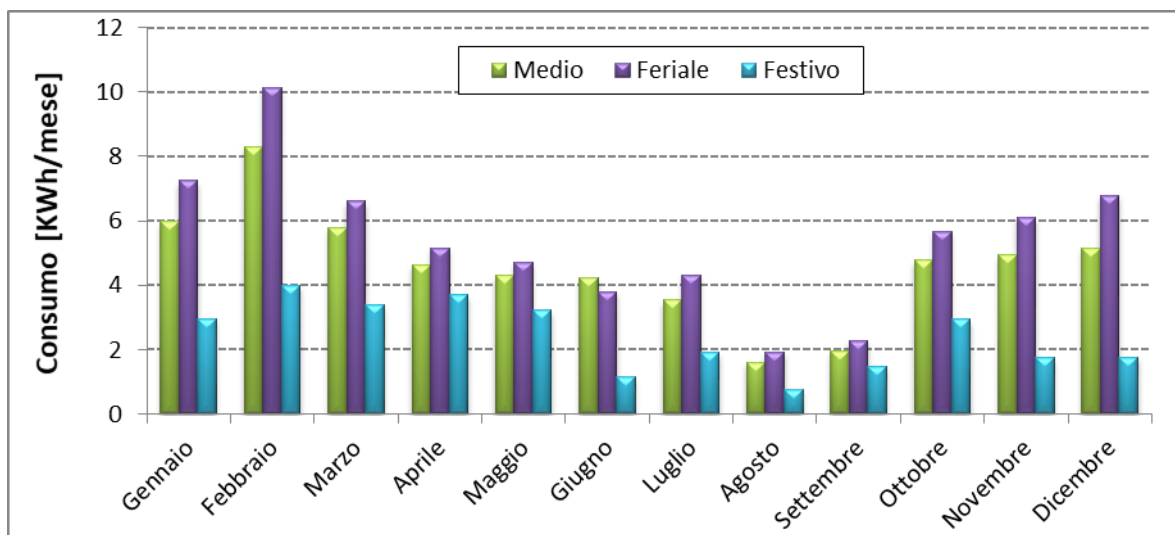


Figura 3.14. Consumo orario massimo Generale laboratori.

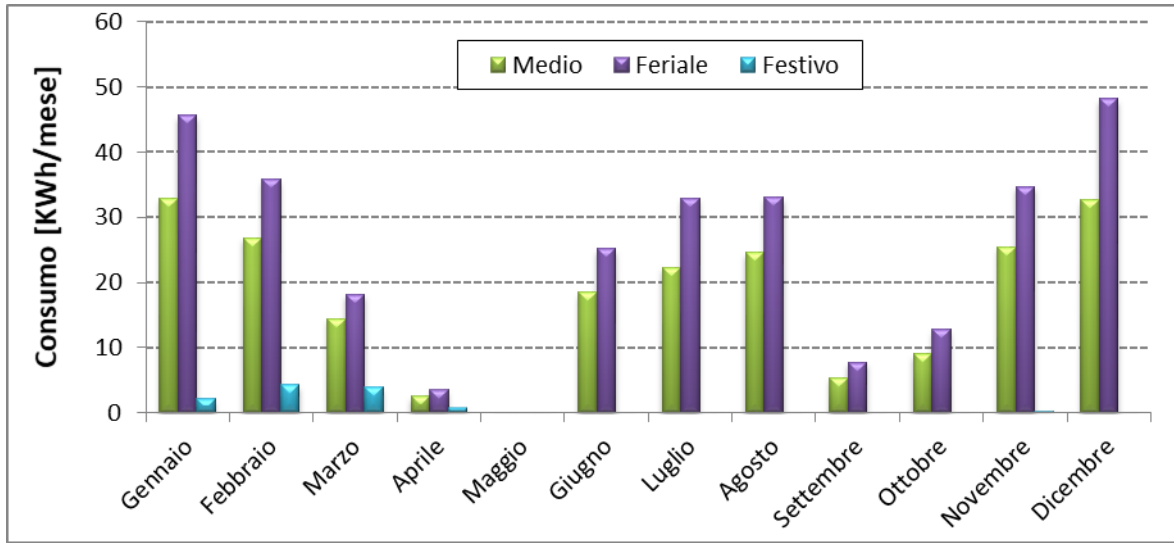


Figura 3.15. Consumo orario massimo Pompa di calore.

