POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi di un sistema multi energia a pompa di calore applicato ad un complesso residenziale

Relatore/i

Prof. Enrico Fabrizio

Prof. Marco Filippi

Ing. Alessandro Biglia

Candidato

Dario Di Gregorio

Anno Accademico 2017/2018

Sommario

1. Introduzione 1
1.1 Il settore residenziale 5
1.1.1 I consumi energetici nel residenziale 5
1.1.2 L'evoluzione degli impianti termici 7
1.1.3 Gli impianti termici a pompa di calore – la tecnologia 9
1.1.4 La generazione di acqua calda sanitaria (ACS) con pompa di calore 15
1.1.5 Le prestazioni delle pompe di calore 17
1.1.6 Gli impianti termici: esempi di realizzazioni di impianti a pompa di calore 19
1.2 Obbiettivo del lavoro di tesi 23
2. Introduzione al caso studio 24
2.1 Il complesso residenziale 24
2.1.1 Descrizione generale 24
2.1.2 Il locale tecnico: la sottocentrale 26
2.1.3 Il sistema di riscaldamento 28
2.1.4 Il sistema per la produzione di ACS 30
2.2 Analisi dei profili di richiesta dell'utenza 32
2.2.1 Riscaldamento 32
2.2.2 Produzione di acqua calda sanitaria 37
3. Modello di calcolo del caso studio 42
3.1 Introduzione e Modello matematico 42
3.1.1 La forma matriciale dell'Energy Hub 45
3.1.2 Caratteristica energetica dei convertitori 48
3.1.3 Obbiettivo del modello 49
3.2 Il caso studio 50
3.2.1 Il "Sistema 0" 51
3.2.2 Il "Sistema 1" 67
3.2.3 Il "Sistema 2" 99
3.3 Pompa di calore aria-aria 113
Bibliografia 121

Premessa

Con la parola "Energia" siamo soliti indicare un sistema fisico che ha in potenza la capacità di svolgere una qualsivoglia attività, a prescindere che poi questa venga svolta o meno. Partendo da questa definizione classica, quasi Aristotelica, di energia si è andati verso una concezione della stessa in maniera più pratica, per usare un termine molto comune oggi, più quotidiana. Infatti, oggi, parlando di energia si pensa subito ad una serie di azioni che svolgiamo quotidianamente e facciamo rientrare nei nostri bisogni di base come mangiare, dormire ecc. Un esempio è regolare il sistema di riscaldamento per il comfort domestico o utilizzare l'acqua calda sanitaria per cucinare o lavarsi, ma anche l'azione di premere un interruttore o collegare una spina alla presa e di avere un servizio istantaneo, come l'accensione di un elettrodomestico o del sistema di illuminazione. Quindi quando oggi si parla di energia immancabilmente e in maniera quasi inconscia, si pensa ad una condizione di comfort, ad un servizio quasi istantaneo pronto a soddisfare le nostre necessità. Questa situazione di comfort però ha inevitabilmente un peso specifico nel bilancio del nostro pianeta, ovvero per collegarci alla definizione più classica citata prima, l'energia non viene creata bensì viene trasformata in "servizi e comfort" partendo da una risorsa energetica di forma diversa e presente in natura a seguito dell'evoluzione terrestre nel corso dei millenni. In più in un sistema reale è impossibile ottenere una trasformazione completa al 100% per cui a seguito di un processo di trasformazione si avrà sempre una generazione di scarti. La figura professionistica dell'ingegnere energetico, o di "esperto in sistemi energetici" (UNI CEI EN ISO 50001 , 2011)*, ha il compito di ridurre in maniera efficiente sia le risorse utilizzate sia gli scarti generati, promuovendo tecnologie di trasformazione sempre più efficienti e con un basso impatto ambientale parallelamente ad un'azione di regolazione e controllo del sistema stesso mirata e precisa che tenga conto delle reali condizioni al contorno in cui il sistema energetico si trova ad operare. Questo lavoro di tesi è stato sviluppato per evidenziare proprio questo aspetto, ovvero come una corretta regolazione e un accurato monitoraggio delle condizioni di funzionamento siano necessari per il corretto esercizio del sistema energetico, anche se la tecnologia utilizzata è innovativa.*

Il caso studio è costituito da una pompa di calore geotermica per la produzione di acqua tecnica per il riscaldamento e per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) posizionata nel locale tecnico di un grosso complesso residenziale di circa 300 unità abitative. Di questa tecnologia si farà un punto sullo stato dell'arte nel primo capitolo in cui si darà una giustificazione alla larga diffusione su scala nazionale ed europea di questa tecnologia. Si riporteranno, inoltre, alcuni esempi pratici di realizzazioni di impianti a pompa di calore innovativi in contesti simili e con applicazioni più ampie come quelle terziarie (ospedali, centri commerciali, teatri etc.) e industriali. Nel secondo capitolo verrà condotta un'analisi del funzionamento del sistema energetico del caso studio, attraverso la modellizzazione dello stesso con un codice basato sulla teoria dell'Energy Hub (Fabrizio, Modelling of multi-energy systems in buildings, 2008)*. Grazie al modello sviluppato si metteranno in evidenza le criticità dello stato di fatto. Infine, nel terzo capitolo, ricollegandosi alle criticità emerse dall'analisi del funzionamento del sistema energetico, si proporranno delle alternative progettuali per l'ottimizzazione di funzionamento sia in termini di regolazione sia in termini di efficienza e quindi di consumi.*

1. Introduzione

I cambiamenti climatici che hanno caratterizzato il nostro pianeta a partire dai primi anni del nuovo millennio fino ai giorni nostri, hanno messo in evidenza la necessità di una massiccia revisione delle abitudini energetiche globali, sia per quanto riguarda l'approvvigionamento delle risorse sia per quanto riguarda le tecnologie di trasformazione e i relativi usi finali. Non tutti gli Stati hanno risposto in maniera positiva a questa necessità di cambiamento, soprattutto i così detti "*paesi emergenti*" come Cina, India, Brasile ma anche paesi più evoluti come Stati Uniti e Russia, tuttavia è significativo come il "*vecchio continente*" abbia dato un forte segnale a tutti gli altri paesi, essendo uno dei primi a promuovere "l'uso razionale dell'energia" a livello internazionale con il protocollo di Kyoto del 1997, in cui ha partecipato da protagonista nella stipula del trattato e a livello comunitario, attraverso la delibera di numerose direttive verso i suoi stati membri. La direttiva più importante sull'utilizzo delle fonti energetiche, specialmente quelle rinnovabili o assimilate è la 2009/28/CE, nel quale si definiscono "gli strumenti, i meccanismi, gli incentivi e il quadro istituzionale, finanziario e giuridico, necessari per il raggiungimento degli obiettivi fino al 2020 in materia di quota complessiva di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia" e le "norme relative ai trasferimenti statistici delle quote tra gli Stati membri" (Direttiva 2009/28/CE, 2009). In termini pratici, ad ogni Stato membro viene assegnata una quota di energia prodotta da fonti rinnovabili, da applicare al proprio fabbisogno lordo di energia. Sarà onere dello Stato membro, attraverso la redazione di un piano d'azione nazionale, decidere il raggiungimento di tale quota. Secondo i dati forniti da ENEA, in Italia nel 2010 si sono consumati circa 135 Mtep di energia primaria per soddisfare il fabbisogno energetico nazionale. Analizzando l'impatto dei vari settori sul consumo totale appena riportato, si può notare come circa il 35% sia destinato agli usi civili, mentre solo il 24% è destinato agli usi industriali (ENEA, 2013). Inoltre il trend storico di questi dati mostra come sicuramente nei due bienni successivi (2011-2015) c'è stata una crescita dei consumi nel primo settore in valore assoluto maggiore che negli altri. Queste analisi sono confermate dai rapporti statistici fatti dallo stesso ente negli anni successivi (ENEA, 2015). È possibile osservare questi andamenti in Fig. 1 e Fig. 2 dove vengono riportati oltre ai due settori appena citati anche quello dei

trasporti che ha un impatto sui consumi circa uguale a quello per usi civili anche se mostra un trend decisamente decrescente per i due bienni successivi (ENEA, 2015).

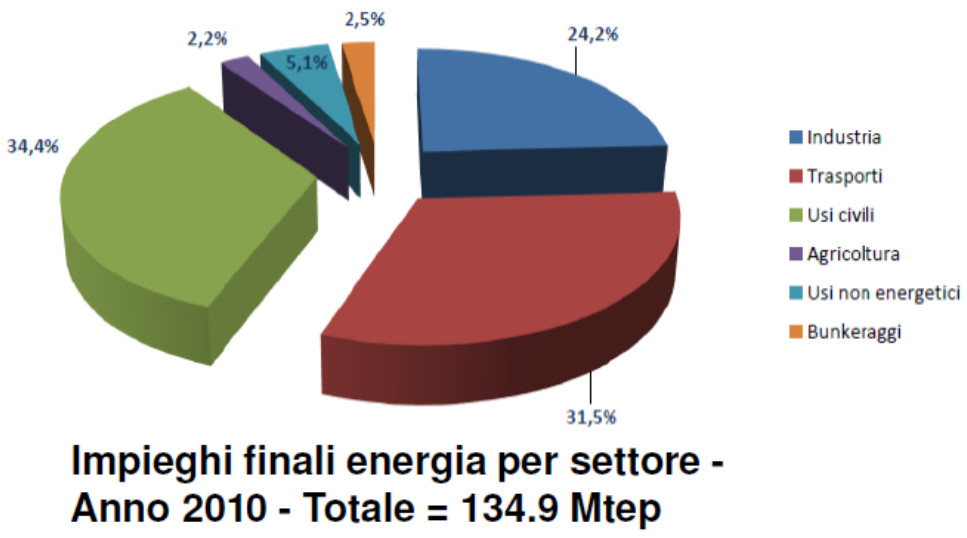


Figura 1 - Ripartizione percentuale dei consumi di energia primaria per settori

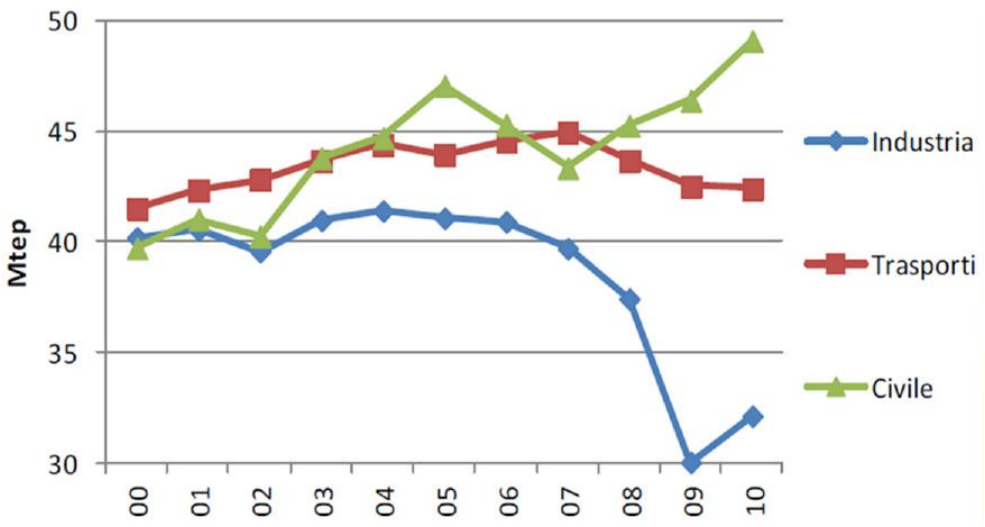


Figura 2 - Trend storico dei consumi ripartiti per settore

In ottemperanza alla Direttiva Europea sopracitata e a seguito dell'analisi dei dati statistici proposti da ENEA e appena citati, l'Italia ha proposto il primo Piano d'Azione Nazionale per l'Efficienza Energetica (PAEE, 2007), presentato a luglio del 2007 e in parallelo ha presentato il Piano d'Azione Nazionale per le Energie Rinnovabili. Questo fornisce indicazioni e requisiti nel settore dell'efficienza energetica inducendo a valutare gli obiettivi della Direttiva 2009/28/CE (Direttiva 2009/28/CE) in un contesto strategico anche al di fuori dei propri ambiti. Questo ha portato ad attuare la promozione dell'efficienza

energetica tra le priorità della sua politica energetica nazionale, alla quale si associa il perseguimento della sicurezza dell'approvvigionamento energetico, della riduzione dei costi dell'energia per le imprese e i cittadini, della promozione di filiere tecnologiche innovative e della tutela ambientale, anche in relazione alla riduzione delle emissioni climalteranti. Le trasformazioni e le novità introdotte dalle normative in atto, nell'ambito dell'efficienza energetica degli edifici, indirizzano il Governo e le Regioni alla introduzione di nuovi standard, metodologie, nuovi strumenti normativi per le nuove edificazioni e per le riqualificazioni, specialmente per quanto riguarda gli edifici pubblici. In questi ultimi anni è emersa la necessità di promuovere l'efficienza energetica considerando, oltre le azioni specifiche sull'efficientemente energetico, la dimensione economico e sociale dello sviluppo, intesa anche come occasione per migliorare la competitività e la ricerca, sempre nel sostegno di una crescita basata su maggiore occupazione e produttività. Queste Direttive hanno avuto un impatto notevole nel settore dell'industria, portando alla nascita e al perfezionamento di tecniche che permettano di avere rendimenti di funzionamento degli impianti sempre maggiori e un progressivo abbattimento delle emissioni inquinanti. Dalle ultime indagini dell'ENEA si è potuto osservare che si sono raggiunti degli ottimi risultati in questo settore, con una diminuzione dei consumi dettata anche dalla crisi economica mondiale dal 2009 al 2014. Come detto in apertura, il settore che invece presenta dei trend positivi in Italia come in Europa è il settore residenziale e terziario. Partendo da un dato di consumi del 2009 a circa 46,9 milioni di tep (28,6 milioni nel settore residenziale e 18,3 nel terziario) mantenendo e incrementando il proprio consumo energetico del 4,8% nel 2008 e di un ulteriore 3,5% nel 2009 collegato alla variabilità climatica (gas +5% ed energia elettrica +3%, rinnovabili +9%) (ENEA, 2013) ad oggi il valore dei consumi dello stesso settore è salito a 48.5 milioni di tep mantenendo all'incirca la stessa proporzione tra civile e terziario del 2009 (ENEA, 2017) . La Comunità Europea già da molto tempo prima della pubblicazione di questi dati ha proposto delle Direttive atte al miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici, riconosciuti come uno dei settori a cui imputare i maggiori consumi negli usi finali di energia, come mostrato dai dati sopra, e delle maggiori emissioni di gas climalteranti a livello europeo e nazionale. L'impulso viene con la Direttiva Europea 2002/91/CE, nota come EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) (European Commission, 2002), emanata con l'obiettivo di migliorare le prestazioni energetiche del settore civile. Il problema è particolarmente sentito in Italia,

notoriamente caratterizzata da un parco edilizio poco performante dal punto di vista energetico, se rapportato alla relativa mitezza del clima. La Direttiva ha così dato il via ad una serie di azioni e provvedimenti che, nel nostro Paese, si sono rivolte all'aggiornamento del quadro legislativo di riferimento e all'adeguamento delle relative norme tecniche. Questa direttiva è stata modificata e integrata, poi, dalla nuova direttiva 2010/31/CE (European Commission, 2010) che rafforza l'obiettivo della riduzione dei consumi e, tra gli altri provvedimenti da recepire, impone di rispettare, a partire dal 2018, per i nuovi edifici del settore pubblico, edifici a consumo energetico quasi zero (Nearly Energy Zero Building) e per quelli oggetto di riqualificazioni risultati di massima efficienza energetica in considerazione del fattore costo/beneficio, mentre dal 2020 tale obbligo sarà esteso a tutti i nuovi edifici pubblici e privati. In questo panorama il Governo e le Regioni hanno emanato leggi e provvedimenti finalizzati al raggiungimento della massima efficienza energetica negli edifici. Tra i provvedimenti, emanati dal Ministero dello Sviluppo Economico, si segnalano in particolare le Linee Guida Nazionali per la Certificazione Energetica degli Edifici per l'attuazione del D. Lgs. 192/2005 (D. Lgs. 192/2005), che recepisce la direttiva 2002/91/CE (European Commission, 2002) relativa al rendimento energetico nell'edilizia, il D. Lgs. 115/08 (D. Lgs. 115/08) promulgato in attuazione della direttiva 2006/32/CE (European Commission, 2006) relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia per i servizi energetici e il decreto, in fase di preparazione per aggiornare il D. Lgs. 192/05 (D. Lgs. 192/2005), che conterrà anche alcune misure che terranno conto della direttiva 2010/31/CE (European Commission, 2010) e del suo recepimento. Inoltre è stato emanato il D. Lgs. 3 marzo 2011 n. 28 (D. Lgs. 28/2011), in attuazione della direttiva 2009/28/CE (Direttiva 2009/28/CE), che prevede provvedimenti immediatamente operativi e altri di medio e lungo periodo (Felice, 2013) .

1.1 Il settore residenziale

1.1.1 I consumi energetici nel residenziale

Come evidenziato nel paragrafo introduttivo, i consumi energetici del settore residenziale e terziario occupano circa il 30% dei consumi energetici totali in Italia (ENEA, 2013). I due settori vengono trattati come un unico grande insieme ma il primo occupa circa l'88% del totale sottolineando l'importanza di un'analisi approfondita dei trend del settore.

Le abitazioni di tipo residenziale, rappresentando oltre la metà dell'intera superficie edilizia nazionale, sono sicuramente uno dei punti più sensibili del campo delle costruzioni. Il parco edilizio italiano si può definire "vecchio" e in linea di massima molto poco efficiente, in quanto la maggior parte degli edifici risale ad anni (dal Dopoguerra agli anni Settanta) in cui vi era un alto livello di benessere e la crescita economica massiccia faceva sì che le spese per il mantenimento di un immobile non rappresentassero un grosso problema (De Franceschi, 2011) e (ENEA, 2015) ; di conseguenza, anche le tecnologie costruttive e impiantistiche (queste ultime decisamente lontane dagli standard attuali) erano tutt'altro che volte al contenimento dei consumi, privilegiando piuttosto l'estetica e la tradizione architettonica. L'età di una costruzione diviene quindi un aspetto determinante che aiuta a capire quale può essere il suo stato di conservazione; le prestazioni infatti non sono solamente collegate al livello di degrado, ma variano sensibilmente anche in funzione delle scelte progettuali eseguite in origine come la tipologia degli impianti, le tecnologie costruttive impiegate e anche le scelte distributive (forma, orientamento, ecc.). Confrontando come già accennato gli edifici del secondo Dopoguerra con quelli di epoca più recente, si denota che nei primi vi erano molte più dispersioni termiche legate alla tecnologia dell'involucro e molti più spifferi d'aria, provocati da elementi tecnici e metodi di montaggio non eccessivamente raffinati; dopo gli anni Settanta, grazie alle innovazioni in campo edilizio, le chiusure sono diventate sempre più efficienti e meno permeabili, riducendo di fatto le dispersioni termiche (sia in inverno sia in estate) ma anche il ricambio d'aria naturale, indispensabile per mantenere un sufficiente grado di salubrità dell'ambiente. In conseguenza a questa evoluzione, l'utilizzo di energia per il riscaldamento (e anche per il raffrescamento laddove era presente) si è ridotto drasticamente, ma dall'altro lato è progressivamente aumentato il bisogno di ricorrere all'energia elettrica per la ventilazione artificiale (De Franceschi, 2011).

Si può quindi affermare che il consumo energetico negli edifici sta acquisendo sempre maggior peso in funzione di molteplici fattori concomitanti, quali:

- l'aumento del costo dell'energia ottenuto tramite fonti non rinnovabili;
- la massiccia crescita demografica mondiale;
- il crescente livello di comfort richiesto dagli utenti;
- l'aumento dell'utilizzo di apparecchiature elettroniche;
- la mancanza di politiche energetiche adeguate.

Esaminando la situazione un po'più nel dettaglio, ci si rende conto che i consumi finali all'interno delle abitazioni sono ampiamente vari, in conseguenza alla varietà delle abitudini di ciascun utente; ci sono famiglie più numerose di altre, con dei figli e con qualche dotazione in più come notebook ed altri apparecchi elettronici ricaricabili; ci sono situazioni in cui la propria condizione di benessere economico consente di lasciar passare qualche spreco in più o semplicemente permette maggiori condizioni di comfort rispetto a chi magari fa più fatica (ad esempio mantenere temperature interne più "generose" a discapito del consumo). Per questo motivo non è facile proporre dei dati globali rappresentativi di tutte le varie realtà, ciò nonostante è importante avere almeno un'idea di massima per capire quali siano le proporzioni approssimate della distribuzione dei consumi. La Fig. 3, relativa al 2015, mostra come il ruolo dominante era rivestito dal riscaldamento dell'ambiente, seguito a ruota dall'energia per usi elettrici. Rispetto ad oggi sicuramente la situazione è cambiata, in base alle ragioni di sviluppo e ammodernamento citate in precedenza, ma la ripartizione della "torta" energetica raffigurata rimane corretta. Considerando che l'energia elettrica compare anche per un 3% circa nella fetta relativa all'acqua calda sanitaria e per un 1% complessivo tra riscaldamento e usi cucina, ecco che gli usi elettrici raggiungono quasi un quinto del totale.

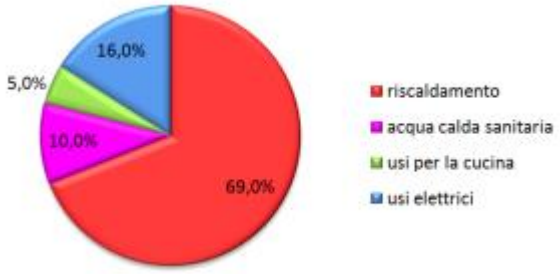


Figura 3- Suddivisione dei consumi energetici per tipologia in ambito residenziale

Gli edifici moderni (ovvero risalenti agli ultimi venti anni), costruiti nel rispetto delle normative energetiche hanno in genere consumi (ci si riferisce all'energia termica finale, non all'energia primaria in questo caso) per il riscaldamento compresi tra gli 80 e i 100 kWh/m^2 per anno, mentre un edificio tipico, mediamente in classe E, ha bisogno di circa 120 kWh/m^2 per anno, i casi più gravi poi, caratterizzati da un pessimo involucro di tipo principalmente massivo e da un impianto estremamente energivoro e inefficiente, toccano i valori di oltre 300 kWh/m^2 per anno. Se consideriamo che nel 2006, per il riscaldamento dell'ambiente interno una famiglia media consumava in media circa 2000 m^3 di gas metano in un anno, per un costo di circa 1200 € (su una bolletta media di circa 2800 €), ci rendiamo conto che, a fronte dello stato di fatto attuale i margini di miglioramento sono molto ampi. Ad oggi la situazione non è variata di molto, ma almeno le politiche energetiche si stanno muovendo velocemente verso una regolamentazione più rigorosa che comprende da un lato nuove norme relative agli involucri, dall'altro disposizioni in merito alla progettazione di impianti sempre più efficienti. Mentre nel primo caso si tratta a grandi linee di cambiare tipo di materiali, poiché l'involucro è un componente passivo dell'edificio (fatta eccezione per particolari tecnologie altamente innovative), l'impianto nelle sue funzioni partecipa attivamente ai consumi energetici e quindi necessita anche di un uso razionale (De Franceschi, 2011).

1.1.2 L'evoluzione degli impianti termici

La struttura fisica di un edificio, come evidenziato nel paragrafo precedente, concorre in maniera obbiettiva a definirne il fabbisogno termico di Riscaldamento, che può essere considerata come un dato di input per il modello matematico sviluppato in questo lavoro di tesi. Le soluzioni tecnologiche per soddisfare tale richiesta possono essere molteplici.

Ovviamente, a seconda della tipologia impiantistica utilizzata varia l'ammontare delle perdite associate al processo di trasformazione nonché le prestazioni dello stesso. Dal punto di vista storico i primi impianti di riscaldamento residenziale, risalenti al primo dopoguerra, erano costituiti essenzialmente da una caldaia a basamento, radiatori in ghisa e un vaso di espansione aperto. Le tubazioni, ben dimensionate, e con diametri più generosi rispetto agli odierni, erano posate in pendenza, in modo da garantire la circolazione naturale dell'acqua. Solo successivamente si sono installati i cosiddetti "acceleratori", che erano in sostanza dei circolatori che garantivano il movimento dell'acqua con velocità molto ridotta, minore al metro al secondo. E così, si avevano vasi di espansione aperti collocati nelle soffitte, in posizione alta rispetto al resto dell'impianto, in modo da dare la dovuta pressione allo stesso. Se l'immobile aveva uno scantinato in cui era collocata la caldaia, le tubazioni di mandata e ritorno correvano a soffitto dello stesso, per poi alimentare i radiatori al piano superiore; in caso contrario, le tubazioni di mandata erano posizionate in alto e quelle di ritorno in basso. I generatori di calore erano a carbone, a nafta e a gasolio. Come si può notare questi tipi di impianti sono poco efficienti sia dal punto di vista energetico, in quanto non presentano alcun tipo di isolamento e i valori di perdite sono molto elevati, sia dal punto di vista ambientale, in quanto si bruciano combustibili fossili ad alto contenuto di zolfo e ceneri, che sono altamente inquinanti (Carbone pulito zero emissioni, s.d.). In questo periodo storico la produzione di acqua calda sanitaria (da adesso abbreviato con ACS, N. d. A), era praticamente nulla anche a causa della scarsa copertura elettrica del paese. Si ha un'evoluzione della concezione e dell'utilizzo del calore a partire dagli anni '60 circa, in cui vengono commercializzate le prime caldaie a gas a camera aperta cosi come i primi boiler elettrici e scalda-acqua a combustibile solido o liquido. I rendimenti di questi apparecchi sono ancora molto lontani da quelli attuali, in quanto rappresentano il primo tentativo di allargare alla massa i confort che fino a quel periodo sono stati destinati ad una fetta ristretta della popolazione. Solo negli anni '80 circa vengono commercializzati i primi generatori di calore a camera chiusa, che presentano dei rendimenti più accettabili rispetto a quelli a camera aperta. Per quanto riguarda la generazione di ACS si continua a prediligere soluzioni individuali caratterizzate da boiler elettrici o scalda-acqua a combustibile solido, in quanto le alternative sul mercato sono poco diffuse e quindi costose e il costo dell'energia elettrica è molto basso. Le alternative ai sistemi classici appena elencati nascono agli inizi degli anni '90 a seguito di

un crescente interesse verso le tematiche energetiche e ambientali. Si diffonde velocemente, grazie all'influenza politica, la concezione del sistema termico centralizzato rispetto a quello autonomi, in cui si produce sia acqua calda tecnica per i sistemi di riscaldamento sia ACS. Questi sistemi sono alimentati principalmente da gas naturale anche se resistono dei sistemi a gasolio e più raramente a combustibile solido, concentrati principalmente nelle zone montane. Parallelamente, principalmente tra la fine degli anni '90 e il 2004, si ha un notevole sviluppo delle tecnologie solari per la produzione di elettricità e ACS, soprattutto affiancate alle tecnologie a pompa di calore (Simion, 2013).

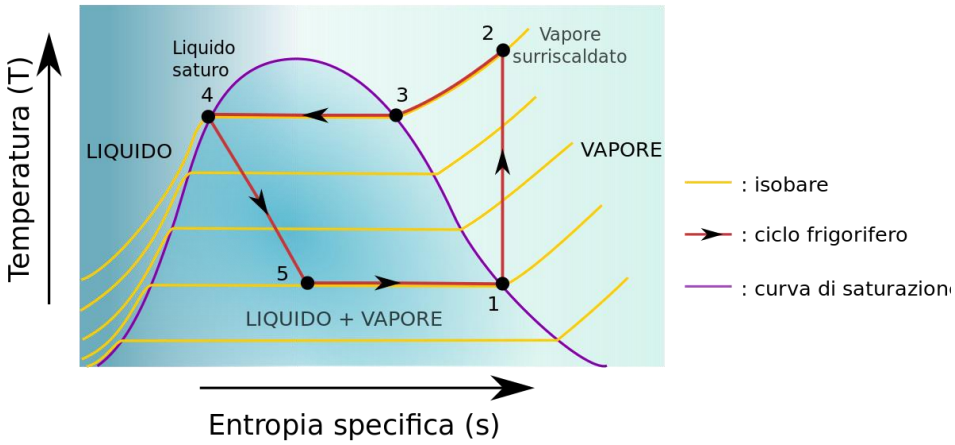
1.1.3 Gli impianti termici a pompa di calore – la tecnologia

Con il D.Lgs. 28/11 si ha un incremento notevole allo sviluppo di impianti a pompa di calore in quanto risultano gli impianti più semplici da realizzare i cui valori della quota rinnovabile sono facili da determinare secondo il metodo di calcolo previsto nel decreto. La pompa di calore è una macchina in grado di trasferire energia termica da una sorgente a temperatura più bassa a una sorgente a temperatura più alta, utilizzando differenti forme di energia, generalmente meccanica. Dal punto di vista termo-fluidodinamico sono quindi delle macchine che lavorano a ciclo inverso (denominate anche macchine frigorifere).