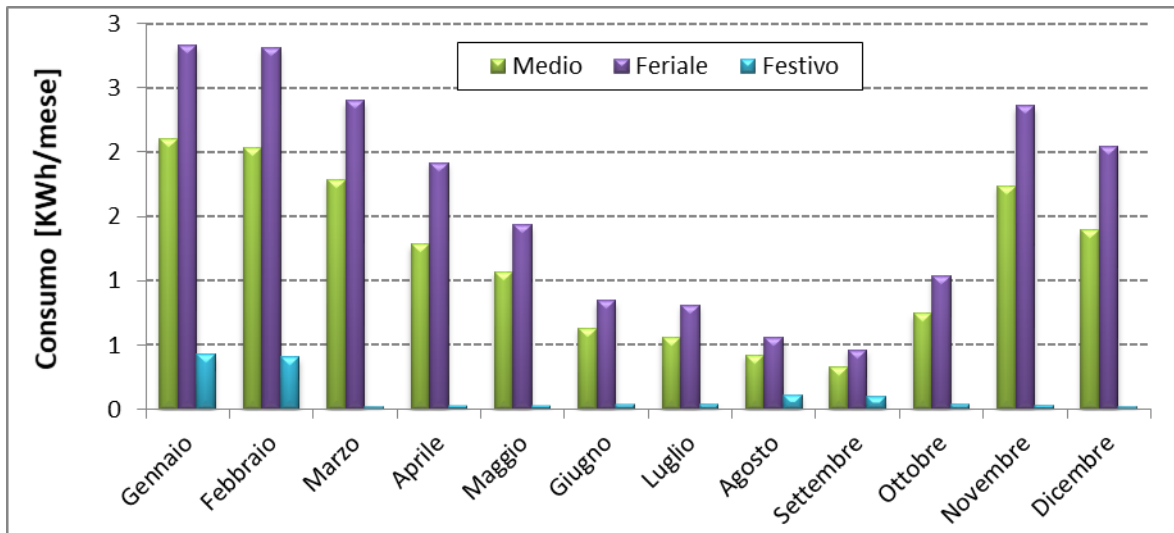


Figura 3.16. Consumo orario massimo Ufficio tipo.

4 Progetto di dettaglio del sistema di produzione di energia termica con sonda geotermica

Sotacarbo ha avviato già dalla precedente annualità 2016 una collaborazione con il Cinigeo un'attività di ricerca sulla possibilità di realizzazione di una microgrid in cui diverse fonti energetiche sono integrate a servizio dell'edificio CRS sito a Carbonia. Il presente progetto di ricerca è configurato come la naturale prosecuzione di quello intitolato "Sviluppo di un modello di micro-grid per la gestione ottimale di un sistema di produzione di energia termica con sonda geotermica", e ha come obiettivo la progettazione di dettaglio di un sistema di produzione di energia termica con sonda geotermica posto a servizio del Centro Ricerche Sotacarbo, sito in Carbonia nella Grande Miniera Serbariu.

Il componente studiato sarà parte integrante di una micro-grid in grado di gestire in maniera ottimale un sistema di produzione e accumulo energetico costituito dai seguenti elementi:

- Pompa di calore reversibile del tipo acqua-acqua
- Sonda geotermica
- Impianto fotovoltaico
- Sistema di accumulo elettrico (batterie e/o auto elettriche)
- Sistema di accumulo termico (boiler e/o "packed-bed")
- Sistema di gestione della micro-grid

Il sistema di generazione termica prevede l'accoppiamento di una pompa di calore reversibile del tipo acqua-acqua, in grado dunque di funzionare alternativamente in riscaldamento o in raffrescamento, che sarà accoppiata con una sonda geotermica del tipo verticale annegata nel terreno oppure ad acqua di falda.

Le attività svolte e i relativi risultati sono riassunti come di seguito riportato.

4.1 Caratterizzazione pozzo

A causa delle condizioni climatiche (a un periodo di notevole siccità è seguito un periodo caratterizzato da eventi piovosi fuori dall'ordinario) non è stato possibile effettuare la caratterizzazione del pozzo posizionato nella parte posteriore dell'edificio oggetto di studio, atto a determinare la portata disponibile, la temperatura (anche al variare della profondità) e le caratteristiche chimiche dell'acqua, necessarie per determinare se il pozzo possieda le caratteristiche prestazionali richieste in rapporto alla sua utilizzazione per il caso di specie. In ragione di questo si è proceduto alla progettazione di dettaglio sia del sistema accoppiato con acqua di falda, sia di quello con sonde geotermiche verticali.

4.2 Analisi FEM

Per la determinazione della distanza ottimale tra le sonde geotermiche verticali immerse nel terreno è stato utilizzato un modello numerico realizzato con il Metodo agli Elementi Finiti (FEM – Finite Element Method). Il modello realizzato è del tipo bidimensionale in cui è stata rappresentata una sezione orizzontale del terreno dove sono immerse le sonde geotermiche. Nel modello 2D sono state modellate la disposizione delle sonde e le caratteristiche del terreno. Successivamente sono state applicate le opportune boundary conditions in termini di flusso termico orario scambiato annualmente dalle sonde con il terreno. Le dimensioni e la distribuzione della mesh sono state definite attraverso un'analisi di sensitività. L'output

dell'analisi è costituita dall'evoluzione nel tempo del campo di temperatura del terreno circostante le sonde. La distanza ottimale tra le sonde è stata infine determinata in funzione della massima differenza di temperatura indotta nel terreno alla fine di un ciclo termico annuale. In tal modo oltre ai benefici energetici si è garantito il minore impatto ambientale sul terreno circostante, garantendo inoltre la costanza della prestazione nel sistema geotermico negli anni.

4.3 Dimensionamento sistema di accumulo elettrico

L'accumulo elettrico consentirà di aumentare l'autoconsumo dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico attraverso la riduzione della quantità di energia elettrica immessa in rete. Il dimensionamento del sistema di accumulo elettrico accoppiato con il sistema è stato effettuato in base a considerazioni di tipo tecnico ed economico. Infatti la capacità del sistema di batterie è stato definito attraverso un processo di ottimizzazione che ha avuto l'obiettivo di massimizzare la differenza tra i ricavi derivanti dal mancato acquisto di energia elettrica dalla rete e costi di acquisto e installazione dell'accumulo.

4.4 Progettazione di dettaglio

Questa fase, effettuata sia per il sistema accoppiato con acqua di falda sia per quello con sonde geotermiche verticali, ha permesso di individuare l'esatta configurazione del sistema, gli elementi (commerciali e non) che lo costituiscono ed i relativi costi. È inoltre stata individuata la dotazione strumentale a corredo dell'impianto per il monitoraggio delle grandezze (portate, temperature, assorbimenti, etc.) che permettono di determinare le prestazioni del sistema durante il futuro esercizio.

4.5 Conclusioni

Al termine dello studio effettuato sono stati individuati gli sviluppi futuri del progetto. Questi consistono nella realizzazione dell'impianto e nel suo esercizio, durante il quale si potrà effettuare un monitoraggio delle grandezze energetiche ed una valutazione delle relative prestazioni per un confronto con quelle teoriche previste. Come soluzione alternativa potrà essere inoltre valutata la possibilità di sostituire la pompa di calore esistente con una in grado di funzionare con il biogas prodotto dall'impianto pilota Sotacarbo.