Pompe di calore: macchine frigorifere a compressione di vapore

La tecnologia che ha trovato maggiore diffusione sul mercato è sicuramente quella delle macchine a compressione di vapore, per una maggiore semplicità costruttiva e quindi dei costi più bassi. Il funzionamento della macchina può essere schematizzato: il compressore crea la differenza di pressione che permette al ciclo di funzionare: esso aspira il fluido refrigerante attraverso l'evaporatore, dove il fluido stesso evapora a bassa pressione assorbendo calore, lo comprime e lo spinge all'interno del condensatore dove il fluido condensa ad alta pressione rilasciando il calore assorbito. Dopo il condensatore, il fluido attraversa la valvola di laminazione che lo porta in condizione liquido/vapore (riduce la pressione del fluido), successivamente rientra nell'evaporatore ricominciando il ciclo. Il fluido refrigerante cambia di stato all'interno dei due scambiatori: passa nell'evaporatore da liquido a gassoso, nel condensatore da gassoso a liquido. Nel caso di pompe di calore a recupero, il calore di desurriscaldamento, in Fig. 4 il tratto indicato con 2-3, viene utilizzato per la produzione di ACS, che generalmente avviene a temperature più alte, mentre il calore di condensazione, tratto 3-4 viene utilizzato per la produzione di acqua tecnica per

il riscaldamento, essendo ad una temperatura più bassa. Generalmente queste macchine presentano due scambiatori separati con circuiti frigoriferi separati, in modo che attraverso una valvola è possibile bypassare uno scambiatore o l'altro in base alle esigenze di carico termico ma nel caso in esame si tratta di un sistema più semplice, composto da un condensatore posto in serie al desurriscaldatore, in cui giunge il fluido frigorifero a temperature superiori ai 100 °C e pressione di circa 20 bar per poi essere raffreddato fino alla temperature di condensazione che per l'R410a sono di circa 60 °C per la produzione di acqua tecnica ad alta temperatura.



1 - 2: Compressione del vapore
2 - 3: Raffreddamento del vapore surriscaldato nel condensatore
3 - 4: Condensazione del vapore
4 - 5: Raffreddamento del liquido
5 - 1: La miscela liquido+gas è completamente vaporizzata nell'evapora

Figura 4 - Diagramma termodinamico del fluido R134a

Storicamente l'idea che ha portato al perfezionamento del concetto di pompa di calore è stata quella di un inventore americano, Robert C. Webber, di voler trasferire il calore prodotto dal suo refrigeratore sperimentale all'interno di un ambiente, per riscaldarlo. Oggi le tipologie di modelli presenti sul mercato rappresentano una tecnologia consolidata nel settore e permettono di ottenere risparmi energetici significativi, sia esse sfruttino come sorgente termica l'aria, l'acqua o l'energia termica del terreno.

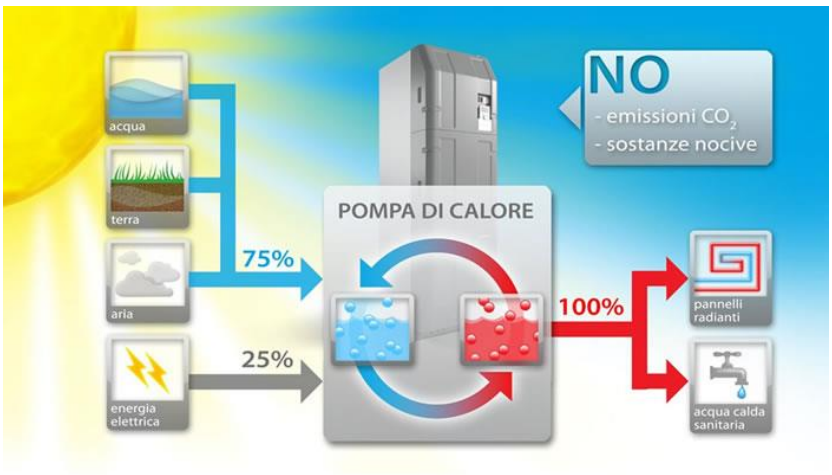


Figura 5 - Schema esemplificativo di una pompa di calore

Una delle tecnologie più diffuse, grazie ai contenuti costi di installazione, è quella della pompa di calore ad aria. Come suggerisce il nome, uno scambiatore della macchina si interfaccia con l'aria, che può essere sia aria esterna che aria condotta attraverso un circuito forzato. Dal lato dell'utilizzatore, a seconda dei terminali di distribuzione (pannelli radianti o circuito aeraulico), possiamo avere sia acqua che aria. Durante il funzionamento estivo, ovvero quando la macchina deve refrigerare un ambiente, il calore prelevato dall'ambiente viene ceduto all'aria esterna, viceversa, durante il funzionamento invernale, la macchina preleva il calore da cedere all'ambiente da riscaldare dall'aria esterna. In Italia circa l'85% degli impianti venduti sono di questa tipologia (Legambiente, 2017) grazie al fatto che buona parte della penisola gode di un clima mite dovuto agli influssi del Mediterraneo. Come si può evincere, uno dei limiti di questa tecnologia è che l'efficienza di funzionamento risente molto della temperatura dell'aria esterna. A parte soluzioni più complesse in cui l'aria esterna viene preriscaldata con sistemi di recupero termico, nella maggior parte delle realizzazioni in cui questo recupero non è previsto, è sconsigliato installare questa tecnologia in ambienti in cui per lunghi periodi dell'anno la temperatura dell'aria esterna scende sotto i 7 °C. Questo limite termodinamico viene superato con l'utilizzo di pompe di calore geotermiche o attraverso la scelta di alcuni produttori che utilizzano tecnologie adatte a lavorare anche alle bassissime temperature.

Le prime si possono classificare in due tipologie principali: quelle che sfruttano come sorgente/pozzo l'acqua di falda e quelle che sfruttano come sorgente/pozzo il terreno. Sia la temperatura del terreno che la temperatura dell'acqua di falda subiscono meno

variazioni durante la stagione garantendo un funzionamento della macchina pressoché prossimo alle condizioni di ottimo durante tutto l'anno. Un altro vantaggio di questa tecnologia rispetto alle pompe di calore con sorgente esterna aria, è che quelle geotermiche possono funzionare in raffreddamento anche in modalità passiva: esse estraggono calore dall'edificio pompando nel sistema l'acqua fredda o il liquido antigelo, senza l'azione della pompa di calore vera e propria. Nel linguaggio tecnico le pompe di calore ad acqua di falda vengono indicate come a "sistema aperto" mentre quelle che sfruttano l'energia del terreno vengono identificate come a "sistema chiuso". Nel sistema aperto, lo scambio termico avviene direttamente con l'acqua di falda. L'acqua prelevata può essere reimmessa in un corpo idrico superficiale, oppure nello stesso acquifero da cui è stata estratta, tramite trincee drenanti o pozzi. I due pozzi (prelievo e reimmissione) devono essere installati a una distanza sufficiente, in modo da evitare la cortocircuitazione termica, che si verifica quando l'acqua termicamente alterata dal pozzo di reimmissione raggiunge il pozzo di prelievo. Nel sistema chiuso il calore è intercettato dal terreno per mezzo di una tubazione ad U, che prende il nome di sonda, con al suo interno un fluido refrigerante (per le pompe a espansione diretta) o liquido antigelo mantenuto a bassa temperatura e pressurizzato.

Il vantaggio dei sistemi aperti rispetto agli impianti a circuito chiuso, sono:

- maggiore rendimento della pompa di calore: l'acqua prelevata, infatti, non risente dello scambio termico (a differenza del terreno attorno a una sonda, nel quale si forma un gradiente termico), a meno che avvenga la cortocircuitazione termica;
- soprattutto per gli impianti di grande potenza, minore costo di installazione e minori spazi occupati, rispetto agli impianti a sonde geotermiche.

Lo svantaggio principale delle due tecnologie geotermiche rispetto ai più semplici impianti ad aria è rappresentato dai maggiori costi di progetto e di installazione. Infatti prima di poter realizzare un impianto del genere è necessario condurre un'analisi stratigrafica del terreno. Uno dei limiti più stringenti è rappresentato appunto dall'elevata salinità del terreno (o delle acque), che può portare a fenomeni corrosivi accelerati che accorciano notevolmente la vita utile dell'impianto.

Oltre ai limiti posti dal costo non trascurabile per la realizzazione di un impianto sia ad anello aperto sia ad anello chiuso, un ulteriore limite a questa tecnologia è posto dal fatto

che esistono zone in cui non sono presenti falde acquifere o dove non è possibile poter scavare per inserire delle sonde geotermiche. In questi casi, per superare il limite sulla temperatura esterna, si adottano, come detto prima, delle soluzioni adatte a lavorare con i climi rigidi. Sul mercato sono presenti diverse tecnologie in merito che sfruttano ad esempio particolari fluidi frigorigeni adatti a lavorare fino a temperature di -20 °C oppure che presentano più stadi di compressione in modo da usare anche le esigue quantità di calore disponibili. Un ulteriore soluzione è quella di utilizzare dei metodi di compressione innovativi come il "Flash Injection" di Mitsubishi (Mitsubishielectric, s.d.). Il circuito 'Falsh Injection' comprende un compressore con circuito bypass e ad interscambio termico che viene utilizzato per trasformare il refrigerante reindirizzato dallo stato liquido allo stato gassoso e ridurre il carico del compressore. Durante il funzionamento a temperature esterne rigide, il circuito impedisce diminuzioni drastiche della portata in circolo causate da cali di pressione del refrigerante, che ritorna al compressore ed evita contemporaneamente il surriscaldamento del refrigerante rilasciato dal compressore a causa di un'elevata compressione (Termoidrogas2000, s.d.).

Pompe di calore: macchine frigorifere ad assorbimento

Un'altra tecnologia abbastanza consolidata nel campo delle pompe di calore è quella delle macchine ad assorbimento. Una delle differenze principali tra le due tecnologie è che le macchine ad assorbimento sfrutta il calore di dissoluzione di un soluto in un solvente che viene ciclicamente concentrato e diluito. Il funzionamento della macchina può essere così riassunto:

• La **fonte energetica primaria** (solitamente un bruciatore o del calore di recupero) è utilizzata per aumentare la temperatura della soluzione fluido frigorifero-acqua. Questo innalzamento di temperatura crea la separazione dei due componenti per evaporazione del refrigerante lungo la colonna di distillazione. Questi primi componenti della pompa di calore hanno la funzione del compressore nelle unità elettriche;

• Dopo la **separazione**, il fluido frigorifero in forma di vapore passa attraverso il rettificatore dove si separa ulteriormente dall'eventuale residuo d'acqua per poi entrare nello scambiatore di calore (solitamente a fascio tubiero) **(5)**: il fascio tubiero è l'equivalente del condensatore delle pompe di calore elettriche;

• In questo **scambiatore a fascio tubiero** avviene la condensazione e quindi la cessione di calore dal refrigerante, in forma di vapore, al fluido termovettore del circuito delle utenze;

• Il refrigerante dopo essere uscito dal **condensatore**, passa attraverso una serie di laminazioni successive, dove diminuisce progressivamente di pressione e dove si ha un abbassamento della temperatura. La temperatura di "arrivo" sarà quella che permetterà al fluido di scambiare calore (in questo caso di assorbire) dall'aria;

• In questa fase il **refrigerante**, prelevando calore dall'aria esterna, evapora. In sostanza raffredda l'aria sottraendo calore. Passando nello scambiatore **(7)** e successivamente nel pre-assorbitore **(9)**, il refrigerante si surriscalda e, unendosi con l'acqua (nel preassorbitore), dà luogo alla fase di assorbimento. Questa trasformazione è fortemente esotermica, ossia per funzionare deve essere tolta energia;

• Nel **pre-assorbitore** questa energia viene utilizzata per pre-riscaldare la soluzione acqua-refrigerante. Per completare la reazione d'assorbimento, la soluzione viene inviata nuovamente allo scambiatore di calore a fascio tubiero **(5)**. In questa fase del ciclo, lo scambiatore funge da assorbitore e consente di cedere all'acqua dell'impianto termico una sensibile quantità d'energia termica;

• La **soluzione acqua refrigerante** che esce dallo scambiatore **(5)** è inviata dalla pompa **(10)** nuovamente al generatore, passando nuovamente per il pre-assorbitore **(9)** e il rettificatore **(3)** dove si pre-riscalda recuperando calore dal ciclo stesso. Da qui il ciclo frigorifero si ripete (Bettio, 2012).

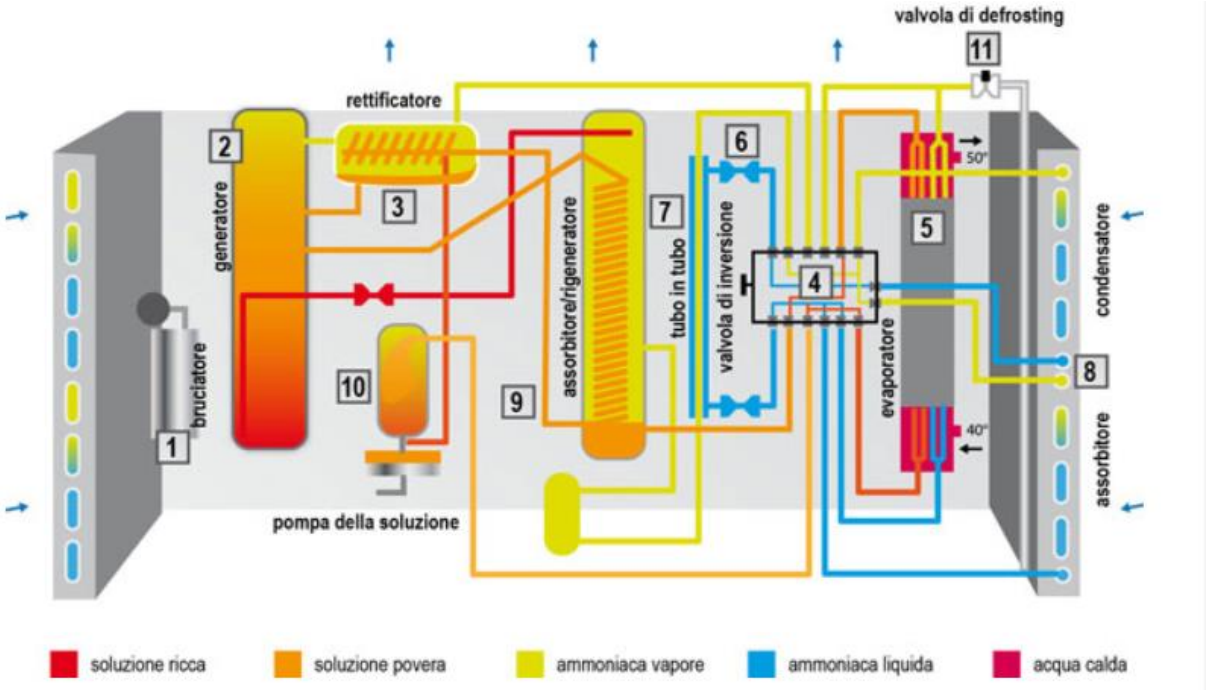


Figura 6 - Schema di una pompa di calore ad assorbimento (Bettio,2012)

I vantaggi di questa tipologia rispetto a quella descritta in precedenza sono che può essere considerata come una macchina statica in cui non sono presenti organi rotanti, richiede quindi meno manutenzione e può essere usata anche con terminali di distribuzione che funzionano ad alte temperature come i termosifoni. Di contro hanno dei COP più bassi delle altre in funzionamento estivo, ovvero in fase di raffrescamento.

1.1.4 La generazione di acqua calda sanitaria (ACS) con pompa di calore

Uno degli aspetti che ricopre spesso un ruolo nevralgico nella progettazione degli impianti termici è la produzione di acqua tecnica per l'ACS (AICARR). Il progettista deve tener conto dei limiti di legge previsti per le temperature dell'acqua tecnica destinata alla produzione di ACS per evitare la produzione e la proliferazione della Legionella. La Legionella è un batterio che può presentarsi in forma dormiente, ovvero inattivo, nell'acqua al di sotto dei 20 °C mentre prolifera velocemente per temperature comprese tra i 20 °C e i 50 °C. Gli effetti sull'uomo possono essere molteplici principalmente forte febbre e dolori associati a infiammazioni ma può sfociare anche in forme più gravi come polmonite o malfunzionamenti renali (Legionellaonline.it, s.d.). L'unica forma di contagio di questo batterio è per assunzione diretta attraverso l'inalazione. Dev'essere compito del progettista dunque evitare un contagio per le utenze servite facendo lavorare l'impianto

per la produzione di ACS a temperature maggiori di 50 °C. Da recenti studi si è evidenziato come il batterio muore tanto più velocemente quanto maggiore è la temperatura rispetto ai 50 °C (a 55 °C il batterio muore in circa 6 ore mentre a 65°C si impiegano circa 5 minuti). Negli impianti termici tradizionali con caldaia e radiatori, che funzionano generalmente con una mandata compresa tra i 65 °C e gli 80 °C, la produzione dell'ACS viene fatta in un'unica soluzione in quanto con quei valori di mandata la temperatura dell'acqua all'interno della rete di distribuzione non scende mai al di sotto dei 55 °C (grazie alla presenza di linee di ricircolo e ad un corretto isolamento della tubazione) permettendo di rispettare pienamente i limiti di temperatura imposti per la non proliferazione del batterio (UNI, 2014). Per mantenere il comfort degli utenti, visto le elevate temperature in gioco, sono previsti dei dispositivi di miscelazione in corrispondenza dei terminali di distribuzione (UNI, 2014).

Con la presenza sempre più diffusa di impianti a pompa di calore che, in generale presentano dei limiti tecnici sulla temperatura di mandata non superiore a 55°C, è nata, nei progettisti prima e nei produttori poi, l'esigenza di mantenere anche in questo caso la produzione dell'ACS in un'unica soluzione. Le configurazioni più diffuse in questo ambito sono rappresentate dalle pompe di calore reversibili a recupero di calore o dalle pompe di calore "polivalenti". Le prime, come suggerisce il nome, sono macchine in grado di cambiare l'effetto utile a seconda del fabbisogno richiesto. In altri termini, durante la stagione invernale sono in grado di fornire acqua tecnica calda per il riscaldamento degli ambienti e la produzione di acqua calda sanitaria, durante la stagione estiva sono in grado di fornire acqua refrigerata per il raffrescamento e acqua tecnica per la produzione di ACS. Il recupero di calore in questa fase viene fatto sull'energia termica prelevata dall'ambiente da raffrescare che, invece di essere dispersa nel pozzo freddo, viene recuperata (parzialmente o totalmente) per la produzione di ACS. Si è soliti dire in termini tecnici che la macchina sta funzionando in modalità passiva sull'ACS. Se la richiesta di raffrescamento è nulla in questa fase la macchina funzionerà come pompa di calore sull'ACS senza operare alcun recupero. In Fig. 7 è possibile osservare il confronto della quota percentuale di energia risparmiata utilizzando una macchina a recupero rispetto alla soluzione separata con integrazione esterna.

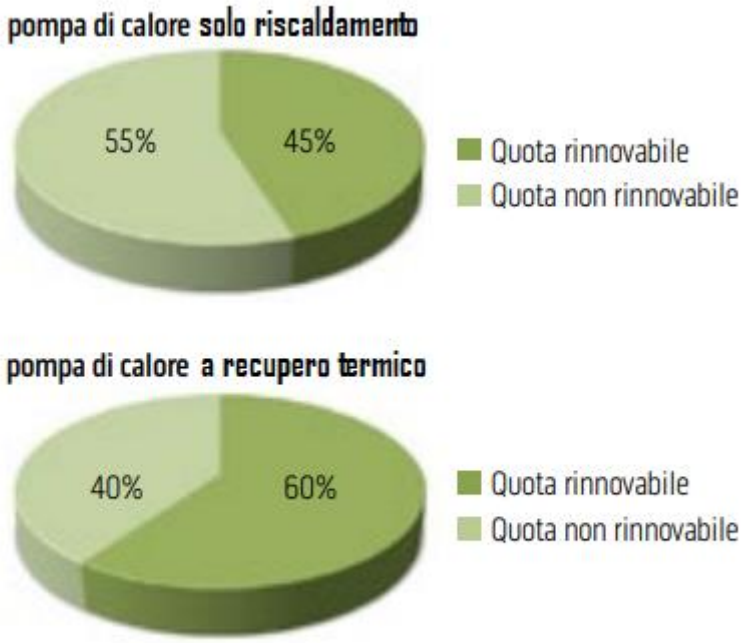


Figura 7 - Confronto tra soluzione unica e soluzione separata per la produzione di ACS (Olimpia Splendid Group)

Le seconde, dette appunto macchine polivalenti, permettono di superare la relazione diretta tra energia recuperata per la produzione di ACS e potenza di funzionamento della macchina. In particolare la potenza disponibile sulla parte di circuito destinata all'ACS è, durante il funzionamento estivo e in modalità recupero, proporzionale alla potenza disponibile sul ramo del circuito destinato al Raffrescamento.

Esistono due tipi di configurazioni per le macchine polivalenti, la configurazione a 2 tubi e la configurazione 4 tubi. Nella prima configurazione la macchina può funzionare o in riscaldamento o in raffrescamento e contemporaneamente in produzione di ACS in ogni stagione, fornendo una potenza nei due rami che è indipendente l'una dall'altra.

1.1.5 Le prestazioni delle pompe di calore

Quando si confrontano le prestazioni di pompe di calore, si evita l'utilizzo del termine "rendimento", poiché per definizione esso non può mai essere maggiore di 1. È preferibile l'utilizzo del termine "resa", che è espressa dal coefficiente di prestazione, "COP", rapporto tra energia resa (calore fornito alla sorgente di interesse) ed energia elettrica consumata, usualmente indicato in fisica tecnica come coefficiente di effetto utile. Ragionando in

termini ideali, ovvero considerando una macchina termica di Carnot che funziona con ciclo inverso, un valore del COP pari a 3 indica che per ogni kWh di energia elettrica consumata, la pompa di calore genera 3 kWh di energia termica. In funzione dell'effetto utile che interessa, è possibile definire un COP di raffreddamento (Equazione 1) e uno di riscaldamento (Equazione 2):

$$COP_{frigorifero} = EER = \frac{\Delta Q_{evaporatore}}{\Delta A} \leq \frac{T_{bassa}}{T_{alta} - T_{bassa}} \quad (1)$$

$$COP_{termico} = \frac{\Delta Q_{condensatore}}{\Delta A} \leq \frac{T_{alta}}{T_{alta} - T_{bassa}} \quad (2)$$

dove

- $Q_{evaporatore}$ è la quantità di calore estratta da un serbatoio “freddo” a temperatura minore;
- T_{bassa} è la temperatura assoluta del serbatoio a più bassa temperatura;
- $Q_{condensatore}$ è la quantità di calore distribuita a un serbatoio ad alta temperatura;
- T_{alta} è la temperatura assoluta del serbatoio “caldo”.

Una classica stufetta elettrica ha un COP teorico pari a 1. In altre parole 1 kWh di energia elettrica dato alla stufetta dà calore pari a 1 kWh, mentre dato a una pompa di calore muove più di 1 kWh di energia termica da un luogo freddo a uno caldo.

Per le pompe di calore che sfruttano l'aria il COP è limitato quando operano in climi molto freddi, dove c'è meno calore da trasferire all'interno di un edificio. Tipicamente il COP crolla drasticamente quando la temperatura dell'aria esterna scende sotto a −5 °C/−10 °C. +Le pompe di calore geotermiche funzionanti con acqua sotterranea o a sistema aperto hanno un COP variabile da 3,6 a 5,2 e un EER tra 3,4 e 5,0; quelle con circuito chiuso hanno un COP tra 3,1 e 4,9, mentre EER tra 2,9 e 4,5.Il COP di una pompa di calore che sfrutta il sottosuolo (acqua o geotermico) è maggiore di quello della pompa che sfrutta l'aria, poiché il terreno presenta una temperatura abbastanza costante durante tutto l'anno; in

compenso la sua installazione è più difficoltosa e costosa (Pompe di calore - prestazioni, s.d.).

1.1.6 Gli impianti termici: esempi di realizzazioni di impianti a pompa di calore

Negli ultimi anni, la soluzione impiantistica a pompa di calore ha trovato larga diffusione in diversi contesti, dall'ambito residenziale all'ambito industriale o terziario come cinema, ospedali, palestre ecc. Questo è stato possibile grazie allo sviluppo di nuove tecnologie chimiche nella produzione di fluidi frigoriferi sempre più performanti e sempre meno ad impatto ambientale. Non solo, oggi esistono macchine sempre più versatili e "intelligenti" che, grazie ad un'affinata programmazione software, possono adattarsi alle più disparate condizioni di lavoro. Per quanto riguarda il primo aspetto, proprio nel 2015 è stata condotta un importante ricerca sulle "proprietà energetiche" di alcuni refrigeranti a basso impatto ambientale, definiti "low GWP", ovvero che contribuiscono in maniera quasi trascurabile al riscaldamento globale. La ricerca dimostra come l'utilizzo di nuovi refrigeranti a minore viscosità e minore densità sia indicata rispetto ai refrigeranti classici, comportando un ulteriore aumento delle prestazioni. I risultati sono mostrati in Fig.8.

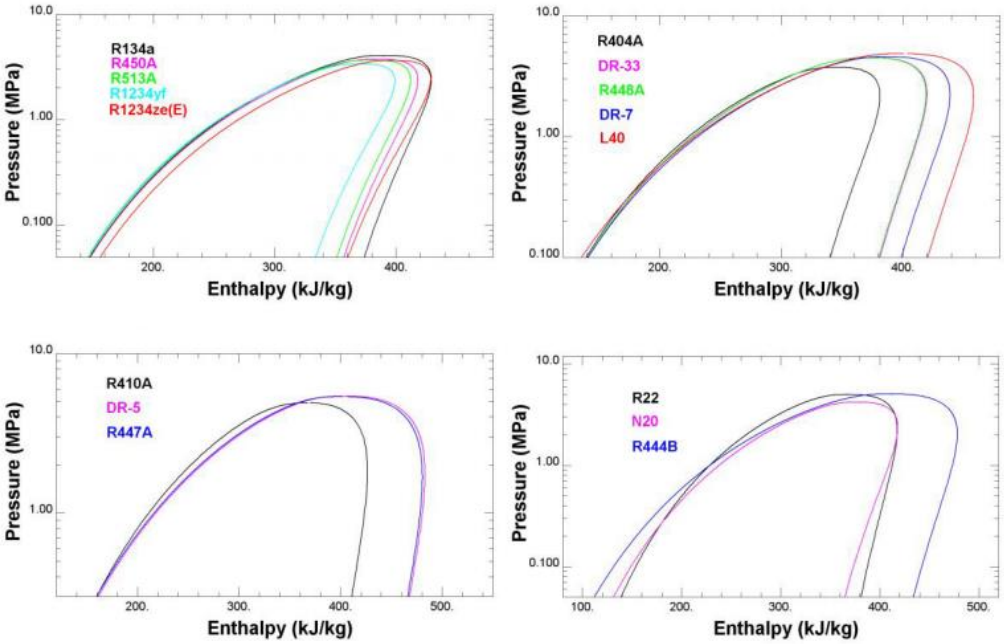


Figura 8 - Confronto delle prestazioni dei refrigeranti low GWP rispetto a quelli tradizionali sul diagramma p-h

La ricerca dimostra però anche come non sia possibile generalizzare questi risultati in quanto facendo aumentare la temperatura del fluido, la densità tende a diminuire e nei

“low GWP” questa tendenza è accentuata rispetto ai refrigeranti tradizionali. Si rischia quindi di scendere sotto un valore limite di densità al di sotto del quale l’impianto non sarebbe più in grado di smaltire il calore per il quale è progettato, come mostrato in Fig.9.