I risultati della presente ricerca sono presentati nel report tecnico finale "Progetto di dettaglio del sistema energetico integrato di fonte elettrica, fotovoltaica e geotermica accoppiato ad accumulo di energia termica di tipo a termoclino a servizio di un edificio storico del Sulcis (CRS) – All.1 Progetto di dettaglio del sistema di produzione di energia termica con sonda geotermica" a cui si rimanda. Si prevede per i prossimi mesi la possibilità di condividere l'avanzamento prodotto con gli stakeholder potenzialmente coinvolti nel settore. Pertanto i risultati dell'attività proposta saranno oggetto di attività di disseminazione in contesti locali (seminari sull'efficienza energetica), nazionali e internazionali. In particolare come sedi di presentazione del lavoro sono stati individuati il Congresso Nazionale dell'Associazione Termotecnica Italiana (ATI) e alla Summer School "Francesco Turco" dell'Associazione Italiana dei Docenti di Impianti Industriali Meccanici (AIDI) nei quali nel 2018 sono stati presentati i risultati dell'attività del precedente progetto. A valle della

presentazione nel contesto congressuale seguiranno le relative pubblicazioni sulle corrispondenti riviste scientifiche (Energy Procedia, Elsevier) o atti di congresso.

5 Sviluppo di un sistema innovativo di accumulo termico basato su materiali a transizione di fase (PCM) per la gestione ottimale integrata di un impianto di climatizzazione e di un impianto solare fotovoltaico

Il progetto in esame si inquadra in una collaborazione di ricerca in essere tra il DIMCM e la Sotacarbo, iniziata con il progetto di ricerca "Sviluppo di un sistema innovativo di accumulo termico" sviluppato nella scorsa annualità. L'obiettivo generale di questi progetti di ricerca consiste nel fornire un contributo innovativo all'utilizzo ottimale dell'energia elettrica prodotta da un impianto fotovoltaico, di cui si prevede la realizzazione presso il Centro Ricerche Sotacarbo, attraverso la realizzazione di un sistema di accumulo energetico che consenta la riduzione degli interscambi di energia elettrica con la rete pubblica e la massimizzazione degli autoconsumi. In linea di principio tale obiettivo dovrà essere perseguito mediante l'integrazione dell'impianto di climatizzazione già esistente con un sistema di accumulo di energia termica (TES, Thermal Energy Storage). Il sistema TES verrà utilizzato come volano termico delle pompe di calore annesse all'impianto di climatizzazione, che a loro volta fungono da volano elettrico per l'impianto fotovoltaico di cui si prevede la realizzazione. Le azioni previste permetteranno di ottenere i seguenti benefici e implicazioni:

- incremento della quota di autoconsumo e riduzione degli interscambi con la rete elettrica esterna;
- riduzione degli interventi di fermata e di avviamento delle pompe di calore al raggiungimento delle temperature di set-point;
- produzione di energia termica ad opera delle pompe di calore contestuale alla produzione di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico in tempi e in misura svincolati dai fabbisogni istantanei, resa possibile attraverso la compensazione degli squilibri tra produzione e utilizzo da parte del sistema TES;
- In linea di principio tale obiettivo verrà perseguito, ovviamente, nei limiti consentiti dagli altri fabbisogni elettrici del Centro e dalla stagionalità della produzione e dei consumi:
- alimentando la pompa di calore dell'impianto di climatizzazione con l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico nelle ore caratterizzate da alta radiazione ed elevata richiesta energetica del Centro Ricerche (le ore centrali dei giorni feriali);
- alimentando la pompa di calore con l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico e accumulando nel sistema di accumulo termico (TES) l'energia termica (o frigorifera) da essa prodotta nelle ore caratterizzate da una radiazione solare elevata e da una scarsa domanda di energia elettrica (sostanzialmente i giorni festivi, quando il Centro Ricerche non è operativo);
- alimentando l'impianto di climatizzazione con l'energia termica (o frigorifera) accumulata nel TES nelle ore di scarsa (o nulla) produzione da fotovoltaico ed elevata richiesta energetica del Centro Ricerche (sostanzialmente le prime ore del mattino e la fine del pomeriggio dei giorni feriali, durante gli orari di apertura del Centro Ricerche).

Aspetto centrale ed innovativo del progetto di ricerca proposto in questa annualità è lo studio concettuale di un sistema di accumulo termico non convenzionale basato sull'utilizzo di PCM e il suo confronto con i sistemi di accumulo ad acqua di tipo convenzionale e di accumulo a letto di materiale solido a basso costo basato sul principio del termoclino, oggetto di studio nel precedente progetto di ricerca. Il progetto di ricerca proposto si è sviluppato secondo le seguenti fasi e attività.

5.1 Valutazione della produzione media oraria dell'impianto fotovoltaico.

La valutazione della produzione elettrica media oraria dell'impianto fotovoltaico, fondamentale per stimare le prospettive di integrazione con il sistema di climatizzazione, è già stata effettuata nel corso della precedente annualità. La produzione di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico è stata determinata attraverso un modello di simulazione dell'impianto fotovoltaico appositamente sviluppato che sfrutta i dati generati dal software "Meteonorm" di previsione dei dati meteo-climatici. Poiché Meteonorm consente di generare, per mezzo di sofisticati modelli stocastici, le medie orarie di radiazione globale normale alla superficie ricevente e di temperatura ambiente, relativamente alla posizione geografica della sede della Sotacarbo, per un "anno tipo" di riferimento le previsioni sulla produzione non differirebbero da quanto ottenuto lo scorso anno.

5.2 Analisi dei profili di carico e di produzione e valutazione dei bilanci energetici per il dimensionamento del sistema TES.

Le previsioni di produzione elettrica da fotovoltaico ottenute attraverso il software Meteonorm hanno permesso la definizione, per ciascun mese dell'anno, di un giorno tipo medio mensile, determinando l'andamento della produzione media oraria stimata di energia elettrica dell'impianto fotovoltaico. È stata quindi aggiornata l'analisi dei profili di carico del Centro Ricerche Sotacarbo sulla base dei nuovi dati acquisiti attraverso un più accurato monitoraggio dei consumi energetici della struttura da parte della Sotacarbo con riferimento all'anno solare 2017. L'aggiornamento dell'analisi ha permesso di ridefinire i profili di carico, su base oraria, di due giorni tipo, uno feriale e uno festivo, per ognuno dei mesi dell'anno. Infine, la successiva sovrapposizione dei profili di carico con i profili di produzione da fotovoltaico ha permesso di valutare, su base oraria, deficit e surplus energetici della struttura. Considerata la ridotta variazione dei consumi elettrici della struttura rispetto all'annualità precedente, l'analisi della produzione elettrica da fotovoltaico e dei consumi elettrici ribadisce i risultati precedentemente ottenuti ovvero emerge come nelle giornate festive, soprattutto durante l'estate, si abbia generalmente un surplus di produzione di energia elettrica rispetto ai fabbisogni del centro ricerche, mentre nei giorni feriali, soprattutto in inverno, si abbia un deficit di energia, situazione che comporta un significativo interscambio di energia elettrica con la rete pubblica. È quindi stata ribadita l'opportunità di utilizzare in modo conservativo l'energia elettrica prodotta in eccesso durante le giornate festive in modo da ridurre l'interscambio con la rete pubblica. L'eccedenza di produzione elettrica, infatti può essere efficacemente utilizzata per alimentare una delle nuove pompe di calore per le quali è prevista l'installazione nell'impianto di climatizzazione producendo energia termica (o frigorifera nella stagione estiva) da immagazzinare in un opportuno sistema di accumulo, per poi utilizzarla nelle giornate feriali al fine di mitigare gli assorbimenti elettrici delle pompe di calore quando l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico è insufficiente a coprire i fabbisogni.

5.3 Valutazione dei bilanci energetici per il dimensionamento del sistema TES.

Le dimensioni del sistema TES, in termini di capacità di accumulo, sono state quindi valutate, a partire dai profili orari di deficit e surplus energetico precedentemente calcolate, per diverse condizioni operative di riferimento tenendo conto dei fabbisogni di climatizzazione estiva e invernale. Con l'obiettivo di massimizzare l'autoconsumo e l'autosufficienza, compatibilmente con i limiti di potenza dell'impianto fotovoltaico, è stata valutata l'opportunità di realizzare un accumulo termico di capacità semi-giornaliera, giornaliera o pluri-giornaliera.