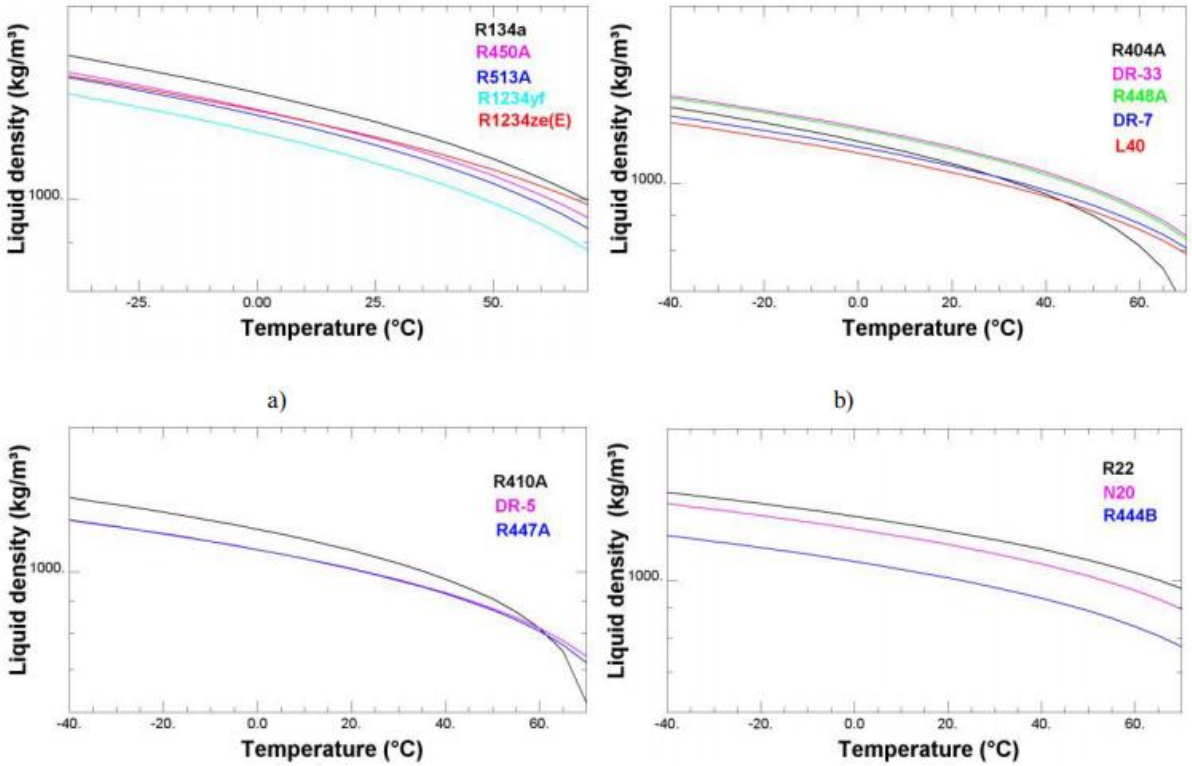


Figura 9 - Variazione della densità nei refrigeranti low GWP rispetto ai tradizionali

Entro i limiti esposti sopra, un utilizzo corretto di questi refrigeranti comporterebbe un ulteriore aumento delle prestazioni di circa il 10% ed essendo a minor densità, una minor necessità di fare refill del gas nel circuito (minor densità, minor portata circolante, minori perdite per trafilazione e fughe) (Devecioğlua & Oruça, 2015).

Per quanto riguarda il secondo aspetto diventa sempre più diffusa la combinazione di sistemi a pompa di calore con sistemi solari termici e/o fotovoltaici. Questi impianti presentano delle prestazioni circa il 50% maggiori rispetto agli stessi senza integrazione. Questi risultati sono imprescindibili da una corretta regolazione, che comporta una complessità maggiore rispetto agli impianti tradizionali. Uno dei sistemi innovativi consiste in pannelli solari polivalenti in grado sia di produrre energia elettrica sia di produrre fluido termovettore per usi termici. Uno schema dell’impianto è riportato in Fig.10.

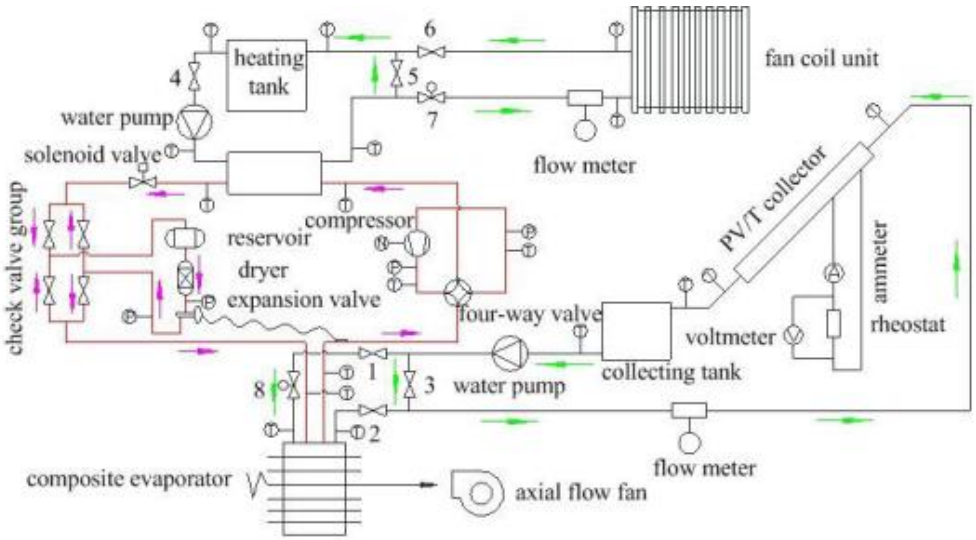


Figura 10 - Schema d'impianto di un sistema di generazione a pompa di calore con solare termico e fotovoltaico

In questo modo, durante il giorno in cui l'irraggiamento è massimo, conviene utilizzare il solare termico e come integrazione la pompa di calore (alimentata dalla parte di pannello adibita alla produzione elettrica) e durante la sera, in cui la produzione da solare è nulla, utilizzare interamente la pompa di calore visto che il costo dell'energia è più basso. (Wanga, Zhao, Quana, & Tonga, 2017).

Un'altra configurazione molto diffusa, soprattutto nei paesi del nord Europa, è quella della pompa di calore geotermica. Il limite tecnico di questi impianti è che le prestazioni, soprattutto per impianti di grossa potenza nominale, dipendono in maniera stringente dalla temperatura dell'acqua di falda, che stagionalmente può subire anche variazioni notevoli. Uno studio condotto in un district heating di Copenaghen ha portato all'utilizzo di una seconda pompa di calore in serie con la prima per ovviare a questo problema. Quando la temperatura dell'acqua di falda è troppo bassa per fornire la potenza nominale all'utilizzatore con un solo ciclo, si invia il refrigerante alla seconda pompa di calore in serie, diventando, la prima, una sorgente. La seconda pompa di calore, che funziona con un refrigerante adatto a temperature più basse, riesce a fornire la potenza termica nominale all'utilizzatore grazie al calore fornitole dalla prima. Lo studio mostra inoltre come le efficienze globali del sistema si mantengono elevate per grossi range di temperatura in questa doppia configurazione (Jensen, Ommen, B.Markussen, & Elmegaard, 2016). In Fig.11 è possibile osservare uno schema d'impianto di questa configurazione con i livelli termici dei due stadi.

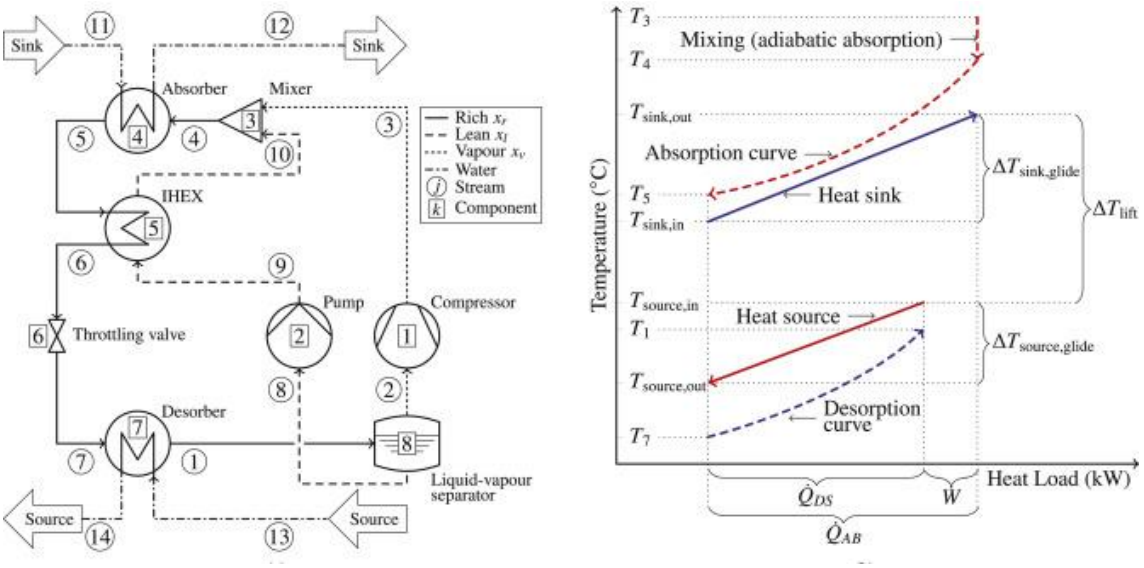


Figura 11 - Schema d'impianto di una pompa di calore geotermica su due stadi

In ambito terziario meritano sicuramente nota le così dette macchine “polivalenti”, che coprono ormai una buona quota dell’offerta commerciale di molti venditori del settore. Si tratta di pompe di calore in grado di fare sia Riscaldamento che ACS. Qui sorge un dubbio. Quali sono le differenze rispetto alle macchine a recupero viste in precedenza? Come suggerisce il nome le macchine polivalenti svolgono una funzione duplice, ricoprendo pienamente quella funzione, come se fosse indipendente dall’altra. Cosi non avviene con le macchine a recupero di calore dove il recupero termico è funzione della potenza di esercizio. In altri termini, in questa configurazione, si riesce a recuperare una frazione (totale o parziale) della potenza impegnata. Un esempio di applicazione di impianto polivalente è una RSA ospedaliera per il ricovero di anziani nella zona in provincia di Milano. L’impianto è caratterizzato da una pompa di calore polivalente a 4 tubi in quanto la macchina deve soddisfare dei carichi termici di segno opposto in contemporanea. Per mantenere le prestazioni elevate la produzione di ACS è integrata con una caldaia a condensazione e da un sistema di accumulo con ricircolo. In termini pratici l’acqua dell’acquedotto viene preriscaldata dall’acqua tecnica della pompa di calore fino ad una temperatura di circa 38 °C. Viene portata a 55° C attraverso l’integrazione dell’acqua a 65 °C proveniente dalla caldaia. La caldaia ha anche funzione di back up in caso di malfunzionamento della pompa di calore, essendo dimensionata per fornite tutto il fabbisogno sia di riscaldamento che di ACS (Bo, 2018).

1.2 Obbiettivo del lavoro di tesi

Il punto di partenza del modello consiste nell'utilizzo dei profili orari del fabbisogno di energia termica delle utenze durante la stagione di riscaldamento (15 Ottobre-15 Aprile), sia di riscaldamento che di ACS. I fabbisogni di raffrescamento non sono stati inseriti in questo modello in quanto non ci sono dati attendibili a disposizione che descrivano in comportamento delle utenze durante la stagione estiva. Il modello è stato sviluppato cercando di ricreare le condizioni di lavoro reali del sistema energetico come temperature di lavoro, regolazioni e ore di attività delle macchine installate. I risultati che possono essere estrapolati dal modello costruito sono principalmente due. I primi sono rappresentati dal consumo di energia elettrica necessaria al soddisfacimento dei due fabbisogni appena citati i secondi rappresentano le performance della pompa di calore sia in termini di COP mensile e medio stagionale sia in termini di profilo orario di funzionamento della macchina a seguito di una ben determinata richiesta. Si confronteranno, inoltre, i valori ottenuti con la configurazione attuale acqua-acqua con quelli ottenuti ipotizzando di utilizzare per gli stessi profili di richiesta una configurazione aria-acqua.

L'applicazione del modello sviluppato non è circoscritto solo all'ambito residenziale. Cambiando il profilo utilizzato come input si possono ottenere i consumi di qualsiasi utenza termica che utilizza una pompa di calore per soddisfare i propri fabbisogni. Non solo. Sostituendo le curve di PLF all'interno del modello si può simulare il comportamento di qualsiasi convertitore energetico, in modo da ottenere infinite configurazioni impiantistiche per soddisfare i fabbisogni inseriti come input.

2. Introduzione al caso studio

2.1 Il complesso residenziale

2.1.1 Descrizione generale

Il caso studio analizzato è rappresentato da un lotto suddiviso in sette condomini, come si può osservare in Fig.12. Dalla stessa figura è possibile osservare come ogni condominio è composto da più edifici i cui fabbisogni sono coperti da sette sottocentrali termiche. In altre parole si indica con il termine condominio non il singolo edificio bensì il numero di edifici serviti da una singola sottocentrale. In Tabella 1 sono riportate le superfici riscaldate e le superfici lorde di ogni condominio, cosi come i volumi e il fattore di forma S/V. Quest'ultimo parametro è un valore medio in quanto dai dati di pianta non si conoscono le superfici e i volumi dei singoli appartamenti bensì i valori per sottocentrale.

Tabella 1: Superficie e volume (netto e lordo) per sottocentrale

Condominio	m^2 lordi	m^2 netti	m^3 lordi	m^3 netti	S/V
A	6533	5554	19599	14996	0.37
B	3562	3028	10686	8176	0.37
C	3686	3134	11058	8461	0.37
D	677	575	2031	1553	0.37
E	3468	2949	10404	7962	0.37
F	4574	3890	13722	10503	0.37
G	3870	3291	11610	8886	0.37

Il polo abitativo è situato nel Nord Italia (zona climatica E). Gli edifici che compongono il complesso residenziale sono composti, com'è possibile osservare in Fig.13, da un blocco centrale di forma parallelepipeda e generalmente sono composti da due o tre piani fuori terra. Il complesso occupa un lotto di circa 25.000 m^2 ma fanno parte del polo abitativo, per una superficie di circa 1300 m^2 anche delle strutture terziarie (negozi, lavanderie, ludoteche ecc.) e sociali con finalità non abitative, posizionate al piano terra degli edifici. L'analisi dei sistemi energetici è stata concentrata solo sul fabbisogno di riscaldamento e di acqua calda sanitaria ACS della parte residenziale.

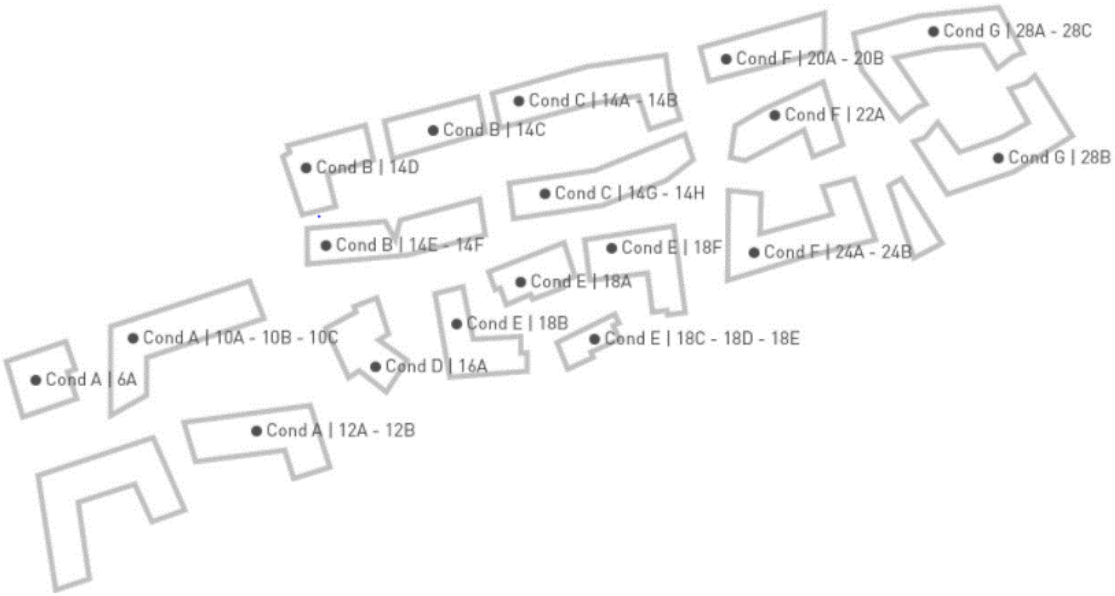


Figura 12 - Vista in piante del complesso residenziale

Il complesso immobiliare è stato progettato e realizzato nell'ottica di ottenere una classe energetica A delle sue abitazioni. Con questo termine si intende identificare tutte le unità abitative di nuova costruzione che presentano non solo ottimizzazioni progettuali dal punto di vista dei materiali edili utilizzati, come ad esempio isolanti ad alta efficienza o serramenti a taglio termico, ma anche ottimizzazioni dal punto di vista di una corretta integrazione fra struttura e impianti tecnologici, con il sapiente utilizzo di dispositivi ad alta efficienza e alimentati da fonti energetiche rinnovabili.

Figura 13 - Foto del complesso residenziale oggetto di studio

2.1.2 Il locale tecnico: la sottocentrale

Dal punto di vista progettuale si è deciso di suddividere il complesso residenziale in sette grossi condomini, ciascuno dei quali è servito dal punto di vista termico ed elettrico da altrettante sottocentrali. I locali delle sottocentrali sono posti un livello sotto il piano strada e all'interno, sono contenute le pompe di calore assieme agli ausiliari di funzionamento, cosi come il sistema di distribuzione orizzontale del fluido termovettore inviato verso le varie colonne verticali (montanti) di adduzione agli edifici e gli ingressi dell'acqua potabile in arrivo dall'acquedotto. Sono contenuti inoltre gli ausiliari elettrici e gli strumenti di sicurezza delle pompe di calore, cosi come gli strumenti del sistema antincendio. Entrando più nel dettaglio, le pompe di calore utilizzate per soddisfare i fabbisogni di riscaldamento, raffrescamento e ACS delle utenze allacciate alle varie sottocentrali sono delle pompe di calore (da ora abbreviato con PdC) "acqua-acqua" a recupero totale. Il primo "acqua" della sigla identifica che la pompa di calore preleva il calore necessario al suo funzionamento dall'acqua. L'acqua non viene prelevata

direttamente dalla falda idrica bensì è portata agli evaporatori delle PdC attraverso un anello di collegamento. Questo anello è composto da una condotta forzata che circonda le sottocentrali e inizia e finisce in corrispondenza di un pozzo alimentato dalla falda idrica posto all'inizio del complesso residenziale. In maniera analoga per il circuito di ritorno, con la differenza che rispetto alla mandata esso non inizia e finisce in un pozzo ma è collegato direttamente con la falda idrica. Vista la caratteristica costruttiva appena descritto l'anello viene detto aperto. Il secondo "acqua" della sigla indica che il fluido termovettore lato utenze è anch'esso acqua, essendo i terminali di distribuzione costituiti da pannelli radianti e radiatori a parete nei servizi igienici. Essendo alcuni lotti di superficie diversa, sono stati scelti modelli di PdC di potenza nominale differente. In Tabella 2 sono riportate nello specifico le unità istallate nelle sette sottocentrali. Sono riportate inoltre le potenze termiche e frigorifere delle macchine per una mandata rispettivamente di 42°C e 17°C da catalogo.

Tabella 2: Suddivisione delle macchine nelle varie sottocentrali

Sottocentrale	Condominio	m^2 serviti	$P_{termica}$ [kW]	$P_{frigorifera}$ [kW]
S7	A	5554	410	452
S4	B	3028	172	188
S3	C	3134	172	188
S6	D	575	80	120
S5	E	2949	172	188
S2	F	3890	310	322
S1	G	3291	260	298

Si procede adesso con un'analisi dettagliata dei sottoinsiemi che compongono il locale tecnico concentrandoci principalmente sull'impianto termico e sui suoi ausiliari. Ci si riferirà ad una sola sottocentrale presa come esempio in quanto tutte le sottocentrali presentano la stessa struttura fisica.

2.1.3 Il sistema di riscaldamento

Per motivi di stabilità fluidodinamica il circuito di adduzione della pompa di calore è disaccoppiato rispetto la rete principale. In particolare il circuito che si interfaccia con la macchina è collegato all'anello di distribuzione principale mediante uno scambiatore di calore a piastre, per motivi di stabilità fluidodinamica. Dall'acqua pompata nello scambiatore viene prelevata l'energia termica necessaria al corretto funzionamento della macchina. Come si può notare dalla Fig.14 gli scambiatori presenti in sottocentrale sono due, uno per una macchina e l'altro per l'altra macchina di riserva. Questo permette di garantire continuità di funzionamento anche nel caso in cui ci sia un malfunzionamento nello scambiatore principale e non sia quindi in grado di garantire il corretto apporto energetico per la macchina principale. Sempre nella stessa figura si può notare come anche le pompe di calore siano due. Il motivo è lo stesso dei due scambiatori (funzione di back-up). Le due macchine sono perfettamente uguali e si condurrà l'analisi di funzionamento come se fosse una sola.

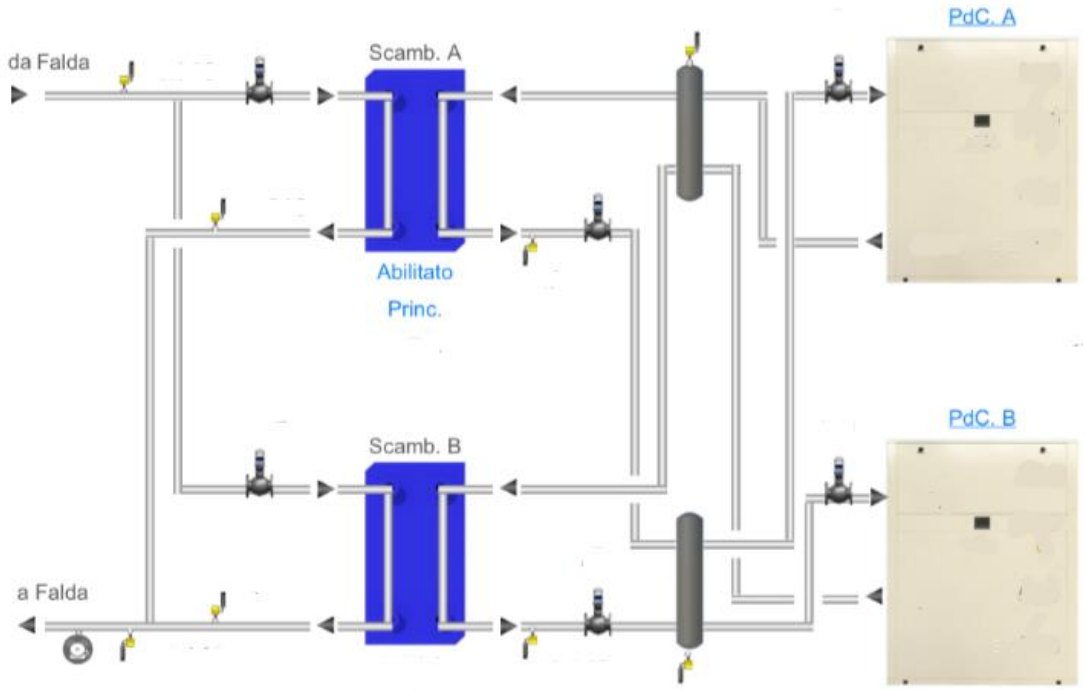


Figura 14 – Schematizzazione degli scambiatori di calore a piastre

Il fluido termovettore per il riscaldamento viene prodotto dalla pompa di calore indicata con "A". L'acqua tecnica esce dalla macchina ad una temperatura di circa 42 °C e successivamente viene inviata ai collettori di distribuzione (rappresentati in grigio in Fig. 15) grazie a dei circolatori elettrici montati a bordo macchina. Questi circolatori sono da

considerare come organi ausiliari della macchina e che quindi andranno ad influire sulle prestazioni e sui consumi del sistema energetico.

Figura 15- Schema dei collettori di mandata

Dal collettore di mandata si dirama la distribuzione verticale, come si può vedere in Fig. 16, che porta il fluido termovettore in arrivo dalla pompa di calore fino ai terminali di riscaldamento di tutte le abitazioni che la sottocentrale deve servire. In questo caso la distribuzione verticale avviene tramite una vera e propria pompa di potenza nominale più alta rispetto ai circolatori montati a bordo macchina. L'incidenza del consumo energetico della pompa sui consumi globali del sistema energetico non è sicuramente trascurabile ma l'obbiettivo della tesi è quello di studiare le prestazioni della pompa di calore al variare delle condizioni al contorno (richiesta dell'utenza, temperatura delle sorgenti, ecc.) per cui verranno trascurati all'interno del modello sviluppato. Sempre in Fig. 11 è possibile osservare che è presente una seconda pompa di circolazione utilizzata in caso di malfunzionamento della prima. Entrambe le pompe, sia quella principale che quella di riserva, sono dotate di un dispositivo inverter, utilizzato nell'ambito dell'efficienza energetica per la regolazione delle macchine rotanti quando il carico dovesse variare rispetto alle condizioni nominali.

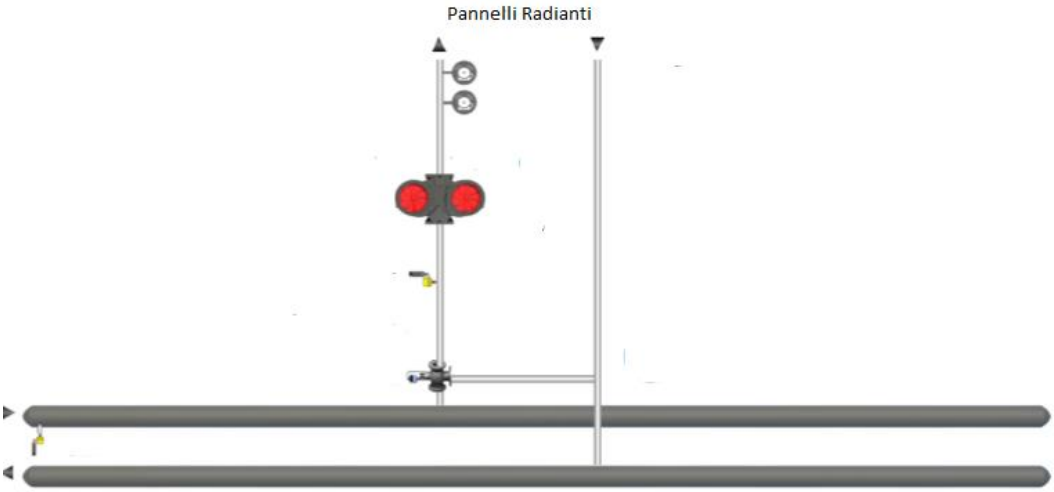


Figura 16 - Distribuzione verticale alle utenze

I terminali di distribuzione all'interno delle abitazioni sono costituiti da pannelli radianti e da termoarredi per i servizi, dotati di resistenza elettrica qualora si voglia una temperatura più elevata. Questi terminali permettono di avere un elevato confort negli ambienti in quanto riducono i gradienti termici (variazione della temperatura nello spazio) tra soffitto e pavimento generando un riscaldamento uniforme all'interno dell'ambiente e permetto di usare risorse a bassa exergia, in quanto la temperatura del fluido primario in inverno e in estate è più bassa rispetto ai sistemi energetici tradizionali, che lavorano a temperature tra i 70 e gli 80 °C.

2.1.4 Il sistema per la produzione di ACS

Il fluido termovettore per ACS viene prodotto dalla stessa pompa di calore per il servizio di riscaldamento attraverso il recupero del calore di de-surriscaldamento. Il set point di mandata verso l'accumulo è fissato a circa 55 °C. Attraverso un circuito indipendente da quello di distribuzione per il riscaldamento, il fluido termovettore viene mandato all'interno di un accumulo termico. Il sistema di accumulo ha principalmente la funzione di stabilizzare il sistema rispetto alla richiesta dell'utenza. In particolare ha la funzione di sopperire i picchi di richiesta delle utenze, in modo da stabilizzare il funzionamento della macchina, attraverso un profilo di richiesta più uniforme. La stessa acqua contenuta

nell'accumulo, una volta raggiunto il set point di temperatura prefissato, funge da fluido termovettore primario per riscaldare l'acqua delle utenze attraverso uno scambiatore di calore. In altri termini questo tipo di accumulo è un sistema chiuso che fornisce fluido primario per uno scambiatore di calore che riscalda l'acqua proveniente dalla centrale idrica fino alla temperatura di 48°C per uso sanitario. Gli scambiatori di calore sono due e indipendenti, per ovviare ad eventuali malfunzionamenti.