5.4 Sviluppo di un modello numerico di simulazione del sistema innovativo di accumulo termico.

Ai fini della progettazione e della valutazione delle prestazioni del sistema di accumulo termico più idoneo allo scopo è stato sviluppato un modello di simulazione dinamica del sistema TES innovativo basato su materiali a transizione di fase a partire dalla rielaborazione di un modello numerico precedentemente realizzato per lo studio di sistemi TES integrati in applicazioni ad alta temperatura. Il modello in parola è stato utilizzato per la previsione del comportamento del materiale PCM nel processo di accumulo di energia termica, analizzando accuratamente gli scambi termici tra PCM e fluido termovettore, e determinando l'evoluzione temporale del campo di temperatura all'interno del TES durante entrambe le fasi di carica e scarica. Il modello numerico ha costituito uno strumento indispensabile per la definizione delle specifiche di

progetto e per la valutazione delle prestazioni energetiche del sistema di accumulo termico nonché per la valutazione delle prestazioni del sistema integrato pompa di calore- TES e del sistema esteso termico-fotovoltaico. Inoltre potrà essere utilizzato per la definizione dei criteri di gestione dei medesimi sistemi integrato ed esteso

5.5 *Sviluppo, dimensionamento e analisi delle prestazioni dei sistemi di accumulo.*

Sulla base delle valutazioni effettuate e delle risultanze emerse nel corso dell'analisi dei profili di carico e di produzione elettrica da fotovoltaico il dimensionamento del sistema di accumulo è stato effettuato con riferimento a differenti specifiche di progetto. Il volume del serbatoio di accumulo è stato perciò dimensionato con riferimento ai seguenti aspetti:

- Disponibilità di energia elettrica in eccedenza nel periodo invernale, con riferimento al giorno festivo "tipo" del mese di gennaio. In questo caso, essendo l'eccedenza di energia elettrica non particolarmente marcata, il suo sfruttamento è esteso ai due giorni consecutivi del weekend ed è stata prevista anche una integrazione di energia elettrica dalla rete per azionare la pompa di calore.
- Disponibilità di energia elettrica in eccedenza nel periodo estivo, con riferimento al giorno festivo "tipo" del mese di giugno. Poiché durante il mese estivo il surplus dei giorni festivi è particolarmente elevato, mentre, al contrario, il deficit dei giorni feriali è parecchi ridotto in questo caso si è previsto lo sfruttamento dell'energia elettrica disponibile in eccedenza limitato ad un solo giorno garantendo un dimezzamento dell'ingombro.

Il dimensionamento preliminare è stato effettuato considerando serbatoi di accumulo di forma cilindrica con valori del rapporto altezza/diametro (aspect ratio) variabili tra 1 e 3 a parità di volume.

Sono state considerate due diverse tipologie di materiale PCM per il riempimento del serbatoio di accumulo, entrambe caratterizzate da una transizione di fase che avviene in un intervallo di temperatura di 3-5 °C. Al proposito è opportuno segnalare che una considerevole riduzione delle dimensioni del sistema di accumulo potrebbe essere ottenuta attraverso l'utilizzo di un sistema a calore latente basato su opportuni PCM (Phase Change Materials). L'analisi delle prestazioni del sistema di accumulo con PCM è in fase di avanzamento e potrebbe essere oggetto di una futura ricerca:

- PCM con temperatura di transizione di fase nell'intervallo 40-45 °C adatte per il funzionamento invernale;
- PCM con temperatura di transizione di fase nell'intervallo 18-24 °C adatte per il funzionamento estivo.

Per ovvie problematiche di costi e gestione il sistema proposto può prevedere il caricamento del serbatoio solo con un'unica tipologia di PCM (funzionamento estivo o invernale). Conseguentemente nell'altra stagione il sistema si comporta come un serbatoio a termoclino.

Con l'ausilio dei summenzionati modelli di calcolo, per ciascuna configurazione sono state analizzate l'evoluzione del profilo di temperatura all'interno del serbatoio e l'evoluzione dell'energia termica residente del serbatoio durante le fasi di carica e scarica.

Dall'analisi delle prestazioni delle varie configurazioni del sistema di accumulo a PCM analizzate nel corso del progetto di ricerca emerge come il sistema preposto al funzionamento invernale con materiale PCM caratterizzato da transizione di fase tra 40 e 45 °C assicuri un miglior sfruttamento dell'energia in eccesso. Infatti il dimensionamento del sistema di accumulo effettuato con riferimento al surplus estivo, anche nella ipotesi scelta di limitare il caricamento del serbatoio ad una sola giornata del weekend, comporterebbe la realizzazione di un serbatoio sovradimensionato per i mesi invernali. Inoltre, a causa del ridotto deficit elettrico dei giorni feriali, l'energia frigorifera accumulabile nei giorni festivi non potrebbe essere completamente utilizzata durante la settimana feriale estiva.

Il dimensionamento invernale prevede, invece, un sistema di accumulo di minori dimensioni, tali da assicurare l'accumulo del surplus energetico di un weekend "tipo" del mese di gennaio. Un sistema di

accumulo di queste dimensioni potrebbe essere facilmente "scaricato" durante i giorni feriali, ma una quota anche superiore al 70% del surplus delle giornate festive estive non potrebbe essere recuperata.

5.6 *Confronto con sistemi di accumulo a calore sensibile di tipo convenzionale e innovativo.*

I risultati ottenuti con il modello di accumulatore innovativo basato su PCM sono stati confrontati con gli analoghi risultati ottenuti con i modelli numerici di simulazione dell'accumulatore convenzionale ad acqua e di un accumulatore innovativo con materiale solido di riempimento (sistema packed-bed a termoclino), sviluppati nella scorsa annualità ed aggiornati con i nuovi profili di carico della struttura, al fine di un confronto tra le diverse soluzioni, convenzionale e innovative. Il confronto tra le diverse soluzioni è stato effettuato attraverso la definizione di indici di autoconsumo e di autosufficienza energetica per evidenziare vantaggi e svantaggi della soluzione innovativa basata sui PCM. Dalle analisi effettuate emerge come il volume del serbatoio a PCM risulti essere pari a circa il 20-25% di quello del serbatoio a termoclino, anche se ovviamente i costi del materiale di riempimento sarebbero notevolmente superiori. Al fine di effettuare una scelta progettuale corretta sarebbe ovviamente necessaria anche una dettagliata analisi economica.

5.7 *Conclusioni*

I risultati della ricerca sono stati raccolti in un rapporto finale tecnico-scientifico e verranno presentati alla comunità scientifica attraverso la presentazione degli stessi a conferenze internazionali e/o attraverso la pubblicazione in riviste scientifiche.

Altre possibili soluzioni, la cui scelta dipende essenzialmente dai limiti posti alle dimensioni del sistema dagli spazi disponibili e, ovviamente, dai costi sostenibili, potranno essere analizzate in una fase successiva della ricerca. L'eventuale proseguimento della ricerca in una fase successiva a quella della presente proposta potrà anche prevedere il progetto, la realizzazione e la sperimentazione del sistema di accumulo che attraverso lo studio dei parametri tecnico-economici verrà ritenuto il più idoneo al caso di studio. Un altro aspetto di fondamentale importanza da sviluppare in una fase successiva sarebbe quello riguardante lo studio della gestione del sistema di accumulo termico e conseguentemente del sistema integrato pompa di calore-TES. Infatti tale gestione va operata in funzione delle richieste termiche dell'utenza: una gestione ottimale del sistema TES permette infatti di massimizzare l'autoconsumo della produzione elettrica dell'impianto fotovoltaico svincolando la produzione di energia termica della pompa di calore dai profili temporali dell'utenza termica (climatizzazione invernale ed estiva). In tal senso, sviluppare in futuro una modellistica di gestione permetterà anche di valutare le modalità operative del sistema integrato termico-fotovoltaico nel suo complesso in funzione dei profili temporali di utenza termica e di produzione fotovoltaica.