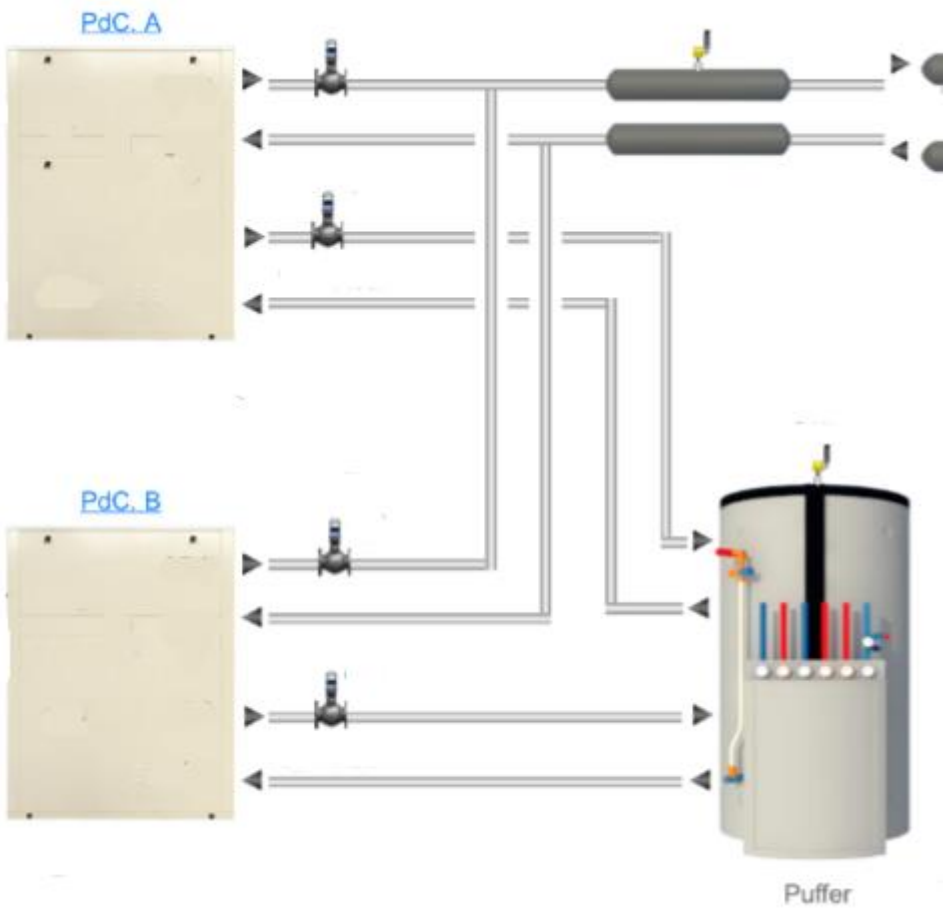


Figura 17 - Sistema di produzione ACS

Il sistema di regolazione è governato da valvole a tre vie ad azionamento elettromeccanico che permettono al sistema di lavorare in modulazione durante tutto l'anno. Tale valvole sono regolate dai valori di temperatura posizionati nel circuito di mandata alle utenze termiche e al sistema di accumulo. Le utenze, come nel caso del circuito di riscaldamento, sono servite attraverso delle pompe elettriche dotate di inverter. Per garantire la continuità di funzionamento sono presenti due pompe, la seconda utilizzata come back-up della prima in caso di guasti o malfunzionamenti.

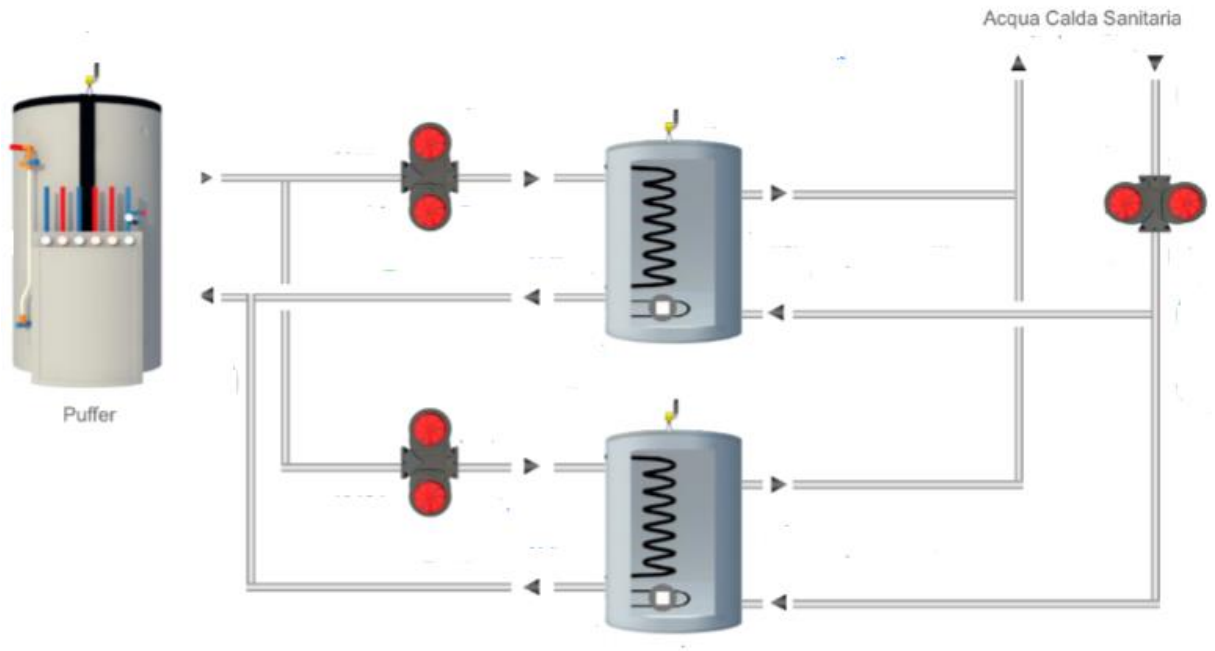


Figura 18 - Sistema di distribuzione dell'ACS

2.2 Analisi dei profili di richiesta dell'utenza

Per ottenere i profili di richiesta delle utenze che verranno utilizzati come input nel modello matematico si è proceduto analizzando i dati forniti dei consumi reali degli appartamenti sia per il riscaldamento che per ACS in una settimana tipo di ogni mese della stagione di riscaldamento. A partire da questi dati si sono creati quindi dei profili giornalieri di richiesta. Per alcune sottocentrali non è stato possibile ricavare questi profili a causa di probabili errori nelle elaborazioni degli strumenti di monitoraggio in remoto. I probabili errori sono o in fase di lettura del dato numerico nel contatore volumetrico (per ACS) o di calore (per riscaldamento) o nella trasmissione al server centrale del dato numerico letto. Questi inconvenienti sono stati superati, come verrà evidenziato nei due paragrafi successivi, facendo la media aritmetica dei profili corretti in modo da ottenere un unico profilo al mese da applicare poi a tutte le sottocentrali, sia per riscaldamento che per ACS.

2.2.1 Riscaldamento

Il profilo della richiesta termica per riscaldamento del caso studio è stato ottenuto a partire dai profili monitorati giornalmente in una settimana tipo di ogni mese della stagione di

riscaldamento (15 Ottobre-15 Aprile). Il monitoraggio dei consumi viene fatto attraverso la lettura in remoto dei contatori di calore presenti nelle varie abitazioni. Osservando i dati forniti si è potuto evidenziare come alcuni dei valori registrati si trovino in orari anomali che potrebbero lasciar intendere un errore commesso dallo strumento di misura. Questo ha portato, per alcune sottocentrali, all'impossibilità di avere un profilo di richiesta termica ben definito in alcuni giorni della settimana di monitoraggio. Si è scelto quindi, per ovviare a questo inconveniente, di utilizzare un unico profilo termico per mese, ottenuto come media aritmetica dei profili monitorati nella settimana di riferimento che non presentano l'anomalia descritta sopra, e di applicarlo a tutte le sottocentrali. Si riportano dalla Fig.19 alla 25 i diagrammi di carico delle utenze per il fabbisogno di riscaldamento. Gennaio presenta un picco massimo di richiesta termica alle ore 09.00 del mattino (a cui corrisponde il valore 100%) per poi attestarsi ad un valore medio durante la parte centrale della giornata per poi risalire a circa il 70% durante le ore serali. I diagrammi per i mesi di Marzo e Aprile mostrano lo stesso andamento nelle ore mattutine ma riducono la richiesta nelle ore serali del 30% rispetto ai mesi più freddi, a causa dell'aumento delle temperature esterne, che agevolano il raggiungimento del comfort termico con minore potenza richiesta ai terminali. I mesi di Ottobre e Novembre presentano un andamento speculare a quello descritto per Gennaio. Il diagramma del mese di Dicembre mostra invece una richiesta termica che si attesta su livelli percentuali molto alti, che non scende mai sotto il 50% della richiesta di picco. Può essere considerato dunque il mese in cui la pompa di calore lavora maggiormente. La potenza di picco

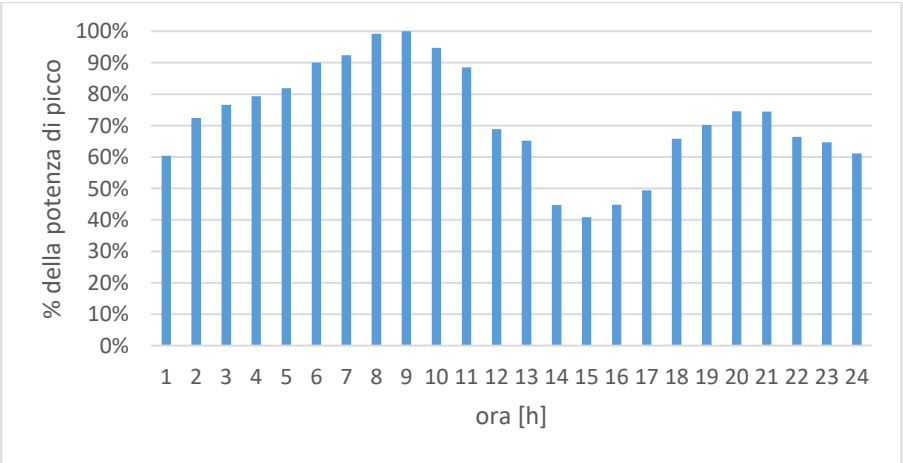


Figura 19 - Profilo di richiesta di riscaldamento per le utenze nel mese di Gennaio

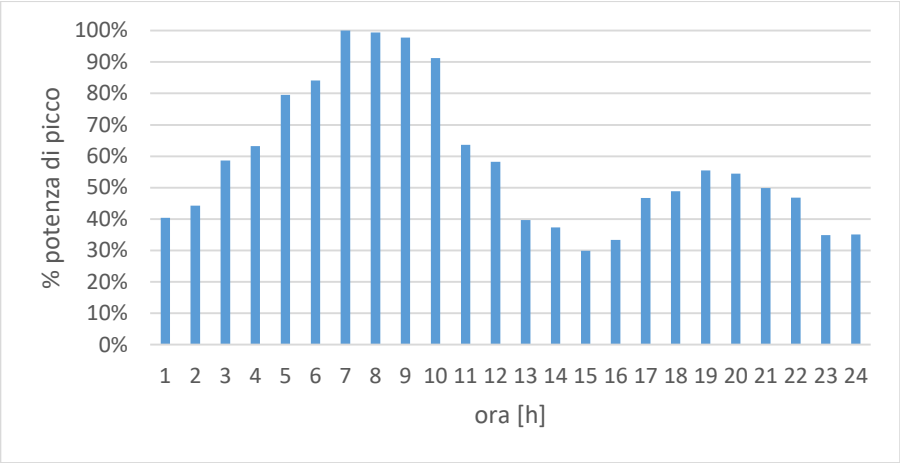


Figura 20 - Profilo di richiesta di riscaldamento per le utenze nel mese di Febbraio

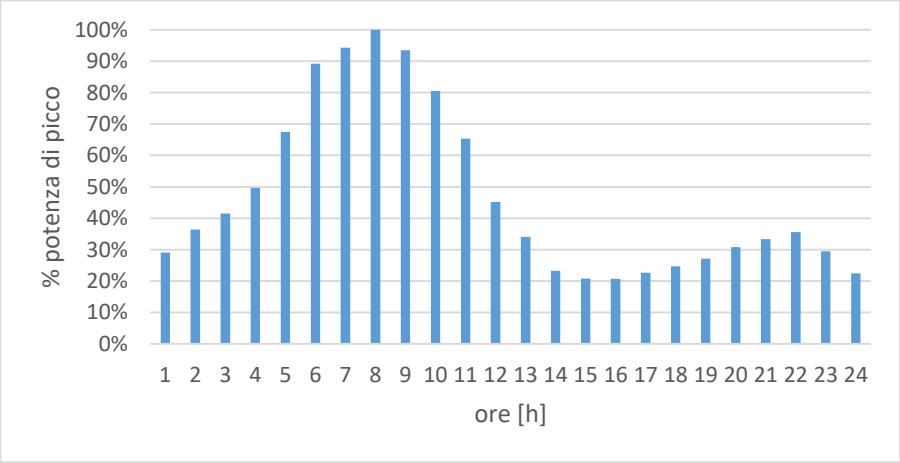


Figura 21 - Profilo di richiesta di riscaldamento per le utenze nel mese di Marzo

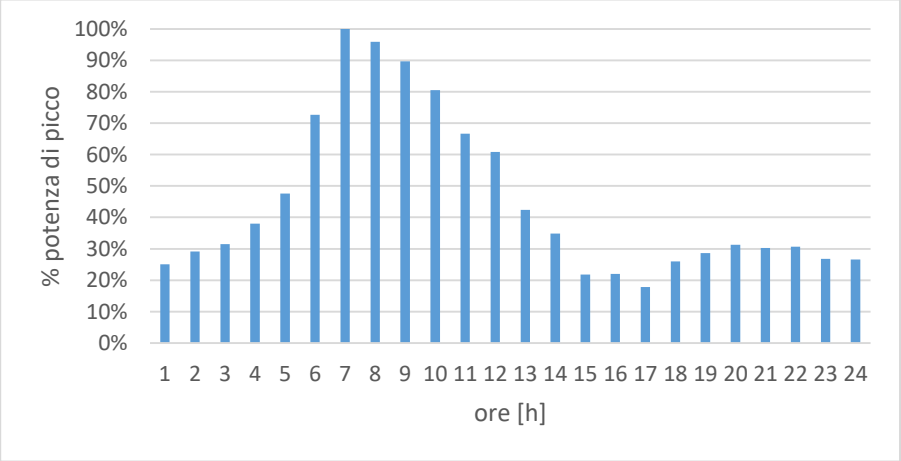


Figura 22 - Profilo di richiesta di riscaldamento per le utenze nel mese di Aprile

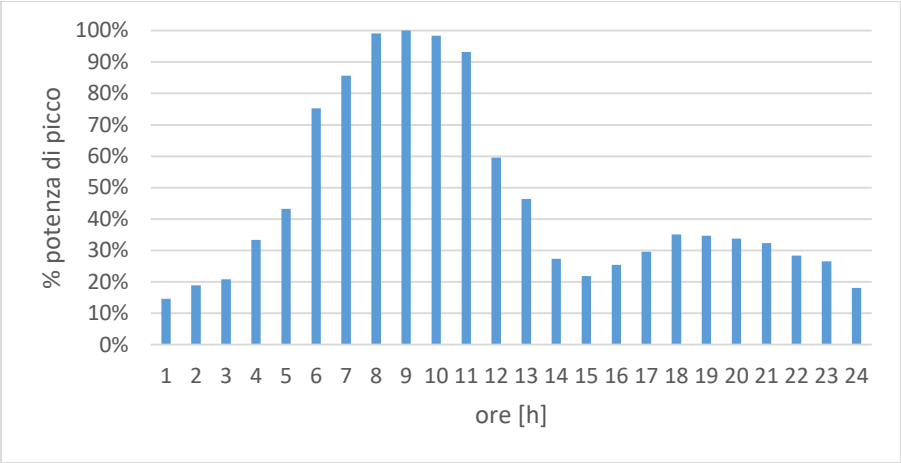


Figura 23 - Profilo di richiesta di riscaldamento per le utenze nel mese di Ottobre

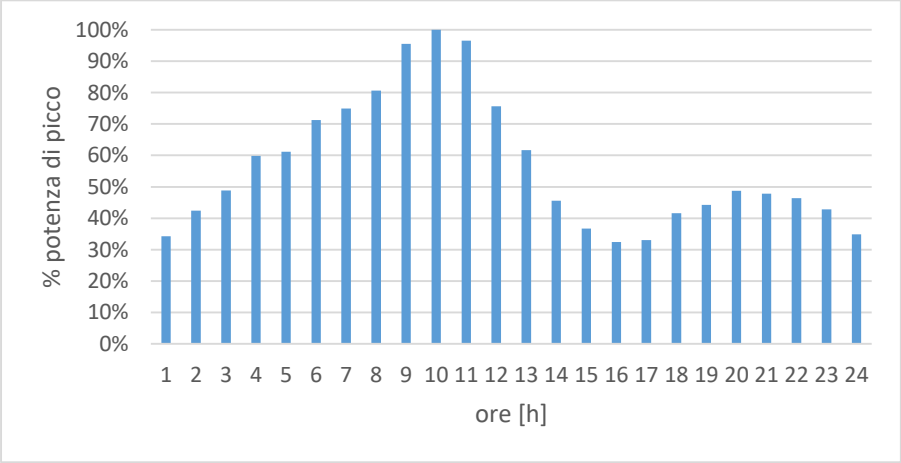


Figura 24 - Profilo di richiesta di riscaldamento per le utenze nel mese di Novembre

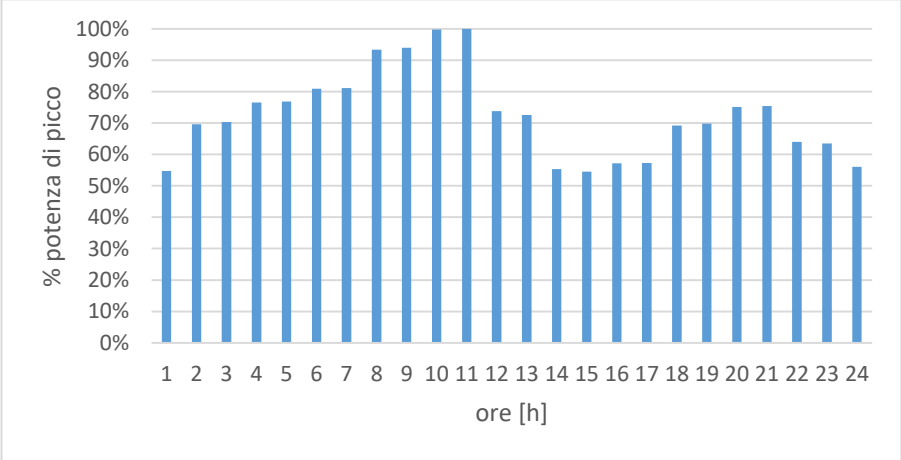


Figura 25 - Profilo di richiesta di riscaldamento per le utenze nel mese di Dicembre

I profili orari ottenuti, essendo dei profili orari medi mensili, sono validi per ogni giorno del mese corrispondente. Le potenze di picco su cui sono stati normalizzati i profili variano da mese a mese (il picco di Dicembre è diverso dal picco di richiesta di Aprile e così via…). È possibile osservare il valore dei picchi utilizzati per normalizzare i profili di richiesta di riscaldamento in Tab.3 della pagina successiva. La tabella è suddivisa nella parte superiore per sottocentrale. In ogni colonna di sottocentrale sono presenti due colonne nelle quali nella prima si riportano i valore di P_{real} ovvero il valore di potenza realmente ottenuto dagli strumenti di misura (lavoro di tesi di A.Naso sul monitoraggio in continuo del funzionamento delle sottocentrali) e nella seconda si riportano i valori di P_{scal} ottenuti partendo dai dati reali attraverso l'equazione 3.

$$P_{scal} = f_{occ_{max}} * P_{real} \quad (3)$$

Il primo termine dell'equazione $f_{occ_{max}}$ rappresenta un indice che è stato creato ad hoc per tener conto del fatto che non tutti gli appartamenti del complesso residenziale sono già occupati da inquilini e il sistema se venisse simulato con i valori reali risulterebbe molto sovradimensionato. Il valore di $f_{occ_{max}}$ si è ottenuto attraverso l'equazione 4

$$f_{occ_{max}} = \frac{0.80 * P_{nom}}{P_{real}} \quad (4)$$

dove:

- f_{occ} è l'indice d'occupazione;
- P_{nom} è la potenza nominale della PdC installata nella sottocentrale considerata [kW];
- P_{real} è la potenza di picco registrata dalla strumentazione di misura [kW].

Essendo Gennaio il mese in cui analizzando i dati reali si presenta il picco massimo di richiesta giornaliera la logica del fattore è quella di ipotizzare che in quel giorno in nuovo picco scalato sia pari all'80% della potenza nominale installata in centrale. Si utilizza lo stesso fattore calcolato per Gennaio poi per scalare i picchi giornalieri degli altri mesi della

stagione di riscaldamento. Il procedimento viene fatto per tutte le sottocentrali. I valori dei fattori di occupazione sono riportati di seguito.

Sottocentrale	Fattore di occupazione
S7	1,43
S4	1,25
S3	1,54
S6	1,56
S5	1,54
S2	2,89
S1	1,30

Tabella 3: Distribuzione annuale dei picchi di riscaldamento prima e dopo l'applicazione del indice d'occupazione

	S7		***S4***		***S3***		***S6***		***S5***		***S2***		***S1***	
	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]
Gen	114	162	62	77	50	77	22	35	50	77	46	134	78	101
Feb	99	142	53	67	36	55	17	27	40	62	37	106	59	77
Mar	54	77	33	41	25	38	11	16	25	38	27	77	35	46
Apr	24	35	16	20	9	13	7	11	13	20	20	59	16	20
Ott	29	41	25	32	15	24	9	14	24	37	23	66	33	43
Nov	67	96	31	39	29	45	12	19	39	60	29	83	55	72
Dic	82	117	48	60	41	63	19	29	44	68	39	113	62	80

2.2.2 Produzione di acqua calda sanitaria

Come per il fabbisogno termico di riscaldamento, anche per la richiesta di ACS si è condotta un'analisi dei consumi monitorati per ogni sottocentrale. Gli strumenti di misura, anche in

questo caso, presentano probabilmente gli stessi errori sui dati di output forniti cosi che per alcuni giorni della settimana tipo diventa impossibile ricavare dei profili significativi. Anche in questo caso, per ovviare all'inconveniente, si è fatta una media aritmetica dei profili corretti così da ottenere un unico profilo di richiesta per ogni mese e di applicarlo ad ogni sottocentrale.

Bisogna evidenziare che i dati monitorati e quindi il profilo estrapolato è rappresentativo della richiesta termica dell'utenza ma non coincide con la potenza termica erogata dalla pompa di calore in quanto i due elementi sono disaccoppiati da un accumulo termodinamico, come evidenziato nel paragrafo 2.1.3 riguardante la centrale termica. Quindi il profilo rappresentato mostra l'output dell'accumulo nelle 24 h ma non il profilo in ingresso nello stesso. Anche in questo caso le potenze di picco utilizzate per normalizzare i profili di richiesta di ACS cambiano da mese a mese. Si possono osservare i valori di picco utilizzati in Tab.4

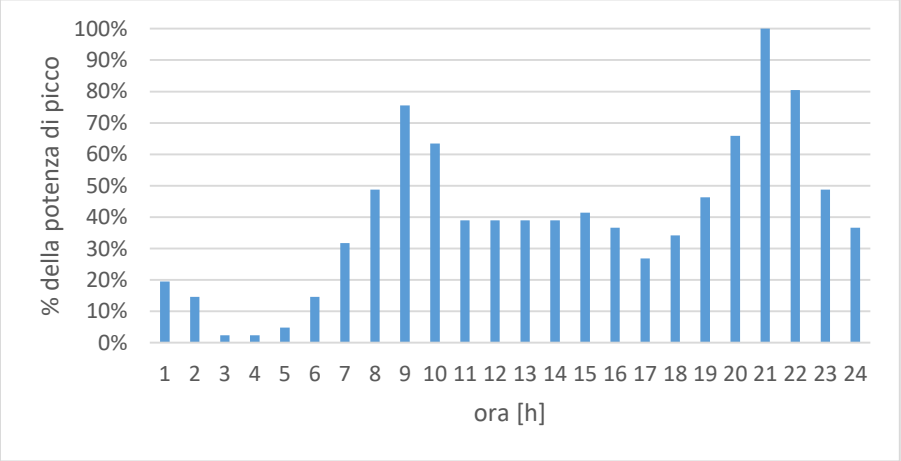


Figura 26 - Diagramma di carico per la richiesta di ACS nel mese di Gennaio

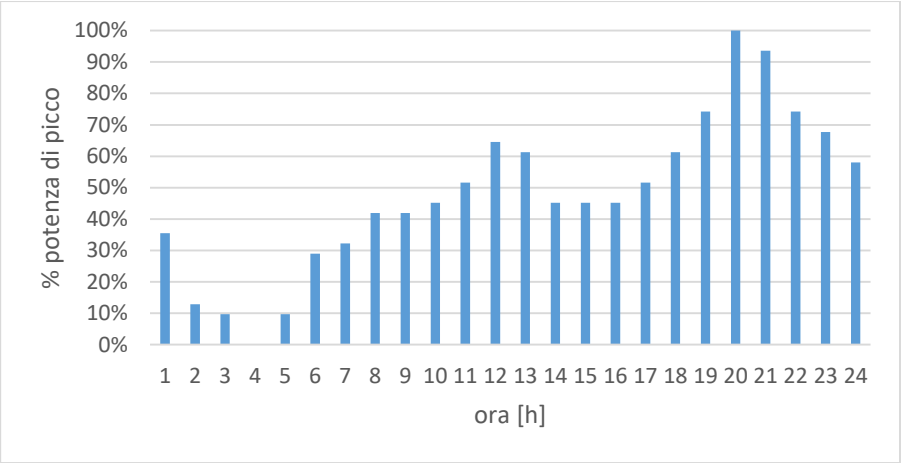


Figura 27 - Profilo di richiesta di ACS delle sottocentrali nel mese di Febbraio

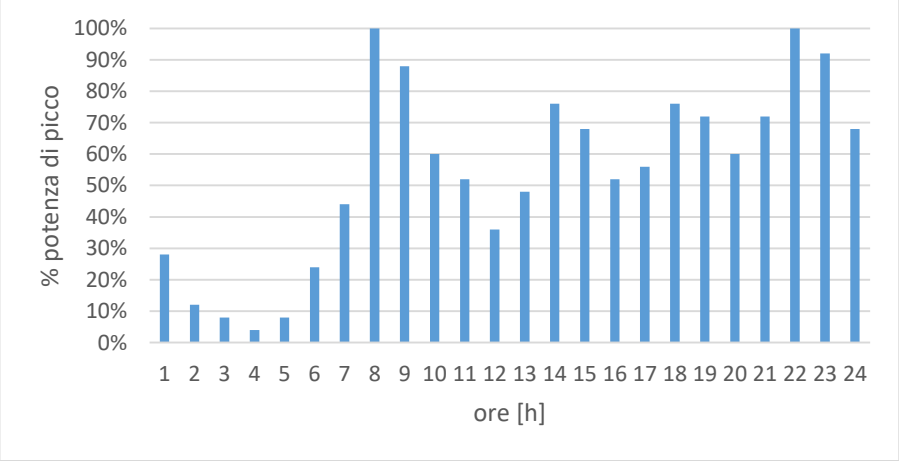


Figura 28 - Profilo di richiesta di ACS delle sottocentrali nel mese di Marzo

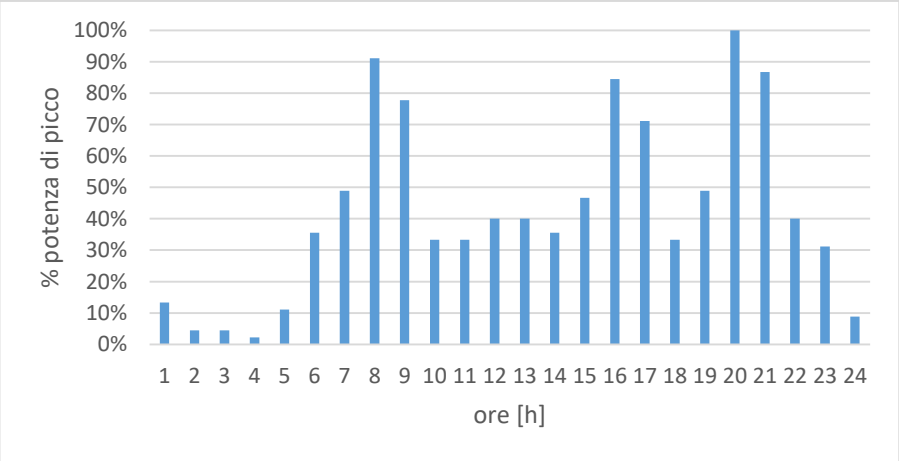


Figura 29 - Profilo di richiesta di ACS delle sottocentrali nel mese di Aprile

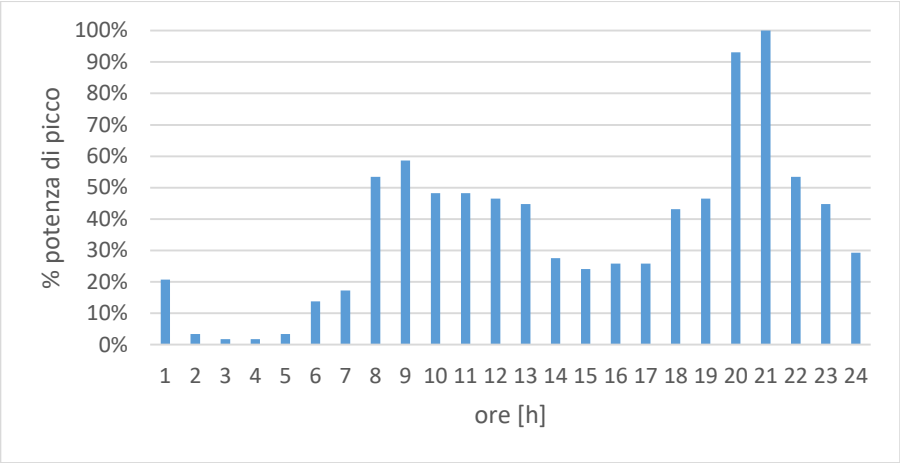


Figura 30 - Profilo di richiesta di ACS delle sottocentrali nel mese di Ottobre

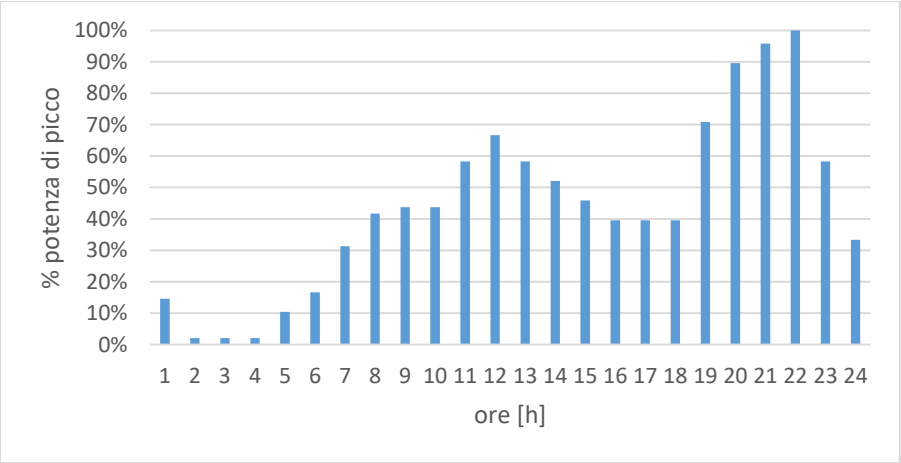


Figura 31 - Profilo di richiesta di ACS delle sottocentrali nel mese di Novembre

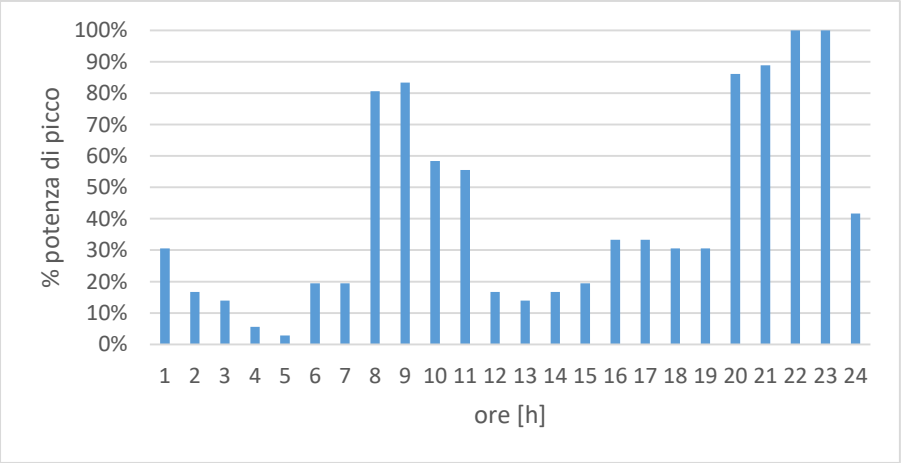


Figura 32 - Profilo di richiesta di ACS delle sottocentrali nel mese di Dicembre

Anche in questo caso, come in quello visto nel paragrafo precedente, le potenze di picco giornaliere monitorate e ricavate dal lavoro di tesi di A.Naso sono state scalate secondo il fattore d'occupazione, prima di essere distribuite secondo i diagrammi di carico. I risultati sono mostrati di seguito in Tab. 4.

Tabella 4: Distribuzione annuale dei picchi di ACS prima e dopo l'applicazione del indice d'occupazione

	S7		***S4***		***S3***		***S6***		***S5***		***S2***		***S1***	
	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]	P_{real} [kW]	P_{scal} [kW]
Gen	16	22	5	7	6	9	0	0	3	5	16	45	11	14
Feb	12	17	5	6	5	8	0	0	10	15	11	33	9	12
Mar	10	14	5	6	10	15	0	0	5	8	10	29	8	10
Apr	17	24	7	9	5	8	1	2	5	8	7	21	8	11
Ott	22	31	11	14	11	16	3	4	5	8	9	26	8	11
Nov	18	26	9	11	11	17	3	5	7	11	10	29	10	13
Dic	14	20	11	14	7	11	3	5	10	16	15	43	17	22

3. Modello di calcolo del caso studio

3.1 Introduzione e Modello matematico

Le variazioni continue del prezzo dei combustibili fossili (principalmente petrolio e gas naturale per il residenziale), dovute sia a fattori politici che a fattori economici, rendono il prezzo di acquisto di tali fonti energetiche un elemento altamente mutevole. A questo processo irreversibile oggi si può i processi energetici di produzione e trasformazione. Un incremento dell'efficienza dei sistemi energetici a servizio degli edifici può essere realizzato non solo attraverso l'utilizzo di apparecchi di conversione (boiler, caldaie, ciller, trasformatori) dell'energia che siano più efficienti sia a carico totale che a carico parziale, ma anche attraverso la diversificazione delle fonti energetiche in grado di coprire i fabbisogni termici, frigoriferi ed elettrici, superando le limitazioni che caratterizzano ciascuna fonte e ciascun convertitore presi singolarmente.

Un valido mezzo che consente di sfruttare le energie rinnovabili, garantendo al contempo numerose opzioni di consumo energetico, è rappresentato dai sistemi che sfruttano una combinazione di fonti energetiche, ovvero dai sistemi multi energia (Fabrizio & Filippi, 2008). Proprio la non prevedibilità di produzione di energia da fonti rinnovabili (si possono solo ipotizzare e stimare irraggiamento, velocità del vento ecc., ma non esserne certi) ha spinto il mercato verso una richiesta multi energetica, combinando le fonti rinnovabili con le fonti convenzionali, in modo da non farsi trovare impreparati alle fluttuazioni economiche dei combustibili fossili.

Lo studio di tali sistemi è basato sul concetto di Hybrid Energy Hub, sviluppato presso il Politecnico Federale (ETH) di Zurigo nel progetto "Vision of Future Energy Networs" (Geidl, 2007)e consente di esprimere in modo sintetico l'accoppiamento tra domanda e offerta di energia in un edificio attraverso un operatore matriciale. Vista la complessità di questi sistemi, si rende necessario l'utilizzo di modelli di calcolo dettagliati che permettano di valutare le possibili alternative progettuali. Essenzialmente esistono due famiglie di modelli sviluppate al Politecnico di Torino dagli autori Filippi e Fabrizio (Fabrizio & Filippi, 2008):

- **MODELLO STAGIONALE**: la prestazione del sistema è determinata su un intervallo di tempo più ampio, mensile o annuale, e gli effetti della variabilità delle grandezze in ingresso che riguardano una scala temporale inferiore rispetto a quella adottata sono presi in considerazione attraverso opportuni indicatori dei dati in ingresso;
- **MODELLO DINAMICO**: la prestazione del sistema è simulata per ogni intervallo di tempo (time-step). Tali modelli effettuano il bilancio energetico su tutti i flussi in ingresso e in uscita da ciascun componente del sistema e possono richiedere una o più informazioni inerenti le tecniche e le strategie di funzionamento per procedere da un time step all'altro.

Una volta costruito il modello, poiché sono molte le combinazioni di convertitori che possono di volta in volta essere adottate, è possibile simulare il sistema multi-energia in differenti condizioni di utilizzo o ottimizzarne il funzionamento in base ad un criterio economico, energetico o ambientale in modo tale da ottenere una configurazione ottimale dell'Energy Hub.

La Fig.33 mostra la configurazione di un Energy Hub (Energy Hub: una tendenza proiettata nel futuro, Infrastrutture e reti di Florian Kienzle) costituito da un trasformatore che connette il carico elettrico alla rete, una microturbina che converte gas naturale in energia elettrica e termica, uno scambiatore di calore connesso alla rete di teleriscaldamento, un bruciatore per il pellet, un accumulatore termico e una macchina frigorifera ad assorbimento. Tale modalità consente di fornire l'energia in uscita sfruttando una o più fonti in ingresso.

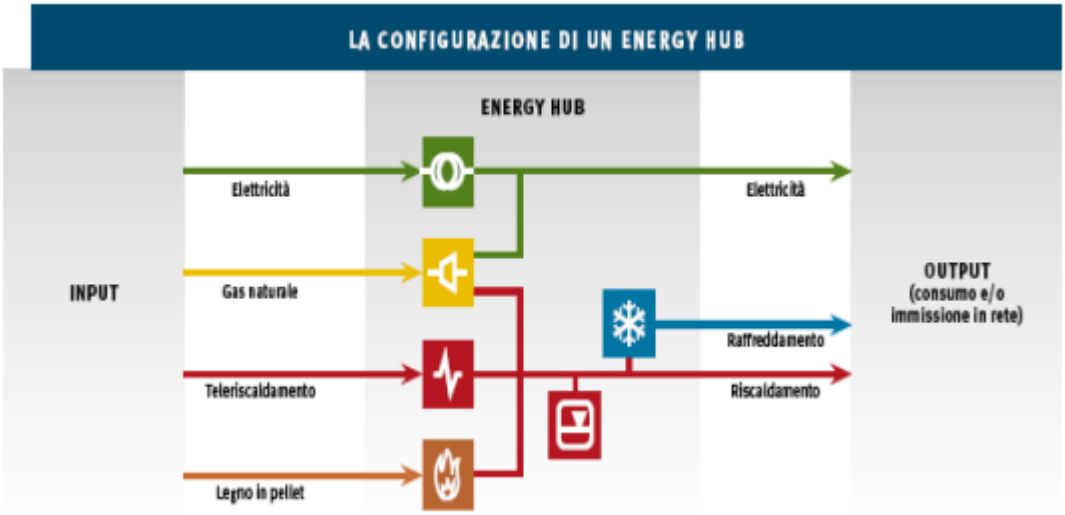


Figura 33 - Esempio di Hub energetico

L'energia elettrica può essere, per esempio, acquistata dalla rete o prodotta dalla microturbina. Grazie a questa ridondanza, un Energy Hub si presenta come un sistema flessibile che può adattare la propria attività in funzione di condizioni esterne che cambiano. Per esempio, quando il prezzo del gas naturale rincara e di conseguenza il funzionamento della microturbina diventa più costoso, può venire aumentato l'acquisto di energia elettrica dalla rete. Il sistema non si limita ad essere uno strumento di ottimizzazione, esso può essere utilizzato per analizzare i vari scenari e valutare i vantaggi e gli svantaggi di ogni configurazione.

Affinché un processo di integrazione energetica possa risultare efficace, i diversi impianti devono essere gestiti e progettati in modo coerente alla destinazione d'uso, favorendo l'utilizzo delle fonti rinnovabili ove possibile e ottimizzando l'integrazione tra le diverse fonti energetiche per poter sfruttare appieno le potenzialità. La progettazione dell'impianto non dovrà più basarsi sul sovradimensionamento del sistema, ma dovrà prevedere i consumi richiesti dall'utenza, così facendo i convertitori lavoreranno in condizioni migliori anche a carichi parziali (Fabrizio, Filippi, & Virgone, 2009).

L'obiettivo dei sistemi multi-energia è duplice: diminuire il consumo di energia primaria da fonti fossili e generare energia nello stesso sito dove si consuma. Inoltre se questi sistemi saranno installati su larga scala, come auspicabile, anche la rete

elettrica dovrà essere adattata ad una produzione di energia diffusa. Tutti gli impianti saranno allacciati alla rete (grid conneted) e vi sarà uno scambio di energia biunivoco (smart grid), di conseguenza la gestione dei carichi della rete dovrà necessariamente essere revisionata (Biglia, MODELLAZIONE DEL SISTEMA ENERGETICO, 2014).

3.1.1 La forma matriciale dell'Energy Hub

L'Energy Hub è uno schema logico-matematico utilizzato per l'ottimizzazione dei sistemi energetici integrati, quali possono essere ad esempio quelli ad uso delle strutture residenziali. L'Energy Hub è un modello astratto di un'interfaccia tra produttori, consumatori e infrastrutture di trasporto di energia. Questo concetto viene introdotto da un team di ricercatori dei laboratori Power Systems e High Voltage dell'ETH di Zurigo (Energy Hub: una tendenza proiettata nel futuro, Infrastrutture e reti di Florian Kienzle), e successivamente sviluppato per la sua applicazione in ambito residenziale da parte del gruppo TEBE del Politecnico di Torino (Fabrizio, 2008), ed è alla base della procedura di modellazione e selezione di sistemi energetici integrati utilizzata in questa tesi. La struttura del modello può essere espressa secondo uno schema a blocchi, dove i blocchi rappresentano i diversi convertitori, per poi essere enunciata matematicamente in forma matriciale. Il grafico seguente riporta uno schema generico, nella rappresentazione semplificata.

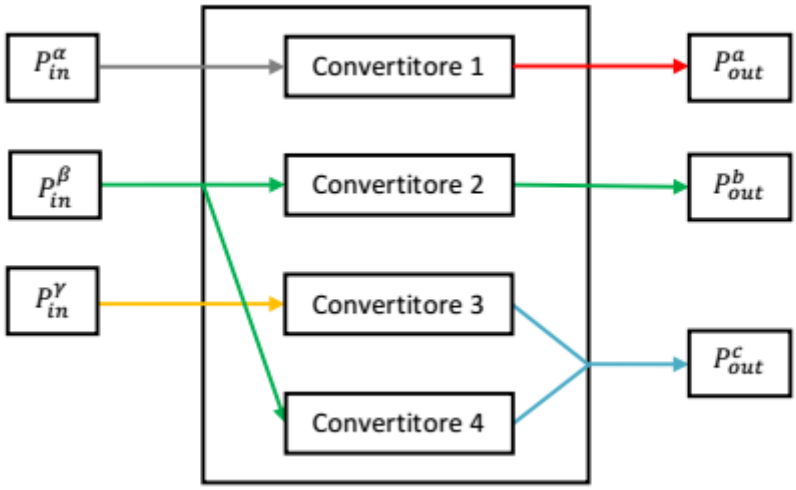


Figura 34 - Energy Hub rappresentazione dei flussi di energia

L'insieme delle n potenze in ingresso, identificate dal pedice i, è un vettore P_{in} $(n \times 1)$:

$$P_{in} = \begin{bmatrix} P_{in}^{\alpha} \\ P_{in}^{\beta} \\ \vdots \\ P_{in}^{n} \end{bmatrix}$$

l'apice si riferisce alla tipologia di vettore energetico impiegato (gas naturale, elettricità, solare, etc.). Tutte le quantità che riguardano il carico richiesto sono in uscita dall'Hub e sono indicate dal pedice out, l'insieme di tutte le uscite compone il vettore P_{out} $(m \times 1)$:

$$P_{out} = \begin{bmatrix} P_{out}^{a} \\ P_{out}^{b} \\ \vdots \\ P_{out}^{m} \end{bmatrix}$$

l'apice si riferisce alla tipologia di carico richiesto dall'utenza (calore, elettricità, freddo, etc.). Una volta definiti i vettori di ingresso e uscita, dove le incognite sono rappresentate dalle potenze in ingresso, l'accoppiamento tra la domanda e l'offerta (Equazione 6) può essere effettuato attraverso la matrice A di dimensioni $(n \times m)$:

$$P_{in} = A \times P_{out} \quad (6)$$

Per la formulazione della matrice A devono essere considerati tre aspetti chiave del modello matematico:

1. Connessione tra i flussi;
2. Perdite nei convertitori;
3. Energia accumulata in alcuni convertitori.

Per quanto riguarda il primo aspetto si introducono dei fattori che rappresentano, per ogni output, la quota del carico coperta da un certo convertitore (Equazione 7), ad esempio:

$$\varepsilon_{conv_4}^{c} = \frac{P_{conv_4}^{c}}{P_{out}^{c}} \quad (7)$$

ovvero il coefficiente $\varepsilon_{conv_4}^{c}$ rappresenta quanto del termine P_{out}^{c} (potenza in output del tipo "c") viene coperto dal convertitore 4. Per il secondo punto vengono introdotti i rendimenti energetici dei convertitori dell'Hub. Il terzo aspetto può essere preso in considerazione attraverso un'ulteriore serie di elementi che rappresentano i fattori di carico e scarico degli accumuli. Nell'Equazione 8 si riporta la struttura matriciale in forma esplicita che lega ingressi e uscite nell' Hub, con particolare attenzione alla struttura della matrice A che come detto esprime il comportamento dei convertitori:

$$\begin{bmatrix} P_{in}^{\alpha} \\ P_{in}^{\beta} \\ \vdots \\ P_{in}^{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_{c1}^{a}}{\eta_{c1}} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{\varepsilon_{c2}^{b}}{\eta_{c2}} & 0 & \frac{\varepsilon_{c4}^{c}}{\eta_{c4}} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\varepsilon_{c3}^{c}}{\eta_{c2}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_{out}^{a} \\ P_{out}^{b} \\ \vdots \\ P_{out}^{m} \end{bmatrix} \quad (8)$$

con i vincoli:

- $0 \leq \varepsilon_{Cj}^{i} \leq 1;$
- $\sum_{k=1}^{j} \varepsilon_{Ck}^{i} = 1;$

- $\eta_{Cj} \geq 1$;

- vincoli per la cogenerazione/trigenerazione.

essendo j l'insieme dei componenti dell'Hub (Fabrizio, 2008).

Per la risoluzione del sistema di equazioni si utilizzano dei software che riescano a risolvere un calcolo matriciale, quasi sempre lineare . La procedura di risoluzione si basa sulla definizione di funzioni obiettivo da minimizzare a seconda delle esigenze dell'utente, le funzioni più impiegate sono di tipo energetico, economico ed ambientale. Un altro aspetto fondamentale, per la sezione dei convertitori, è la tipologia del modello di partenza (Società ICSSEA, 2011). Il modello può essere "stagionale" oppure "orario" a seconda del grado di dettaglio dei dati in input sulla domanda di energia e ai parametri prestazionali dei convertitori energetici. Il metodo stagionale consente di eseguire una selezione a livello di analisi di fattibilità preliminare, invece il metodo orario consente di operare una selezione in maniera dettagliata del sistema energetico e di effettuare un processo di ottimizzazione nella gestione dell'Hub. Il comportamento dinamico del sistema non è realmente modellato, ma è considerato attraverso una serie di condizioni stazionarie variabili nel tempo sul passo temporale. Questa è la ragione per cui viene chiamato metodo orario e non dinamico.

3.1.2 Caratteristica energetica dei convertitori

Come detto nel paragrafo precedente per riuscire ad implementare il modello Energy Hub è necessario modellare i convertitori dal punto di vista energetico. La modellazione energetica dei convertitori deve essere effettuata con diversi gradi di dettaglio. Se nel caso del modello stagionale è sufficiente conoscere il rendimento nominale e il rendimento medio stagionale di ogni convertitore, per implementare il modello orario è necessario avere a disposizione dei parametri sul comportamento dinamico delle macchine, vale a dire è necessario conoscere la variazione del rendimento in funzione della potenza erogata dal convertitore stesso. La caratterizzazione energetica di un convertitore prevede la formulazione di una funzione per legare la potenza erogata dalla macchina con il rendimento del

convertitore stesso. Sarà quindi fornito per ogni dispositivo l'andamento del PLF (Part Load Efficiency) e del PLR (Part Load Ratio), definiti come segue rispettivamente nelle Equazioni 9 e 10:

$$PLF = \frac{\eta_{\text{parziale}}}{\eta_{\text{nominale}}} \quad (9)$$

$$PLR = \frac{P_{\text{parziale}}}{P_{\text{nominale}}} \quad (10)$$

i valori indicati con "parziale" sono i valori istantanei della macchina, all'interno dell'intervallo di tempo considerato.

La potenza nominale viene calcolata come mostrato nell'Equazione 11:

$$P^{i}_{nominale} = P^{i}_{out} \times \varepsilon^{i}_{Cj} \quad (11)$$

dove:

- P^{i}_{out} è la potenza richiesta dal i-esimo fabbisogno;
- ε^{i}_{Cj} è quanta di questa potenza viene coperta dal convertitore j-esimo.

Nel caso studio analizzato essendo presente un unico convertitore il valore di ε^{i}_{j} sarà unitario per tutti i flussi presenti. In altri termini l'intera potenza in uscita P^{i}_{out} viene coperta dall'unico convertitore presente.

3.1.3 Obbiettivo del modello

L'obbiettivo del modello sviluppato è quello di ottenere la quantità di energia elettrica in ingresso nell'Hub, rappresentata dalla quantità di energia elettrica per il funzionamento

della pompa di calore e dei suoi ausiliari e dalla quantità di energia elettrica in ingresso nelle pompe di circolazione dell'anello di distribuzione, per soddisfare i fabbisogni di riscaldamento e ACS del complesso residenziale.

3.2 Il caso studio

Nei prossimi paragrafi l'obbiettivo sarà quello di approfondire il reale funzionamento del sistema energetico del complesso residenziale, ovvero di ottenere, partendo dalle curve di richiesta delle utenze ricavate come mostrato nei paragrafi 2.2.1 e 2.2.2 e dalle curve di prestazione della pompa di calore ricavate per interpolazione dei dati forniti dal costruttore, i consumi di energia elettrica necessari al corretto funzionamento dell'impianto termico per soddisfare i fabbisogni di Riscaldamento e ACS durante il periodo che va dal 15 Ottobre al 15 Aprile. Ai fini della modellazione del sistema energetico si è fatto ricorso al software di calcolo Excel. Si è deciso inoltre di proporre tre "casi "del sistema energetico, in ordine di complessità del modello:

- **sistema 0** che rappresenta il livello più semplice del sistema energetico esistente ovvero quando tutti i fabbisogni vengono soddisfatti istantaneamente dalla pompa di calore;
- **sistema 1** che rappresenta lo stato di fatto del sistema energetico, in cui viene inserito un sistema di accumulo puffer tra la produzione di acqua tecnica e la richiesta di ACS dell'utenza;
- **sistema 2** che rappresenta un'evoluzione dello stato di fatto, in cui verrà inserito oltre al già presente accumulo puffer per l'ACS, un ulteriore accumulo puffer anche per la richiesta termica di riscaldamento.

3.2.1 Il “Sistema 0”

Come sottolineato in apertura, il sistema energetico “0” indica una semplificazione del progetto esistente. Da progetto l’acqua tecnica utilizzata per produrre l’ACS viene prelevata all’interno di un accumulo puffer. In questa configurazione invece si suppone che l’accumulo termico non sia presente e che quindi tutto il fabbisogno di ACS venga **istantaneamente** soddisfatto dalla pompa di calore. Dal punto di vista ingegneristico questa configurazione non verrà mai realizzata perché comporta delle sollecitazioni meccaniche della pompa di calore dovute alle accensioni ravvicinate che impedirebbero il corretto funzionamento nel tempo. Dal punto di vista energetico si è scelto di riportare pure questo caso in quanto fornisce degli indici che possono essere considerati come il limite massimo di prestazioni e consumi che il sistema energetico reale deve tendere a raggiungere.

Partendo dall’Equazione 8 si applicano i profili di richiesta termica per riscaldamento e ACS visti nei paragrafi 2.2.1 e 2.2.2, alle 24 ore di un giorno del mese preso come riferimento. Avendo utilizzato come input dell’Equazione 8 un profilo medio mensile, può essere considerata valida l’ipotesi che tutti gli altri giorni che compongono il mese abbiano lo stesso comportamento del giorno preso come riferimento. Si procede alla stessa maniera per tutti i mesi della stagione di riscaldamento cosi da ottenere l’andamento di richiesta stagionale. La schematizzazione dell’impianto con i relativi livelli termici in questa configurazione “0” è riportata in Fig.35.

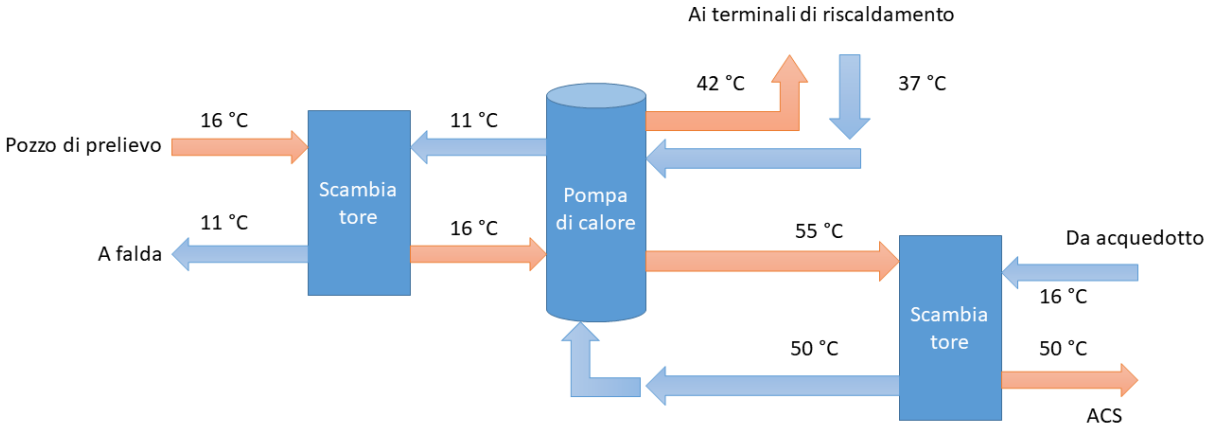


Figura 35 - Schema d'impianto semplificato configurazione 0

La regolazione della macchina prevede che la priorità venga data alla produzione di ACS. Quando giunge richiesta di ACS da parte dell'utenza, per motivi di ottimizzazione di funzionamento e di stabilità meccanica, la macchina non si avvia al 100% della sua potenza nominale bensì all'50%. La valutazione della potenza nominale della macchina cosi come del COP, come detto nel paragrafo 1.2, dipende dalle condizioni di funzionamento della macchina ovvero dalla temperatura del pozzo caldo cosi come dalla temperatura della sorgente fredda. A seguito di rilevazioni nel sottosuolo si è misurata una temperatura della sorgente fredda, costante durante tutta la stagione di riscaldamento e pari a 11 °C in uscita dall'evaporatore della pompa di calore mentre i set point di mandata rispettivamente per riscaldamento e ACS sono fissati a 42 °C e 55 °C.

I valori di COP utilizzati nel modello matematico non sono però quelli indicati nel manuale del produttore poiché questi rappresentano i parametri di COP del ciclo termodinamico eseguito dal fluido frigorifero contenuto all'interno dalla macchina. Per il reale funzionamento della pompa di calore sono necessari alcuni organi ausiliari, costituiti principalmente da circolatori elettrici, che incidono sui valori di COP indicati sulla brochure con una riduzione delle prestazioni di circa il 10% nell'ora di funzionamento. Si può notare come il decremento delle prestazioni della pompa di calore risulti quasi trascurabile in termini di potenza, ovvero in termini "istantanei", ma una volta integrato nell'intervallo temporale di un'ora e quindi valutato in termini di energia assume dei valori significativi e non più trascurabili. Poiché l'obbiettivo del modello è quello di ottenere dei valori di energia e non dei valori di potenze, risulta evidente che lavorare con i dati indicati nel manuale del produttore porterebbe a sottostimare l'energia in ingresso nell'Hub per cui una valutazione corretta che rispecchi la realtà è possibile unicamente tenendo conto della riduzione delle prestazioni della macchina. I valori inseriti all'interno del modello sono dunque quelli riportati in Tab. 5.

Tabella 5: Performance delle pompe di calore nelle due condizioni di funzionamento dopo la correzione del 10%

	Tm = 55°C		**Tm = 42°C**	
	P_{nom} [kW]	COP	P_{nom} [kW]	COP
S7	202	3,22	221	4,50
S4	97	3,16	104	4,43
S3	97	3,16	104	4,43
S6	43	3,26	47	4,58
S5	97	3,16	104	4,43
S2	167	3,21	182	4,47
S1	126	3,28	138	4,57

Un'altra importante assunzione utilizzata nel modello è che la pompa di calore abbia un funzionamento continuo nell'intera ora di richiesta, senza mai fermarsi. Si immagina quindi che il fabbisogno orario delle utenze (riscaldamento + ACS) sia distribuito uniformemente all'interno dei 60 minuti. Si applica questa ipotesi a tutte le 24 ore che compongono la giornata di funzionamento.

La procedura di calcolo può essere cosi riassunta:

- si calcola in quanti minuti, all'50% della potenza nominale indicata in Tab. 6, si riesce a soddisfare il fabbisogno orario di richiesta di ACS, utilizzando l'Equazione 16:

$$\tau_{ACS} = \frac{Q_{out_{ACS}}}{0.8 \times P_{nom}} \times 60 \ \ [minuti] \ \ (16)$$

dove:

- $Q_{out_{ACS}}$ è il fabbisogno orario di energia per ACS [kWh];
- P_{nom} è la potenza nominale della macchina [kW];

- funzionando in continuo all'interno dell'ora, si calcola il tempo in cui la macchina funziona per soddisfare la richiesta di riscaldamento attraverso l'Equazione 17:

$$\tau_{riscaldamento} = 60 - \tau_{ACS} \quad [minuti] \quad (17)$$

- si procede in questo modo per tutte le ore che compongono il giorno.

Per chiarire meglio il concetto si riporta parte del calcolo fatto per la sottostazione 7. Per il primo giorno del mese di Gennaio, nel primo timestep simulato si ha una richiesta di riscaldamento pari a 98 kWh e una richiesta di ACS di 4 kWh. Si ha:

$$\tau_{ACS} = \frac{Q_{out_{ACS}}}{0.5 \times P_u} \times 60 = 3 \; [minuti]$$

$$\tau_{riscaldamento} = 60 - \tau_{ACS} = 57 \; [minuti]$$

Ovvero la macchina lavora per circa 3 minuti per soddisfare il fabbisogno di ACS in quell'ora, e quindi con i parametri prestazionali legati ad una temperatura di mandata di 55 °C, mentre lavora per i restanti 57 minuti per soddisfare la richiesta di riscaldamento, con i parametri prestazionali legati ad una mandata di 42 °C.

Noti i tempi di funzionamento si può procedere con il calcolo del fattore di carico parziale (PLR) della macchina attraverso l'Equazione 18:

$$PLR = \frac{P_{\text{parz}}}{P_{\text{nom}}} \quad (18)$$

dove:

- P_{parz} è il prodotto tra il profilo di richiesta e la P_{scal};
- P_{nom} è la potenza nominale della macchina riportata in Tab. 5.

Determinati i PLR, attraverso le curve di regolazione caratteristiche della macchina si ottiene il fattore di correzione per il COP a carico parziale (PLF). Le curve di correzione del COP sono state ricavate attraverso un'interpolazione polinomiale dei dati forniti dal produttore grazie al supporto dell'ingegnere Alessandro Biglia. Si è supposto inoltre che le curve di correzione fossero uguali per ogni pompa di calore. Le curve di interpolazione sono riportate in Fig. 36 e le relazioni analitiche sono rispettivamente l'Equazione 21 e 22.

$$PLF = -0{,}6142 \cdot PLR^2 + 0{,}9205 \cdot PLR + 0{,}6993 \ (curva\ blu) \quad (21)$$

$$PLF = -0{,}4966 \cdot PLR^2 + 0{,}8285 \cdot PLR + 0{,}6703 \ (curva\ rossa) \quad (22)$$

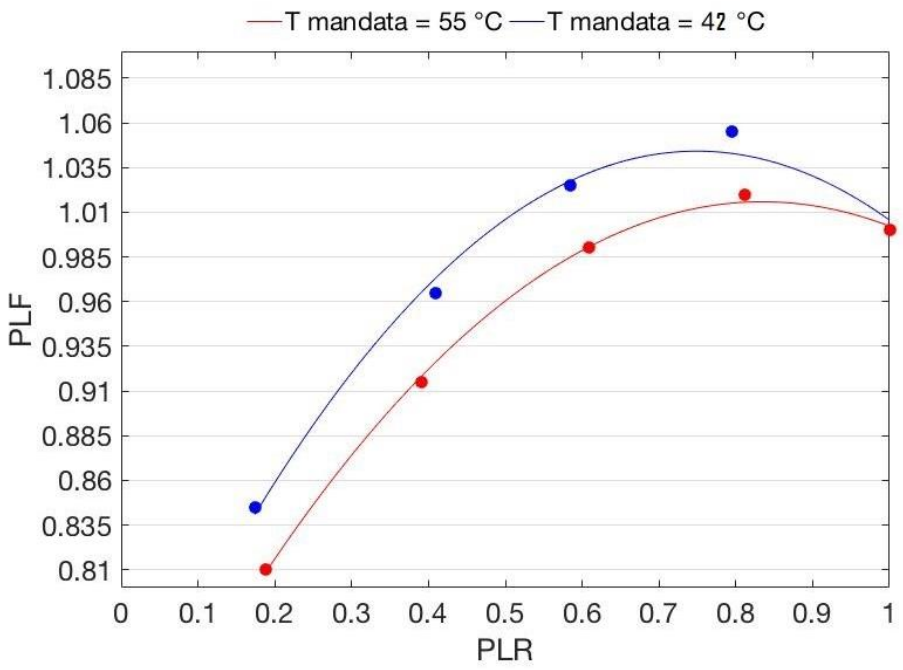


Figura 36 - Curva di prestazione della PdC nella mandata di 55 °C e 45 °C

Determinati i tempi di funzionamento e i rispettivi COP a carico parziale si può calcolare l'energia elettrica richiesta dal compressore attraverso l'Equazione 23:

$$W_{el_comp} = PLR \times P_{nom} \times \frac{\tau}{60 \times COP} \ [kWh] \quad (23)$$

Essendo PLR, τ, COP dipendenti dal tipo di funzionamento della macchina (riscaldamento o ACS) avremo due valori di W_{el_comp}, uno per ogni funzionamento. Il valore totale di energia assorbita in un'ora sarà dato dalla somma delle due componenti.

I flussi di energia elettrica in ingresso nell'Hub sono costituiti, oltre ai valori di energia elettrica assorbiti dal compressore appena calcolati, anche dall'energia elettrica assorbita dalle pompe di circolazione dell'anello di distribuzione. La prevalenza che le pompe devono fornire al fluido nell'anello si considera equivalente ad una colonna d'acqua di circa 30 m. In questo valore sono incluse, oltre alle perdite geodetiche dovute proprio alla

profondità del pozzo, anche le perdite concentrate e distribuite dell'anello di distribuzione. Il procedimento di calcolo può essere così sintetizzato:

- si impone un bilancio di primo principio per ricavare la potenza scambiata all'evaporatore tra il fluido frigorifero e l'acqua attraverso l'Equazione 24. Il dato ottenuto viene corretto considerando un rendimento dello scambiatore pari al 90% per ottenere conto delle perdite che necessariamente si trovano in uno scambiatore reale (Equazione 25);

$$Q_{eva} = Q_{cond_{tot}} - Q_{el_{tot}} \ [kWh] \ (24)$$

$$Q_{eva_{real}} = \frac{Q_{eva}}{0.9} \ [kWh] \ (25)$$

- si procede con il calcolo della portata oraria necessaria a fornire la quota di energia richiesta dell'evaporatore come mostrato nell'Equazione 26;

$$\dot{m}_{falda} = \frac{Q_{eva_{real}}}{cp_{acqua} \times \Delta T} \ \left[\frac{kg}{h}\right] \ (26)$$

dove:

cp_{acqua} è il calore specifico dell'acqua ed è posto a 4.186 $\frac{kJ}{kgK}$;

ΔT è il salto termico tra ingresso ed uscita all'evaporatore ed è posto a 5 K.

- determinata la portata si può procedere al calcolo dell'energia assorbita dalla pompa utilizzando l'Equazione 27;

$$W_{el_{pompa}} = \dot{m}_{falda} \times 9.81 \times \Delta H_z \times \frac{1}{\eta_{el} \times \eta_{mecc} \times \rho_{acqua}} \ [kWh] \ (27)$$

dove:

- ΔH_z è l'altezza equivalente del circuito calcolata prima e pari a 30 m;
- η_{el} è il rendimento elettrico convenzionale del motore elettrico accoppiato alla pompa e pari a 0.7;
- η_{mecc} è il rendimento meccanico dell'accoppiamento motore-girante della pompa e pari a 0.9;

- ρ_{acqua} è la densità dell'acqua a 16 °C e pari a 1000 $\frac{kg}{m^3}$.

Estendendo la procedura appena descritta a tutti gli altri giorni della stagione di riscaldamento è possibile ottenere il valore di energia totale necessaria al funzionamento della sottocentrale 7 per soddisfare i fabbisogni termici e di ACS. Grazie inoltre all'accoppiamento di questo valore con il rendimento globale è possibile qualificare il funzionamento del sistema energetico. Si riportano i risultati della simulazione relativa alla sottocentrale 7 in Tab. 10. La prima voce in tabella indica l'energia elettrica assorbita dal compressore della pompa di calore, considerando anche gli ausiliari di funzionamento, mentre la seconda colonna indica l'energia elettrica assorbita dalle pompe di prelievo e circolazione dell'anello di falda. Le ultime tre colonne riportano infine i valori di COP medi mensili, rispettivamente il valore massimo mensile, il valore minimo e il valore medio mensile. Quest'ultimo può essere utilizzato come indice di confronto delle prestazioni di una sottocentrale con un'altra sottocentrale dello stesso complesso residenziale oppure per analizzare il comportamento di una sottocentrale all'interno della stagione di riscaldamento. L'ultima riga della tabella riporta invece il riepilogo stagionale della sottocentrale 7. I primi tre valori sono la somma delle rispettive colonne mentre gli ultimi tre valori sono rispettivamente il massimo, il minimo e il valor medio della colonna corrispondente.

Tabella 6: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 7 nella stagione di riscaldamento - Sistema 0

RIEPILOGO MENSILE-S7						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	20004	1815	21819	4,51	3,90	4,24
FEBBRAIO	13832	1164	14996	4,36	3,63	3,99
MARZO	8291	592	8883	4,03	3,28	3,53
APRILE	5271	332	5604	3,57	3,16	3,28
OTTOBRE	6211	403	6614	3,66	3,12	3,33
NOVEMBRE	11500	888	12388	4,18	3,49	3,77
DICEMBRE	15686	1330	17015	4,31	3,84	4,05
STAGIONE RISCALDAMENTO	**80795**	**6525**	**87319**	**4,51**	**3,12**	**3,74**

La procedura di calcolo appena esposta va applicata alle rimanenti sei sottocentrali termiche che, essendo composte da pompe di calore di taglia diversa l'una dall'altra, presenteranno dei risultati energetici e prestazionali diversi da sottocentrale a sottocentrale. Le tabelle riepilogative con i risultati numerici analoghi a quelli riportati in Tab.6 ma delle altre sottocentrali sono riportate nella pagina successiva. Si può notare come i risultati delle prestazioni delle pompe di calore intesi come COP di funzionamento siano molto elevati in tutte le sottocentrali. Questo è reso chiaramente possibile dal poter sfruttare la macchina anche con temperature più basse, anche se per tempi molto brevi.

Tabella 7: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 4 nella stagione di riscaldamento - Sistema 0

RIEPILOGO MENSILE-S4						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	9529	840	10370	4,38	3,83	4,16
FEBBRAIO	6490	532	7022	4,27	3,56	3,92
MARZO	4286	306	4593	4,05	3,26	3,52
APRILE	2570	162	2732	3,59	3,13	3,27
OTTOBRE	3882	267	4149	3,89	3,14	3,43
NOVEMBRE	4945	361	5306	4,00	3,38	3,62
DICEMBRE	8275	709	8984	4,37	3,86	4,08
STAGIONE RISCALDAMENTO	**39978**	**3177**	**43155**	**4,38**	**3,13**	**3,71**

Tabella 8: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 5 nella stagione di riscaldamento - Sistema 0

RIEPILOGO MENSILE-S5						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	9442	828	10269	4,34	3,82	4,14
FEBBRAIO	6741	553	7294	4,32	3,56	3,93
MARZO	4204	296	4500	4,01	3,24	3,50
APRILE	2822	179	3000	3,62	3,14	3,28
OTTOBRE	3847	271	4118	3,96	3,15	3,47
NOVEMBRE	6530	525	7055	4,28	3,57	3,87

DICEMBRE	9115	806	9921	4,48	3,94	4,17
STAGIONE RISCALDAMENTO	**42701**	**3458**	**46159**	**4,48**	**3,14**	**3,76**

Tabella 9: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 2 nella stagione di riscaldamento - Sistema 0

RIEPILOGO MENSILE-S2						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	17757	1662	19419	4,77	3,95	4,33
FEBBRAIO	11918	993	12911	4,38	3,60	3,97
MARZO	9521	709	10230	4,28	3,35	3,64
APRILE	7489	526	8015	4,02	3,27	3,50
OTTOBRE	7577	549	8126	4,07	3,20	3,53
NOVEMBRE	10358	808	11166	4,22	3,50	3,79
DICEMBRE	15950	1442	17392	4,61	3,96	4,23
STAGIONE RISCALDAMENTO	**80570**	**6688**	**87259**	**4,77**	**3,20**	**3,86**

Tabella 10: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 1 nella stagione di riscaldamento - Sistema 0

RIEPILOGO MENSILE-S1						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	12291	1138	13429	4,58	3,96	4,30
FEBBRAIO	7779	650	8429	4,36	3,62	3,97

MARZO	5101	370	5470	4,08	3,33	3,57
APRILE	3030	194	3223	3,59	3,19	3,32
OTTOBRE	4502	323	4826	3,99	3,23	3,52
NOVEMBRE	7800	640	8440	4,34	3,62	3,92
DICEMBRE	10841	976	11818	4,55	3,98	4,22
STAGIONE RISCALDAMENTO	**51344**	**4291**	**55635**	**4,58**	**3,19**	**3,83**

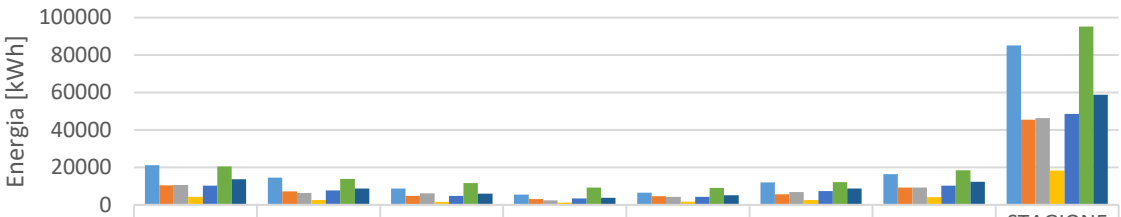
Tabella 11: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 3 nella stagione di riscaldamento - Sistema 0

RIEPILOGO MENSILE-S3						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	9799	849	10648	4,31	3,70	4,11
FEBBRAIO	6022	445	6467	4,14	3,20	3,64
MARZO	5847	332	6179	3,75	2,52	3,06
APRILE	2425	109	2535	3,06	2,24	2,70
OTTOBRE	4123	208	4331	3,39	2,41	2,85
NOVEMBRE	6490	430	6919	3,97	3,00	3,41
DICEMBRE	8629	714	9344	4,24	3,78	3,99
STAGIONE RISCALDAMENTO	**43334**	**3088**	**46423**	**4,31**	**2,24**	**3,39**

Tabella 12: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 6 nella stagione di riscaldamento - Sistema 0

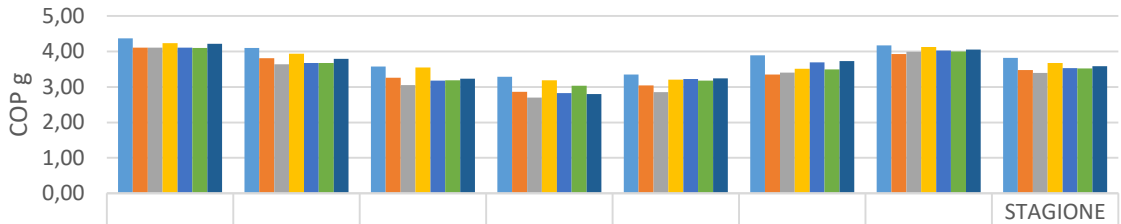
RIEPILOGO MENSILE-S6						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	4005	362	4367	4,37	3,91	4,23
FEBBRAIO	2413	200	2613	4,30	3,59	3,94
MARZO	1445	105	1550	4,01	3,29	3,55
APRILE	1188	73	1261	3,68	2,67	3,19
OTTOBRE	1676	105	1781	3,77	2,76	3,21
NOVEMBRE	2385	166	2551	4,04	3,14	3,51
DICEMBRE	3820	333	4153	4,38	3,92	4,13
STAGIONE RISCALDAMENTO	**16932**	**1343**	**18275**	**4,38**	**2,67**	**3,68**

In Fig.37 si riporta invece l'istogramma con il consumo di energia elettrica totale nella stagione di riscaldamento per l'intero polo abitativo. I valori riportati nel grafico sono quelli corrispondenti alla quarta colonna della Tab.10. Questa colonna riporta la somma algebrica dell'energia elettrica assorbita dal compressore della macchina e l'energia elettrica assorbita dalle pompe di circolazione dell'anello, per ogni mese della stagione di riscaldamento. In Fig.38 si può osservare invece l'istogramma delle performance medie delle sette sottostazioni nella stessa stagione.



	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE	STAGIONE RISCALDAMENTO
S7	21186	14599	8730	5572	6535	11967	16504	85093
S4	10498	7205	4923	3142	4690	5749	9329	45536
S3	10648	6467	6179	2535	4331	6919	9344	46423
S6	4367	2613	1550	1261	1781	2551	4153	18275
S5	10357	7776	4916	3529	4412	7378	10284	48652
S2	20528	13948	11702	9346	9048	12149	18476	95198
S1	13690	8794	6003	3887	5217	8853	12335	58779

Figura 37 – Consumi elettrici mensili delle sottocentrali nella configurazione 0



	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE	STAGIONE RISCALDAMENTO
S7	4,37	4,10	3,58	3,29	3,35	3,89	4,17	3,82
S4	4,11	3,81	3,26	2,86	3,04	3,35	3,93	3,48
S3	4,11	3,64	3,06	2,70	2,85	3,41	3,99	3,39
S6	4,23	3,94	3,55	3,19	3,21	3,51	4,13	3,68
S5	4,11	3,68	3,18	2,83	3,23	3,69	4,03	3,53
S2	4,10	3,67	3,18	3,04	3,18	3,50	4,00	3,52
S1	4,22	3,80	3,23	2,80	3,25	3,73	4,05	3,58

Figura 38 – Prestazioni medie mensili delle sottocentrali nella configurazione 0

Come si può notare dall'analisi di Fig.39 le sottocentrali che presentano all'incirca la stessa superficie utile (S5-S4-S3), ovvero che servono all'incirca lo stesso numero di utenze, hanno un consumo finale di energia nella stagione di riscaldamento molto simile, nell'ordine dei 45000 kWh. Dall'analisi dei risultati si nota un consumo elevato per la sottocentrale 2 rispetto alle sottocentrali simili. Questo è giustificato dal fatto che il profilo di richiesta ACS a questa sottocentrale presenta dei valori numerici più elevati rispetto alle altre sottocentrali simili. Di conseguenza la pompa di calore lavora per tempi più lunghi ad

un regime prestazionale più basso. Proprio in relazione ai tempi di funzionamento della macchina, si mostra da Fig.40 alla Fig.46 il comportamento orario della pompa di calore installata in ogni sottocentrale. In altri termini si mostra come reagisce la pompa di calore sottoposta ad un determinato profilo di richiesta nella configurazione ipotizzata. Si riporteranno per completezza i profili più significativi, uno per sottocentrale.

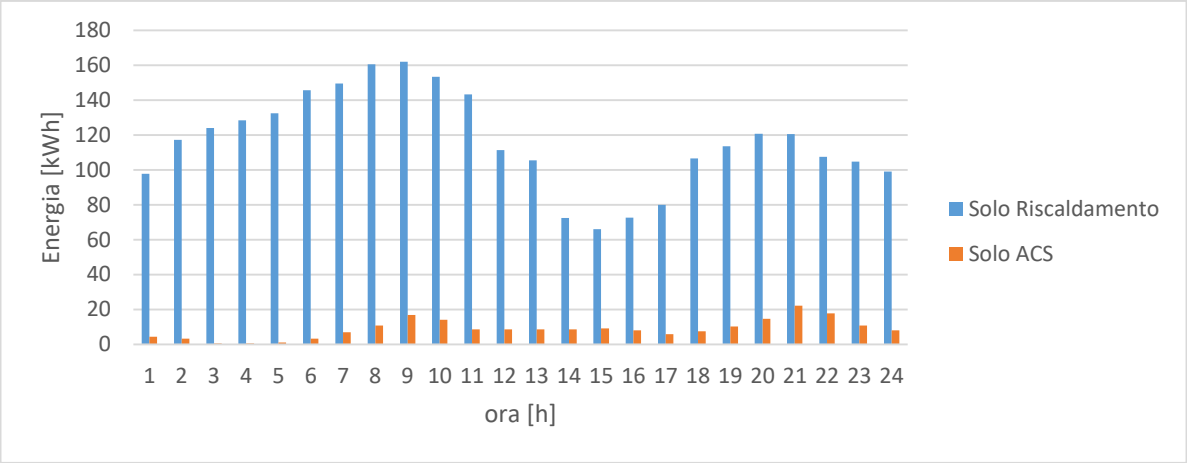


Figura 40 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 7 nel mese di Gennaio

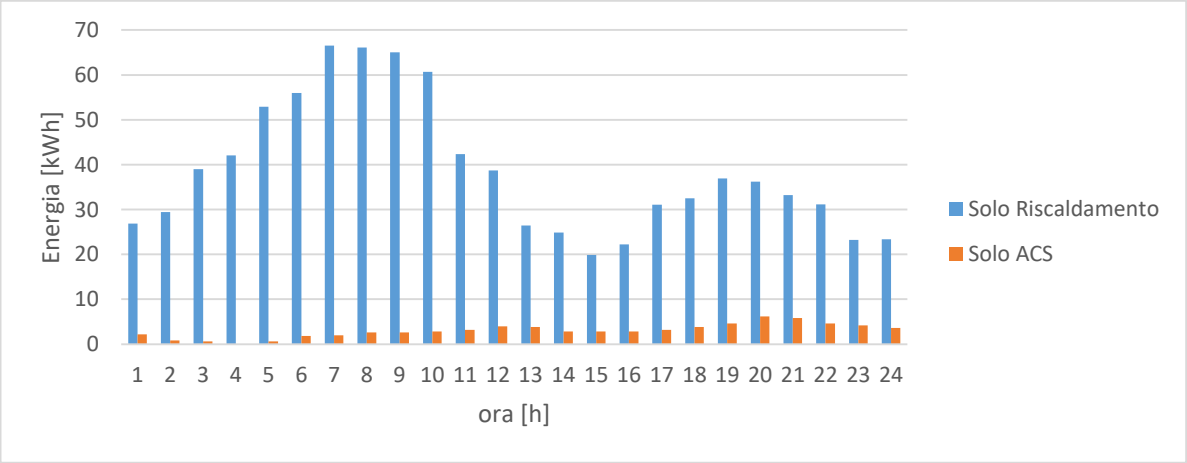


Figura 41 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 4 nel mese di Febbraio

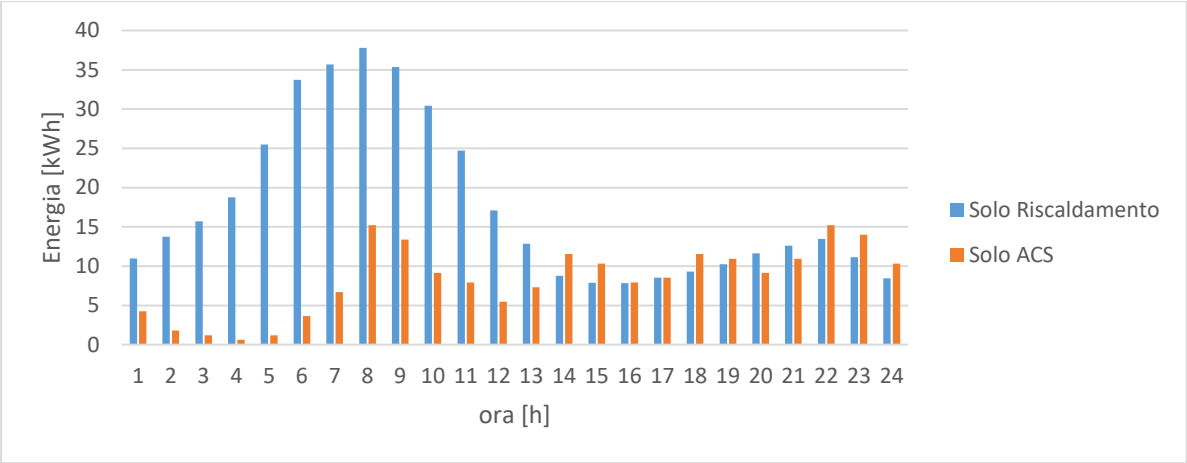


Figura 42 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 3 nel mese di Marzo

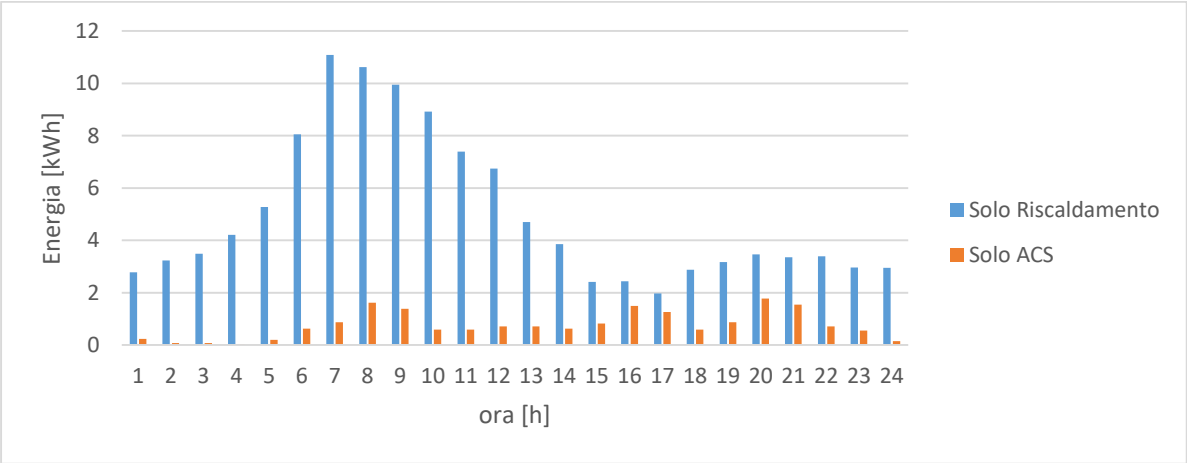


Figura 43 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 6 nel mese di Aprile

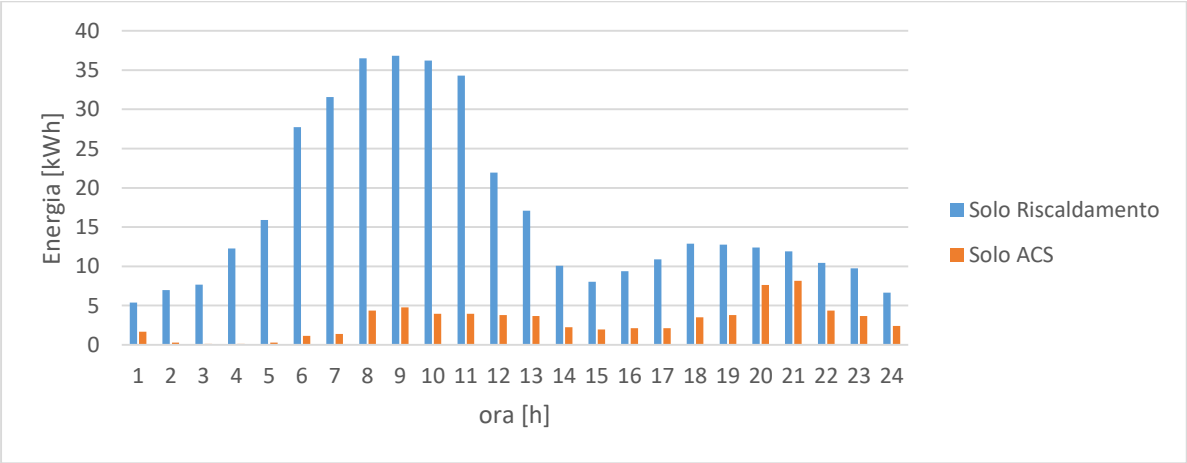


Figura 44 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 5 nel mese di Ottobre

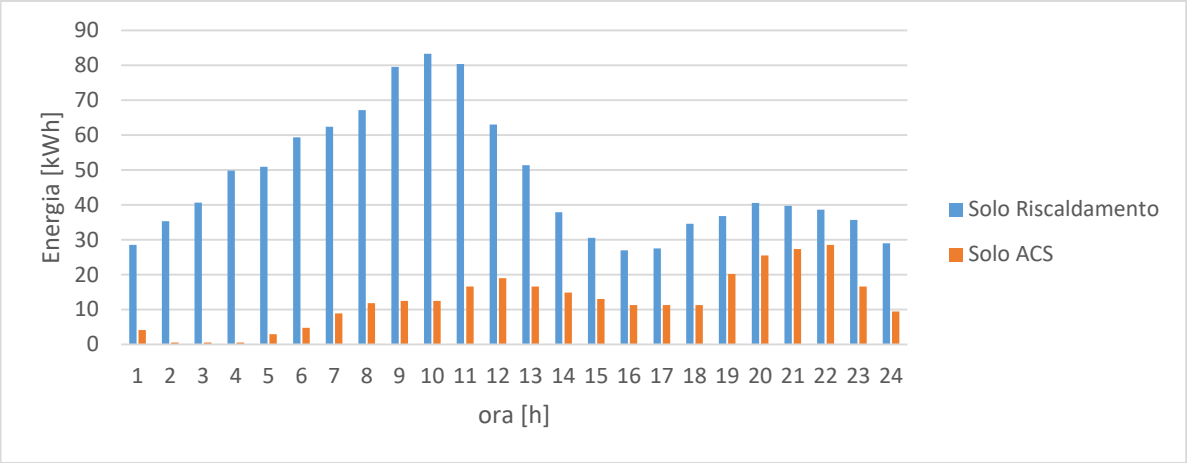


Figura 45 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 2 nel mese di Novembre

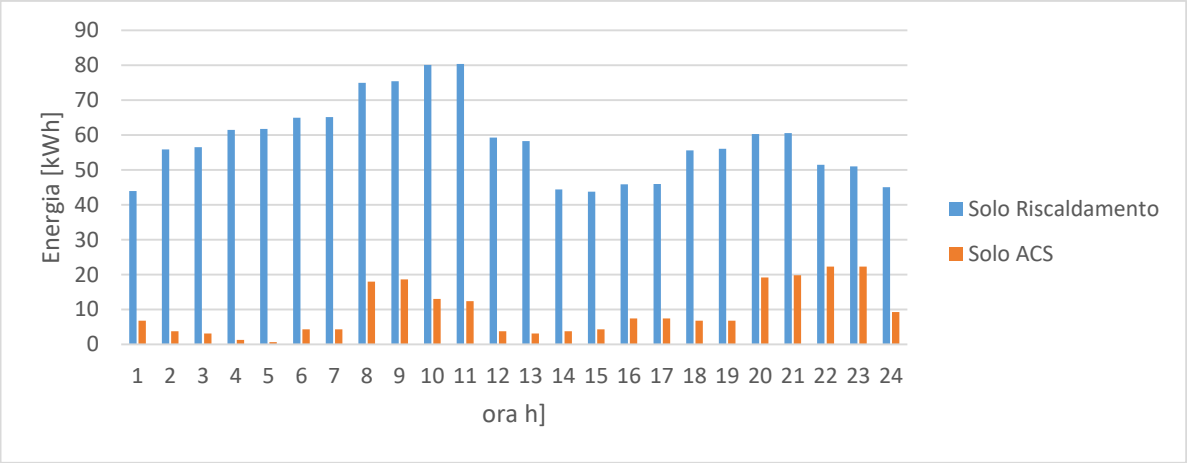


Figura 46 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 1 nel mese di Dicembre

Sia i valori dei consumi che delle performance per le sottocentrali appena visti per il caso 0 come detto in apertura di paragrafo sono dei valori limite del sistema energetico e verranno utilizzati come termine di paragone sia con il sistema reale sia con la configurazione alternativa aria-aria. Il progetto non viene realizzato dal punto di vista ingegneristico perché comporterebbe una sollecitazione eccessiva e una lubrificazione non ottimale del compressore della pompa di calore in funzionamento solo ACS, essendo la macchina costretta in alcune ore a lavorare per meno di due minuti quando ne sono richiesti almeno 4 per una lubrificazione ottimale.

3.2.2 Il “Sistema 1”

Evidenziati i limiti tecnici che una configurazione con soddisfacimento istantaneo della richiesta di ACS, indicata con sistema 0, comporterebbe si procede a descrivere lo stato “reale” del sistema energetico, cosi come è stato scelto in fase di progetto. Questa configurazione presenta il disaccoppiamento tra la produzione e la richiesta di ACS da parte delle utenze, attraverso l’inserimento di un accumulo tra i due circuiti. Le funzioni dell’accumulo sono molteplici ma quella che sicuramente rende questo sistema largamente utilizzato negli impianti termo-idrici delle abitazioni è che permette di livellare la richiesta termica di picco, così da preservare la macchina dallo stress meccanico e di operare per intervalli più ampi in condizione di carico di massimo rendimento. Si riporta in Fig.47 lo schema d’impianto semplificato del sistema cosi come appena descritto.

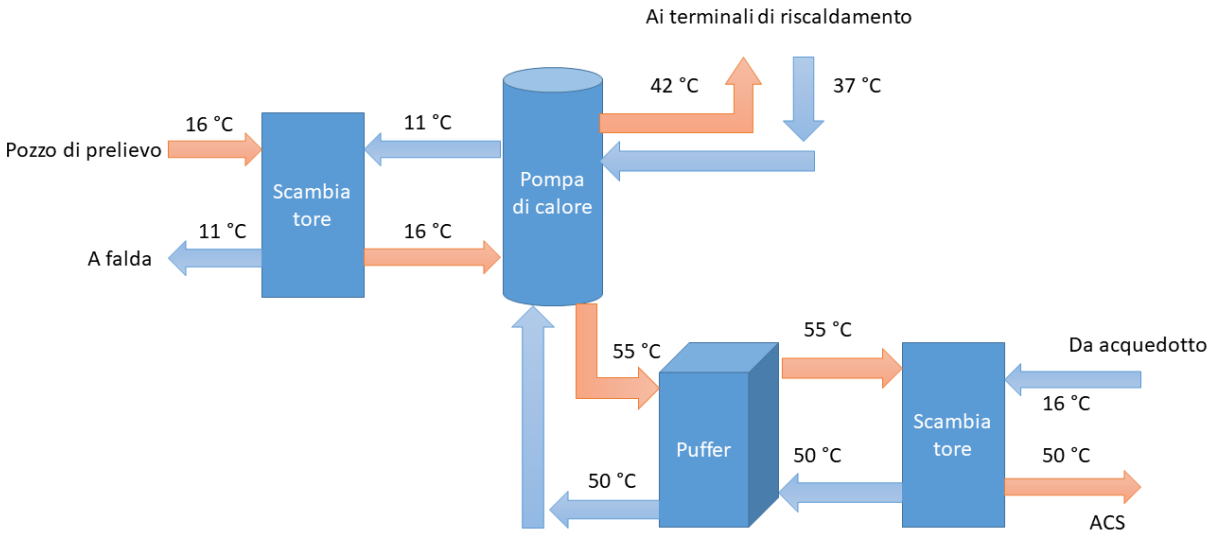


Figura 47 - Schema d'impianto del caso 1

Si ipotizza che l’accumulo in questione sia perfettamente miscelato e non stratificato, ovvero da qualunque punto dell’accumulo si prelevi l’ACS, essa sarà alla stessa temperatura. Inoltre si sviluppa un modello di accumulo giornaliero, ovvero la carica e la scarica dell’accumulo si concludono nelle 24 ore che compongono il giorno in esame; in altre parole le condizioni iniziali dell’accumulo per t=0 coincidono con le condizioni finali a t=24. In questa maniera le perdite d’energia attraverso il mantello dell’accumulo possono

essere considerate piccole rispetto ai due flussi principali che entrano ed escono nello stesso e quindi possono essere trascurate. Si è scelto inoltre di dimensionare l'accumulo per una copertura parziale del fabbisogno, cosi da poter utilizzare degli accumuli più piccoli. (FIRE-Federazione Italiana per l'Uso Razionale dell'Energia, 2013). Per il caso 1 valgono inoltre tutte le ipotesi di funzionamento enunciate nel caso 0, per quanto riguarda la potenza e le prestazioni della pompa di calore nelle condizioni nominali e al carico parziale e i valori di temperature di funzionamento, sia per la mandata verso le utenze sia per la temperatura delle sorgente fredda.

Il primo passo all'interno del modello, a differenza del caso 0 in cui vi era una mandata di acqua calda sanitaria direttamente alle utenze, è quello di determinare un valore di potenza di funzionamento della pompa di calore che dovrà fornire al sistema di accumulo costantemente per tutta la giornata di funzionamento. Si ricava questo valore di funzionamento imponendo che l'energia in ingresso nell'accumulo dovrà essere uguale a quella in uscita. In maniera esplicita si ottiene che la sommatoria della differenza tra la richiesta e la quantità incognita fornita dev'essere 0. Il fattore $(E_i - X)$ sarà un numero positivo se si ha un surplus di energia ovvero l'accumulo sta immagazzinando energia (indicata con 0 nel modello) sarà un numero negativo se si ha un deficit di energia e quindi l'accumulo sta cedendo parte dell'energia immagazzinata (indicata con 1 nel modello).

$$(E_1 - X) + (E_2 - X) + (E_3 - X) + \cdots + (E_{24} - X) = 0 \quad (28)$$

Risolvendo le parentesi si ottiene

$$Q_{funz} = \frac{\sum_{i=1}^{24} E_i}{24} \quad [kWh] \; (29)$$

Per esempio, in un giorno tipo di gennaio si ha una Q_{funz} che la pompa di calore deve fornire in ogni intervallo orario all'accumulo di 9 kWh. Questo valore di energia viene fornito dalla macchina lavorando costantemente ad una potenza di 9 kW. Si nota, come mostrato in Fig.48, che il valore di Q_{funz} calcolato è maggiore rispetto alla richiesta

dell'utenza nelle prime ore del giorno per cui il sistema d'accumulo starà immagazzinando energia (FIRE-Federazione Italiana per l'Uso Razionale dell'Energia, 2013). Il vantaggio dell'accumulo risulta evidente nelle ore della giornata in cui sono presenti i picchi di richiesta di ACS. Si può osservare come per esempio alle ore 8-9 a.m o alle ore 20-21 p.m orari in cui è presente la massima richiesta di ACS la pompa di calore sia avvantaggiata dalla presenza dell'accumulo in quanto dovrà fornire solo 9 kWh invece di fornirne rispettivamente 17 kWh e 22 kWh. Il resto dell'energia termica necessaria sarà fornita dall'accumulo. Nella stessa figura il tratto in rosso indica il comportamento dell'accumulo. Il tratto positivo indica la fase di carica mentre la parte negativa indica la fase di scarica. Bisogna evidenziare come la pompa di calore fornisca solamente la parte colorata in arancione, che risulta chiaramente più uniforme rispetto all'andamento originale. La parte in azzurro indica la richiesta dell'utenza.

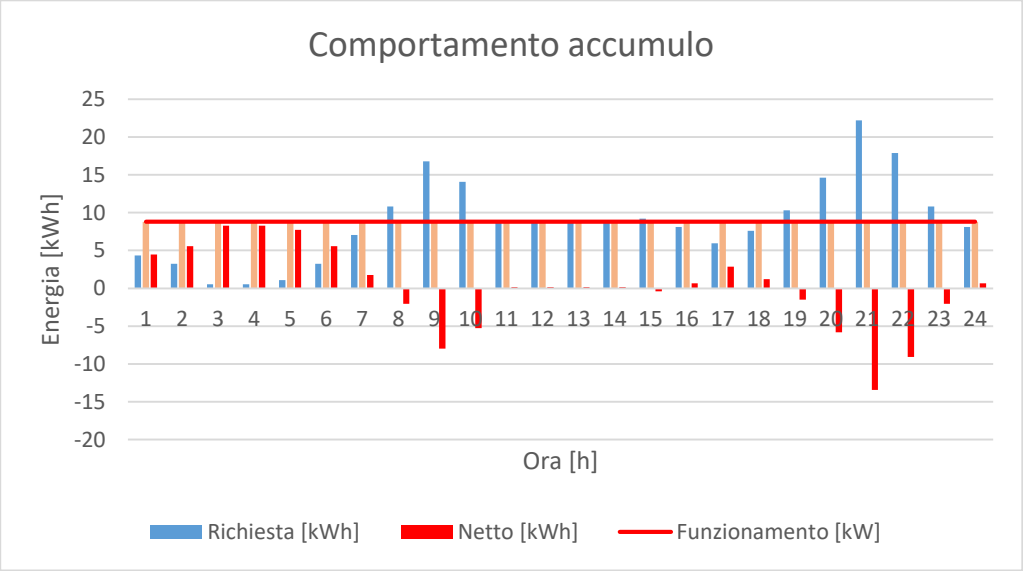


Figura 48 - Andamento dell'accumulo nel giorno tipo di Gennaio

Dopo aver determinato il comportamento dell'accumulo si procede a determinare il volume dell'accumulo. Il dimensionamento del volume d'accumulo si fa utilizzando un bilancio di energia di primo principio e considerando il mese con il valore più alto di richiesta ACS:

$$V = \frac{Q_{picco} * 3600}{\rho * c_p * \Delta T} \quad [m^3] \ (30)$$

dove:

- Q_{picco} rappresenta il picco massimo della richiesta aggregata di ACS espresso in kWh del mese più critico;
- ρ è la densità dell'acqua a 16°C approssimato a 1000 kg/m^3 ;
- ΔT è la differenza di temperatura tra l'ingresso e l'uscita dall'accumulo puffer.

Si riportano in tabella 12 le dimensioni in m^3 degli accumuli delle sette sottocentrali.

Tabella 13: Volumi d'accumulo delle sette sottocentrali-ACS

Sottocentrale	Volume accumulo [m3]
S7	5
S4	3
S3	3
S6	1
S5	3
S2	7
S1	4

Una volta determinati i volumi d'accumulo si definiscono le prestazioni della pompa di calore nelle condizioni di funzionamento relative sia al soddisfacimento della richiesta di riscaldamento che alla richiesta di ACS e accumulo. Si sono supposte tre possibili configurazioni per il funzionamento della pompa di calore per soddisfare il fabbisogno di riscaldamento.

Configurazione 1

La prima configurazione prevede che la pompa di calore soddisfi il fabbisogno di riscaldamento lavorando costantemente all'interno dell'ora, come si è supposto per il funzionamento dell'ACS. La potenza totale di funzionamento nell'ora sarà quindi data dalla somma della potenza di funzionamento ACS più quella di funzionamento per il riscaldamento. A titolo di esempio si considera il calcolo delle prestazioni della pompa di calore relativo allo stesso giorno di cui si è mostrato il comportamento dell'accumulo in

Fig.48. Facendo un confronto con lo stesso giorno del caso 0, la macchina funziona costantemente in ogni intervallo di tempo fornendo 9 kW per l'ACS e l'accumulo ai quali va sommata la richiesta di riscaldamento, che varia a seconda dell'orario considerato. Si procede a calcolare il ΔQ di energia termica dato dalla differenza tra la Q_{funz} e la richiesta termica di ACS $Q_{req_{ACS}}$ nel time step considerato. E' importante il valore del segno in quanto indica un deficit o un surplus di energia. I parametri prestazionali sono ricavati in questo caso solo per una temperatura di mandata di 55°C in quanto l'acqua a temperatura più alta sarà fornita costantemente a differenza del caso 0 in cui l'acqua a 55°C viene fornita solo quando richiesta. Infine si sono determinati i fabbisogni di energia del compressore della pompa di calore (Equazione 23) e dei circolatori dell'anello di distribuzione (Equazione 27) e della portata circolante in anello (Equazione 26) attraverso l'energia scambiata all'evaporatore (Equazione 24 e 25) cosi come fatto per il caso 0 fino a ricavare il valore totale di energia in ingresso nella sottocentrale e il rendimento globale del sistema come sommatoria dei flussi energetici in uscita fratto i flussi energetici in ingresso. Il procedimento di calcolo appena esposto si applica poi ai restanti giorni della stagione di riscaldamento nonché a tutte e sette sottocentrali. Il risultato numerico è riportato dalla Tab.14 alla Tab.20.

Tabella 14: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 7 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S7						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	29220	1587	30807	3,10	2,80	3,01
FEBBRAIO	19962	1012	20974	3,09	2,61	2,85
MARZO	11854	504	12357	2,85	2,36	2,54
APRILE	7462	278	7740	2,57	2,29	2,39
OTTOBRE	8785	339	9124	2,63	2,30	2,43
NOVEMBRE	16430	766	17196	2,97	2,55	2,72
DICEMBRE	22699	1156	23855	3,04	2,78	2,89
STAGIONE RISCALDAMENTO	**116411**	**5641**	**122053**	**3,10**	**2,29**	**2,69**

Tabella 15: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 4 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S4						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	13905	732	14637	3,05	2,73	2,95
FEBBRAIO	9408	460	9868	3,03	2,55	2,79
MARZO	6164	260	6424	2,85	2,34	2,52
APRILE	3681	134	3815	2,56	2,24	2,35
OTTOBRE	5547	226	5773	2,76	2,29	2,48
NOVEMBRE	7078	308	7386	2,85	2,45	2,61
DICEMBRE	12080	614	12695	3,02	2,79	2,89

STAGIONE RISCALDAMENTO	**57864**	**2733**	**60597**	**3,05**	**2,24**	**2,66**

Tabella 16: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 3 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S3						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	14080	743	14823	3,05	2,74	2,95
FEBBRAIO	8284	389	8673	2,98	2,50	2,72
MARZO	7010	303	7313	2,87	2,42	2,58
APRILE	2867	99	2965	2,44	2,20	2,28
OTTOBRE	4874	190	5063	2,66	2,28	2,43
NOVEMBRE	8356	383	8739	2,93	2,54	2,70
DICEMBRE	12241	625	12865	3,02	2,79	2,90
STAGIONE RISCALDAMENTO	**57711**	**2732**	**60443**	**3,05**	**2,20**	**2,65**

Tabella 17: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 6 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S6						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	5821	317	6138	3,13	2,76	3,01
FEBBRAIO	3521	172	3693	3,06	2,52	2,78
MARZO	2114	88	2202	2,83	2,31	2,49
APRILE	1610	62	1672	2,68	2,27	2,41

OTTOBRE	2197	92	2289	2,81	2,31	2,51
NOVEMBRE	3180	146	3326	2,95	2,53	2,70
DICEMBRE	5452	292	5745	3,11	2,88	2,99
STAGIONE RISCALDAMENTO	**23896**	**1170**	**25066**	**3,13**	**2,27**	**2,70**

Tabella 18: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 5 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S5						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	13739	721	14460	3,05	2,72	2,94
FEBBRAIO	9724	479	10203	3,03	2,60	2,81
MARZO	6021	251	6273	2,82	2,34	2,51
APRILE	4016	149	4165	2,59	2,26	2,37
OTTOBRE	5555	229	5784	2,80	2,26	2,48
NOVEMBRE	9451	452	9904	3,01	2,57	2,76
DICEMBRE	13399	700	14099	3,04	2,84	2,94
STAGIONE RISCALDAMENTO	**61905**	**2982**	**64887**	**3,05**	**2,26**	**2,69**

Tabella 19: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 2 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S2						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	26421	1447	27869	3,09	2,86	3,03

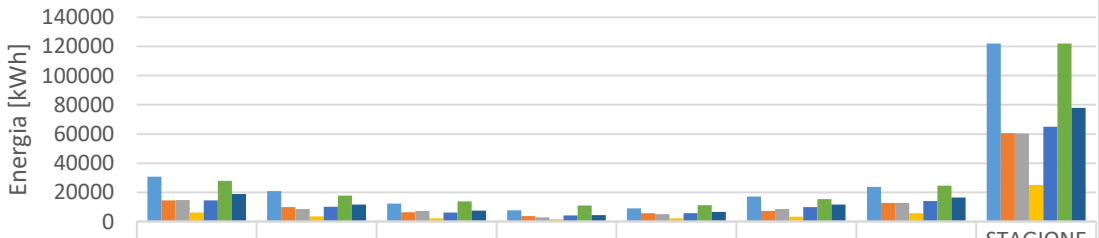
FEBBRAIO	17048	865	17913	3,07	2,66	2,87
MARZO	13355	614	13969	2,98	2,50	2,68
APRILE	10509	451	10960	2,86	2,41	2,58
OTTOBRE	10789	469	11258	2,89	2,35	2,57
NOVEMBRE	14728	700	15428	2,99	2,58	2,75
DICEMBRE	23398	1257	24655	3,09	2,91	3,00
STAGIONE RISCALDAMENTO	**116248**	**5804**	**122052**	**3,09**	**2,35**	**2,78**

Tabella 20: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 2 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S1						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	17927	998	18925	3,15	2,84	3,06
FEBBRAIO	11171	566	11737	3,10	2,62	2,85
MARZO	7262	316	7578	2,89	2,41	2,58
APRILE	4296	162	4459	2,58	2,31	2,41
OTTOBRE	6459	275	6734	2,84	2,33	2,53
NOVEMBRE	11201	555	11757	3,08	2,63	2,82
DICEMBRE	15773	854	16627	3,13	2,90	3,01
STAGIONE RISCALDAMENTO	**74089**	**3727**	**77816**	**3,15**	**2,31**	**2,75**

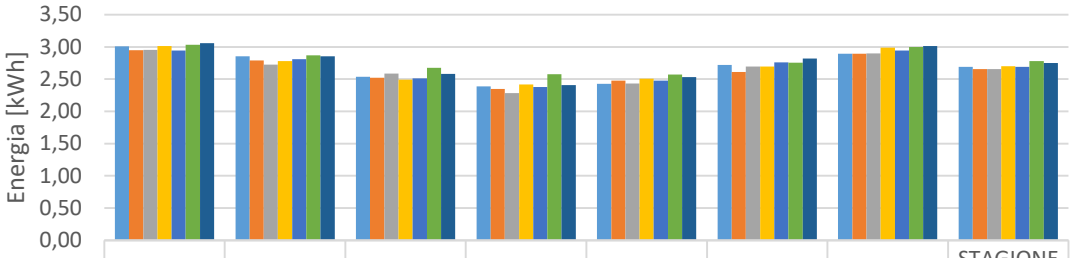
Analizzando questi risultati si può notare subito come i valori di prestazioni sono peggiori rispetto al caso 0 esposto nel paragrafo precedente. Questo è dovuto ai valori di COP più bassi caratteristici di una mandata a 55°C rispetto al caso 0 in cui intervenivano anche i COP di mandata a 42°C, più alti. Questo risultato è più chiaro osservando la Fig.49 in cui si riporta l'istogramma con il consumo di energia elettrica totale nella stagione di riscaldamento per l'intero polo abitativo. I valori riportati nel

grafico sono quelli corrispondenti alla quarta colonna della Tab. 14 e degli omologhi delle tabelle delle altre sottocentrali. Questa colonna riporta la somma algebrica dell'energia elettrica assorbita dal compressore della macchina e l'energia elettrica assorbita dalle pompe di circolazione dell'anello, per ogni mese della stagione di riscaldamento. Confrontando questi valori con quelli del caso 0 si possono notare dei consumi più alti di circa il 35% per le sottocentrali in cui la richiesta di ACS è molto inferiore rispetto alla richiesta di riscaldamento (sottocentrale 7 e 2) mentre i consumi sono maggiori di circa il 15% nelle sottocentrali in cui la richiesta di ACS si avvicina alla richiesta di riscaldamento. In Fig.50 si può osservare invece l'istogramma delle performance medie delle sette sottostazioni nella stessa stagione, che corrispondono alla settima colonna della Tab.15. Anche qui facendo un confronto con il caso 0 le prestazioni medie sono peggiori di circa il 20% solo che a differenza dei consumi questo risultato è all'incirca costante per ogni sottocentrale.



	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE	STAGIONE RISCALDAMENTO
S7	30807	20974	12357	7740	9124	17196	23855	122053
S4	14637	9868	6424	3815	5773	7386	12695	60597
S3	14823	8673	7313	2965	5063	8739	12865	60443
S6	6138	3693	2202	1672	2289	3326	5745	25066
S5	14460	10203	6273	4165	5784	9904	14099	64887
S2	27869	17913	13969	10960	11258	15428	24655	122052
S1	18925	11737	7578	4459	6734	11757	16627	77816

Figura 49 - Riepilogo dei consumi delle sottocentrali per il Sistema 1 nella Config.1



	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE	STAGIONE RISCALDAMENTO
S7	3,01	2,85	2,54	2,39	2,43	2,72	2,89	2,69
S4	2,95	2,79	2,52	2,35	2,48	2,61	2,89	2,66
S3	2,95	2,72	2,58	2,28	2,43	2,70	2,90	2,65
S6	3,01	2,78	2,49	2,41	2,51	2,70	2,99	2,70
S5	2,94	2,81	2,51	2,37	2,48	2,76	2,94	2,69
S2	3,03	2,87	2,68	2,58	2,57	2,75	3,00	2,78
S1	3,06	2,85	2,58	2,41	2,53	2,82	3,01	2,75

Figura 50 - Riepilogo delle prestazioni delle sottocentrali nella stagione di riscaldamento del Sistema 1 nella Config.1

Dalla Fig.51 fino alla Fig.57 si riporta il funzionamento orario della pompa di calore installata in ogni sottocentrale, in questa configurazione nella stagione di riscaldamento considerando i profili più significativi di ogni sottocentrale. E' importante ricordare che la macchina funziona in questa configurazione in maniera costante nell'ora fornendo una potenza data dalla somma della richiesta di riscaldamento più la richiesta di ACS e puffer.

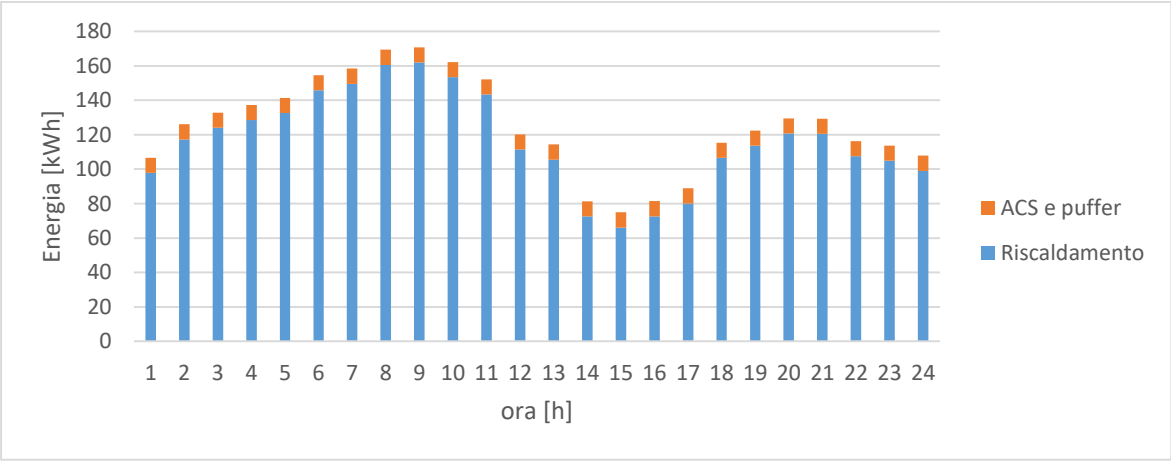


Figura 51 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 7 nel mese di Gennaio, Sist.1 Config.1

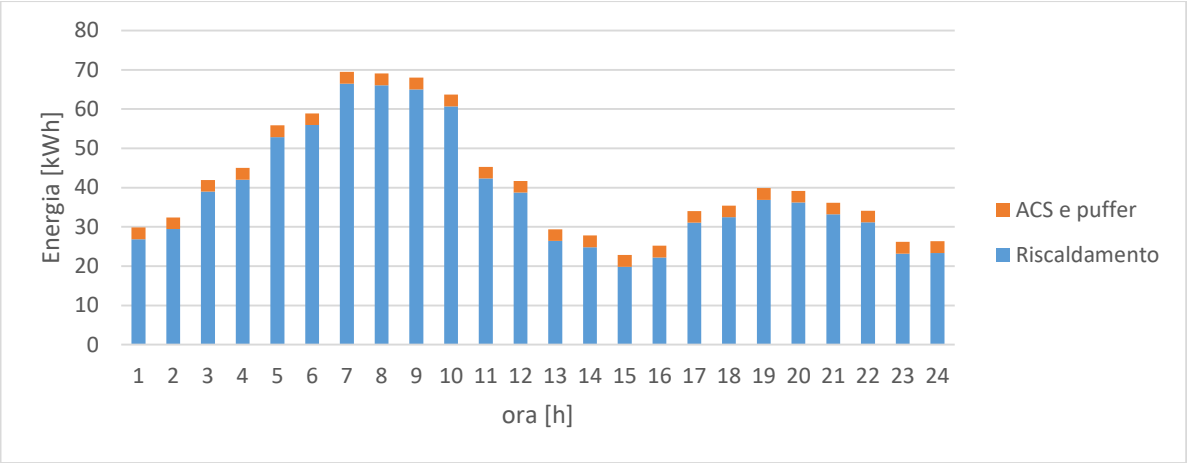


Figura 52 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 4 nel mese di Febbraio, Sist.1 Config.1

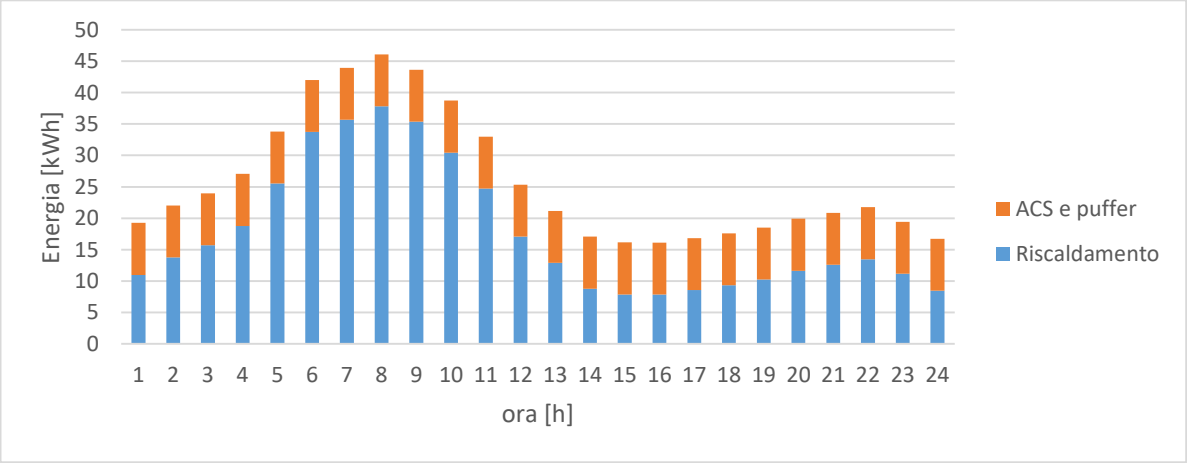


Figura 53 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 3 nel mese di Marzo, Sist.1 Config.1

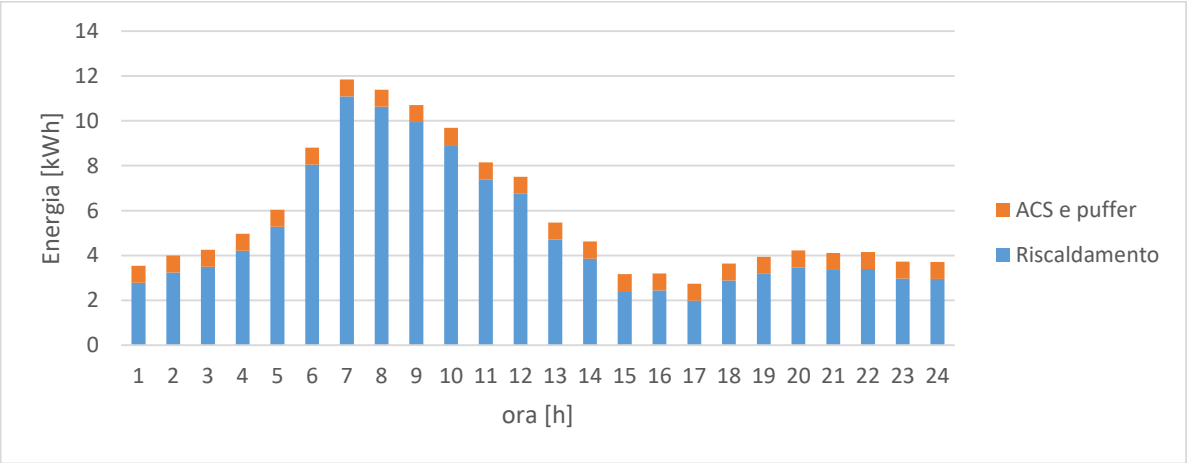


Figura 54 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 6 nel mese di Aprile, Sist.1 Config.1

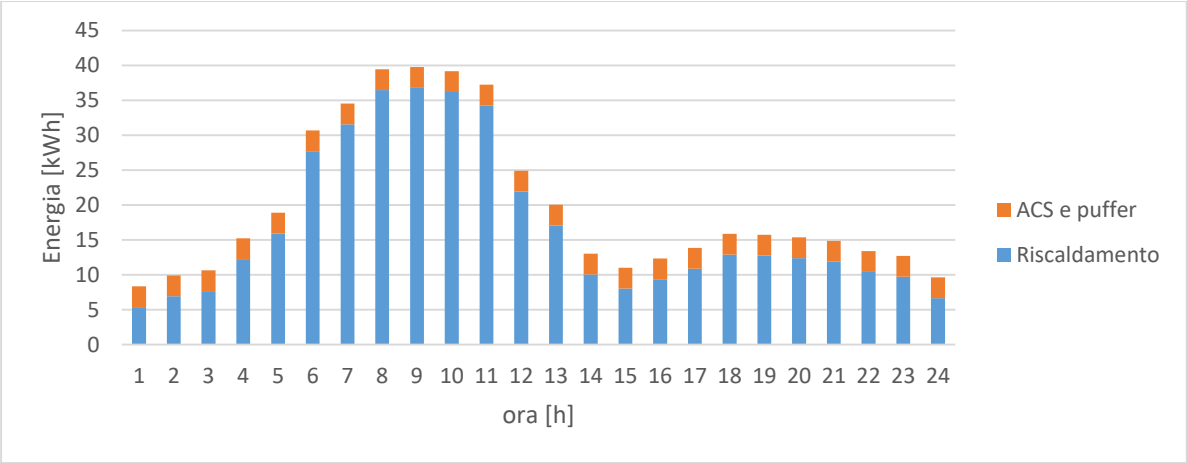


Figura 55 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 5 nel mese di Ottobre, Sist.1 Config.1

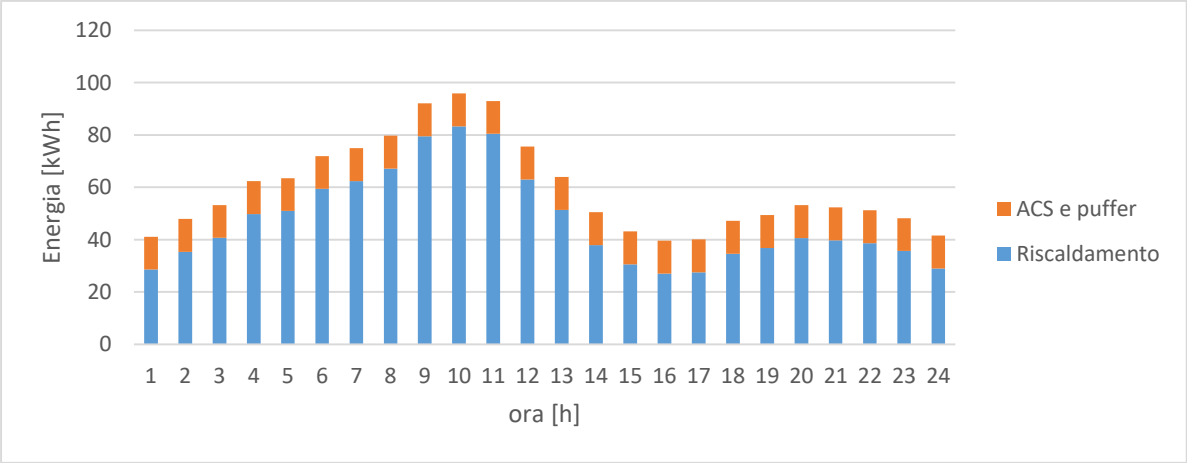


Figura 56 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 2 nel mese di Novembre, Sist.1 Config.1

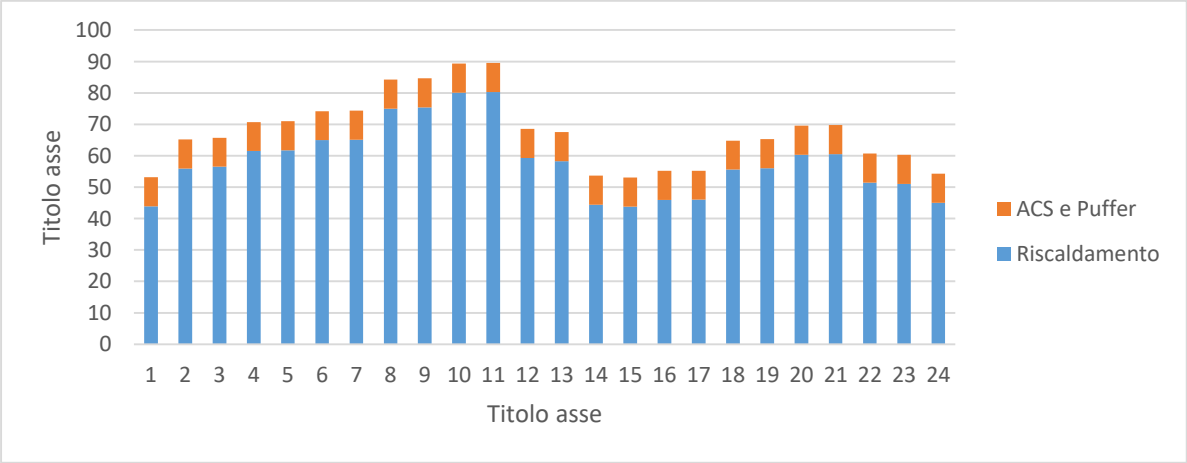


Figura 57 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 1 nel mese di Dicembre, Sist.1 Config.1

Per evidenziare l'unica modalità di funzionamento all'interno dell'ora di lavoro gli istogrammi delle due mandate a differente temperatura sono stati impilati. La macchina infatti soddisfa contemporaneamente i due fabbisogni termici sfruttando lo stadio di desurriscaldamento del fluido frigorifero per fornire la richiesta del puffer di ACS a più alta temperatura, andando a completare la condensazione nella produzione di riscaldamento a temperatura minore.

Configurazione 2

La differenza rispetto alla precedente configurazione consiste nel fatto che la pompa di calore non lavora fornendo una potenza costante all'interno dell'ora, pari al fabbisogno di richiesta di riscaldamento, bensì lavora ad una potenza pari all'80% della potena nominale ovvero impiega meno di un'ora a coprire il fabbisogno di riscaldamento. La restante parte del tempo la macchina fornisce solamente la potenza necessaria all'ACS e all'accumulo, come nella prima regolazione. L'energia totale fornita in un'ora dalla pompa di calore sarà data dalla potenza di funzionamento in ACS più 80% della potenza nominale per il tempo in cui la macchina fornirà il doppio servizio, più la potenza in cui la macchina lavorerà in sola ACS e accumulo per il restante tempo. Anche in questo caso le prestazioni sono calcolate unicamente per una mandata di 55°C ma saranno suddivise in base ai due regimi di funzionamento in un termine che comprende riscaldamento e ACS più accumulo e un termine per la sola ACS. Anche in questo caso si procede al calcolo dell'energia assorbita dal compressore e alle prestazioni globali del sistema, come nella configurazione precedente. La differenza è che avendo due regimi diversi anche l'energia assorbita dal compressore sarà diversa a seconda del funzionamento combinato o solo in produzione ACS ma le relazioni utilizzate restano le stesse usate anche per il Sistema 0. Si riporta dalla Tab.21 alla 27 il riepilogo per le sette sottocentrali, come fatto nella precedente configurazione considerata e per il sistema 0, in cui si mostrano i risultati energetici e prestazionali per i mesi della stagione di riscaldamento in questa seconda configurazione.

Tabella 21: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 7 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S7						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	28712	1599	30312	3,10	3,01	3,07
FEBBRAIO	18915	1037	19952	3,09	2,96	3,03
MARZO	10411	539	10950	3,04	2,77	2,90
APRILE	6583	300	6882	2,89	2,50	2,68
OTTOBRE	7831	363	8194	2,91	2,49	2,70
NOVEMBRE	15156	798	15954	3,05	2,86	2,95
DICEMBRE	21556	1184	22740	3,08	3,02	3,04
STAGIONE RISCALDAMENTO	**109164**	**5821**	**114985**	**3,10**	**2,49**	**2,91**

Tabella 22: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 4 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S4						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	13584	740	14324	3,05	2,99	3,03
FEBBRAIO	8836	474	9310	3,04	2,93	2,99
MARZO	5444	278	5722	3,00	2,75	2,87
APRILE	3154	147	3301	2,91	2,54	2,72
OTTOBRE	4975	240	5215	2,95	2,55	2,76
NOVEMBRE	6408	324	6733	2,98	2,79	2,88
DICEMBRE	11718	623	12341	3,02	2,95	2,98
STAGIONE RISCALDAMENTO	**54119**	**2826**	**56945**	**3,05**	**2,54**	**2,89**

Tabella 23: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 3 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S3						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	13799	750	14549	3,05	2,97	3,02
FEBBRAIO	7676	404	8080	3,02	2,87	2,95
MARZO	6551	315	6866	2,95	2,62	2,77
APRILE	2454	109	2563	2,84	2,46	2,63
OTTOBRE	4385	202	4587	2,89	2,48	2,69
NOVEMBRE	7851	396	8247	2,98	2,77	2,87
DICEMBRE	11828	635	12463	3,03	2,97	3,00
STAGIONE RISCALDAMENTO	**54543**	**2810**	**57354**	**3,05**	**2,46**	**2,85**

Tabella 24: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 6 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S6						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	5624	322	5946	3,13	3,13	3,13
FEBBRAIO	3164	181	3345	3,13	3,13	3,13
MARZO	1717	98	1815	3,13	3,13	3,13
APRILE	1315	70	1385	3,07	2,80	2,95
OTTOBRE	1909	99	2008	3,06	2,68	2,89
NOVEMBRE	2880	154	3033	3,07	2,89	2,98
DICEMBRE	5284	296	5581	3,12	3,06	3,09
STAGIONE RISCALDAMENTO	**21893**	**1220**	**23113**	**3,13**	**2,68**	**3,04**

Tabella 25: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 5 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S5						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	13379	730	14110	3,05	3,00	3,03
FEBBRAIO	9360	488	9847	3,02	2,83	2,93
MARZO	5350	268	5618	2,99	2,71	2,84
APRILE	3521	161	3682	2,89	2,51	2,69
OTTOBRE	4849	246	5096	3,00	2,67	2,86
NOVEMBRE	8869	467	9335	3,03	2,88	2,95
DICEMBRE	13178	706	13884	3,03	2,96	2,99
STAGIONE RISCALDAMENTO	**58506**	**3066**	**61572**	**3,05**	**2,51**	**2,90**

Tabella 26: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 2 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 2

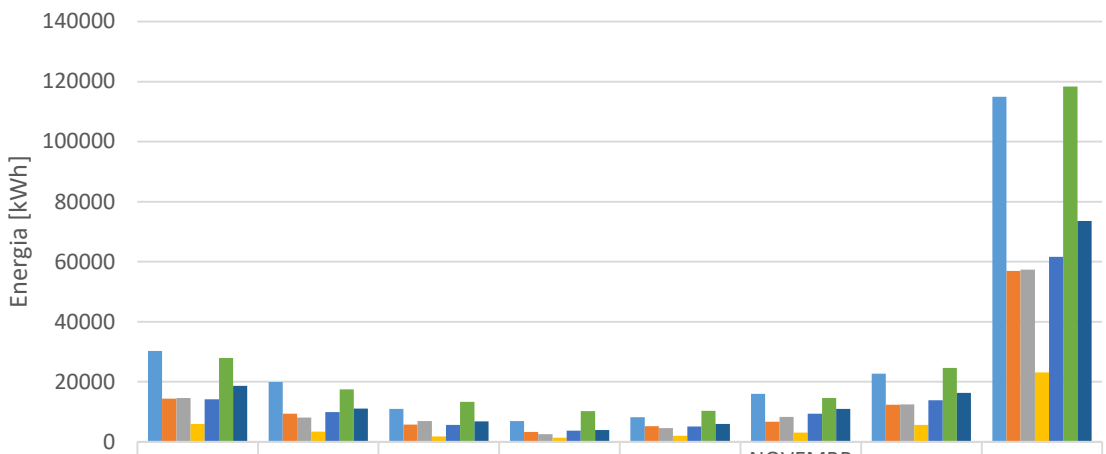
RIEPILOGO MENSILE-S2						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	26452	1447	27899	3,08	2,94	3,03
FEBBRAIO	16590	877	17467	3,06	2,84	2,96
MARZO	12648	631	13279	3,01	2,69	2,83
APRILE	9726	470	10196	2,98	2,61	2,78
OTTOBRE	9816	493	10309	3,01	2,62	2,83
NOVEMBRE	13878	721	14599	3,03	2,83	2,93
DICEMBRE	23318	1259	24577	3,06	2,97	3,01
STAGIONE RISCALDAMENTO	**112428**	**5898**	**118326**	**3,08**	**2,61**	**2,91**

Tabella 26: Riepilogo dei consumi e delle prestazioni della sottocentrale 1 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1, Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S1						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	17615	1006	18621	3,15	3,06	3,12
FEBBRAIO	10481	583	11064	3,13	2,97	3,06
MARZO	6424	337	6761	3,08	2,78	2,92
APRILE	3759	176	3935	2,94	2,54	2,72
OTTOBRE	5595	296	5891	3,09	2,73	2,93
NOVEMBRE	10414	575	10989	3,12	2,97	3,04
DICEMBRE	15429	863	16292	3,12	3,04	3,08
STAGIONE RISCALDAMENTO	**69717**	**3835**	**73552**	**3,15**	**2,54**	**2,98**

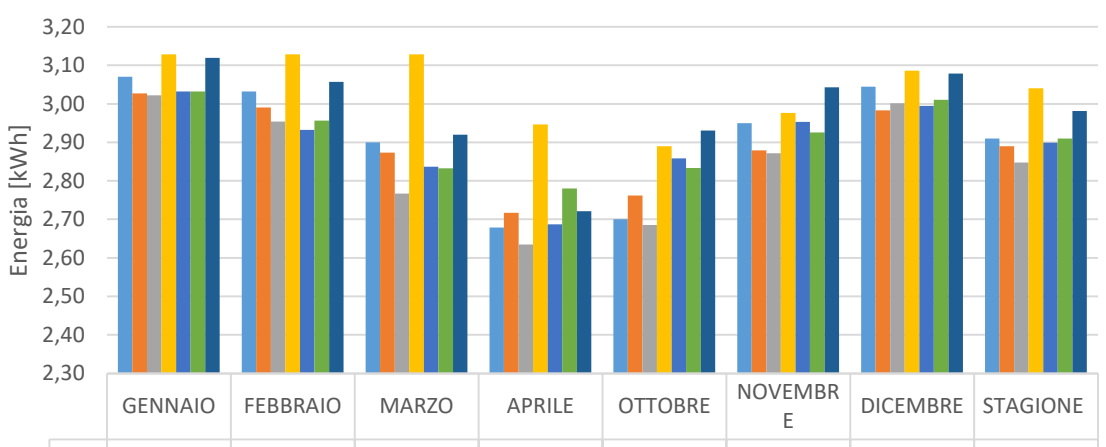
Osservando le tabelle di riepilogo si può notare come anche in questa configurazione i risultati energetici sono ben lontani dagli omologhi del sistema 0. Generalmente però presentano un trend migliore rispetto alla configurazione 1 soprattutto nelle sottocentrali 7 e 2 dove la richiesta di ACS è minore. Qui si riscontrano dei consumi che sono un 10% inferiori a quelli della configurazione 1 grazie alla parzializzazione minore (lavorare con l'80% di potenza nominale permette di raggiungere i valori massimi di COP per una mandata di 55°C). Si riporta in Fig.58 l'istogramma dei consumi delle sette sottocentrali nella stagione di riscaldamento. I valori riportati corrispondono alla colonna "Energia

Elettrica assorbita totale" delle tabelle di riepilogo viste in precedenza. In Fig. 59 si riporta lo stesso confronto ma relativo alle prestazioni medie. In questo caso i valori riportati corrispondono all'ultima colonna delle stesse tabelle di riepilogo.



	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE	STAGIONE
S7	30312	19952	10950	6882	8194	15954	22740	114985
S4	14324	9310	5722	3301	5215	6733	12341	56945
S3	14549	8080	6866	2563	4587	8247	12463	57354
S6	5946	3345	1815	1385	2008	3033	5581	23113
S5	14110	9847	5618	3682	5096	9335	13884	61572
S2	27899	17467	13279	10196	10309	14599	24577	118326
S1	18621	11064	6761	3935	5891	10989	16292	73552

Figura 58 - Riepilogo dei consumi di energia elettrica delle sottocentrali per il Sistema 1 nella Config. 2



	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE	STAGIONE
S7	3,07	3,03	2,90	2,68	2,70	2,95	3,04	2,91
S4	3,03	2,99	2,87	2,72	2,76	2,88	2,98	2,89
S3	3,02	2,95	2,77	2,63	2,69	2,87	3,00	2,85
S6	3,13	3,13	3,13	2,95	2,89	2,98	3,09	3,04
S5	3,03	2,93	2,84	2,69	2,86	2,95	2,99	2,90
S2	3,03	2,96	2,83	2,78	2,83	2,93	3,01	2,91
S1	3,12	3,06	2,92	2,72	2,93	3,04	3,08	2,98

Figura 59 - Riepilogo delle prestazioni medie delle sottocentrali nella Config.2 del Sistema 1

Osservando la Fig.52 si può notare che i risultati energetici presentano un trend simile alla configurazione precedente anche se, come detto nel commento alle tabelle sopra, i valori numerici sono inferiori di circa il 10% . Il trend è differente invece nell'istogramma delle

performance (Fig.53). In generale i valori di COP calcolati sono anch'essi circa il 10% maggiori rispetto agli omologhi della prima configurazione ma si nota come in questa configurazione il COP globale medio maggiore lo presenta la sottocentrale 6 mentre nella configurazione precedente i valori di COP erano praticamente sullo stesso livello numerico per tutte le sottocentrali. Questo comportamento è dovuto alla richiesta quasi nulla di ACS per la sottocentrale 6 per buona parte dei giorni considerati cosa che evita alla macchina di lavorare in solo ACS e accumulo, con una forte parzializzazione (nell'ordine del 10% della potenza nominale) e riduzione delle prestazioni. Dalla Fig.60 a 66 si riporta il funzionamento orario della pompa di calore installata in ogni sottocentrale, nella stagione di riscaldamento in questa seconda configurazione del sistema 1, considerando i profili più significativi di ogni sottocentrale. E' importante ricordare che la macchina funziona in questa configurazione soddisfacendo contemporaneamente la richiesta di riscaldamento e di ACS + puffer lavorando all'80% della potenza nominale e per la restante parte del tempo lavora in sola ACS e puffer, modulando la potenza in base al funzionamento del puffer.

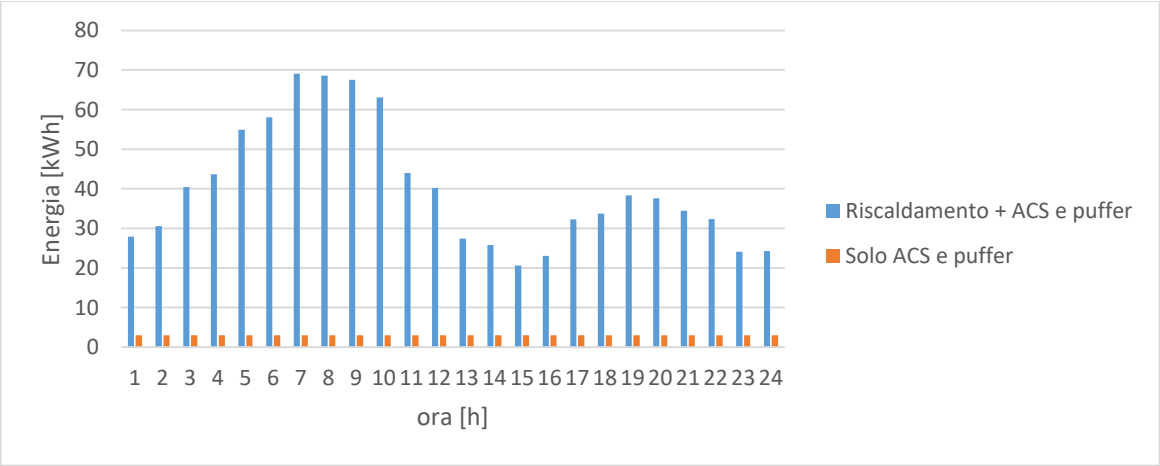


Figura 60 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 7 nel mese di Gennaio, Sist.1 Config.2

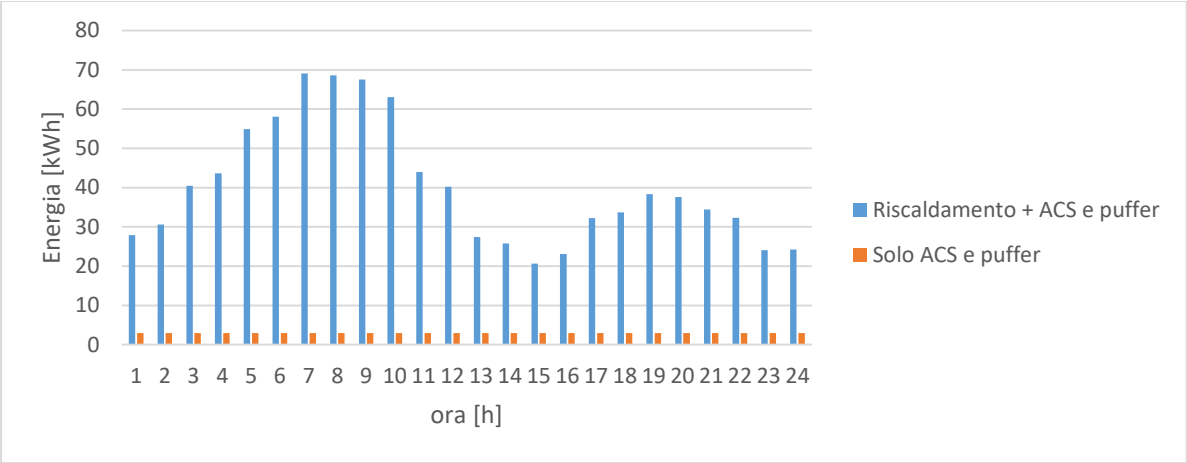


Figura 61 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 4 nel mese di Febbraio, Sist.1 Config.2

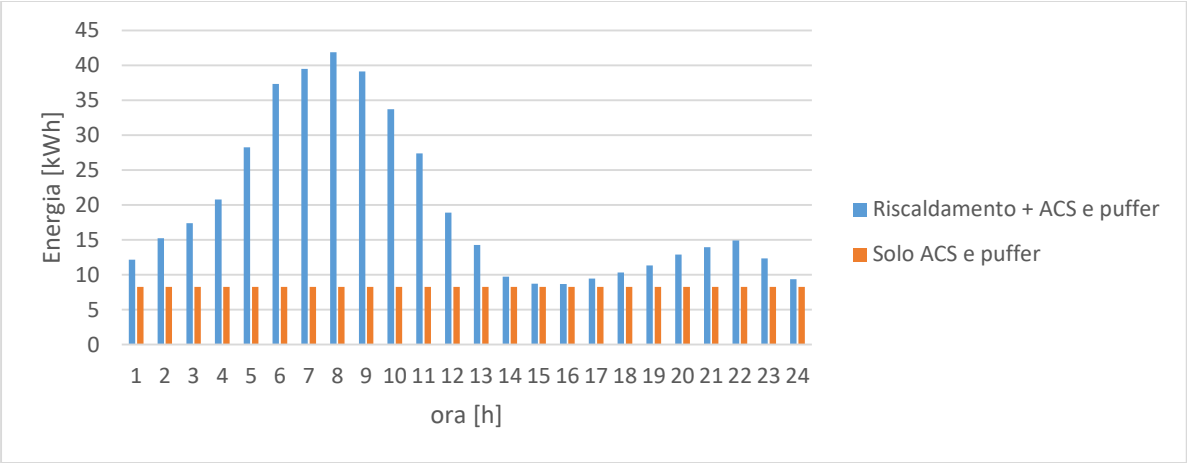


Figura 62 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 3 nel mese di Marzo, Sist.1 Config.2

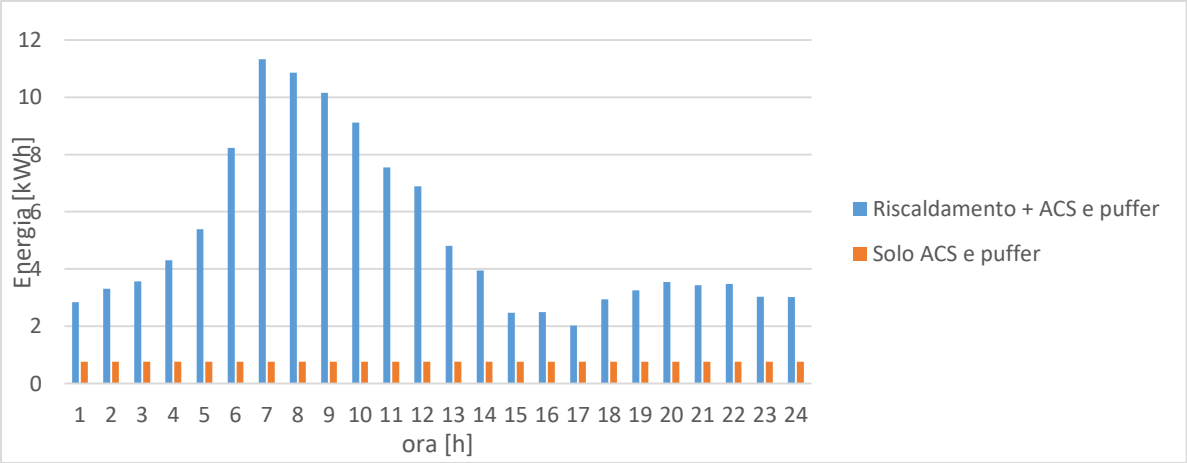


Figura 63 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 6 nel mese di Aprile, Sist.1 Config.2

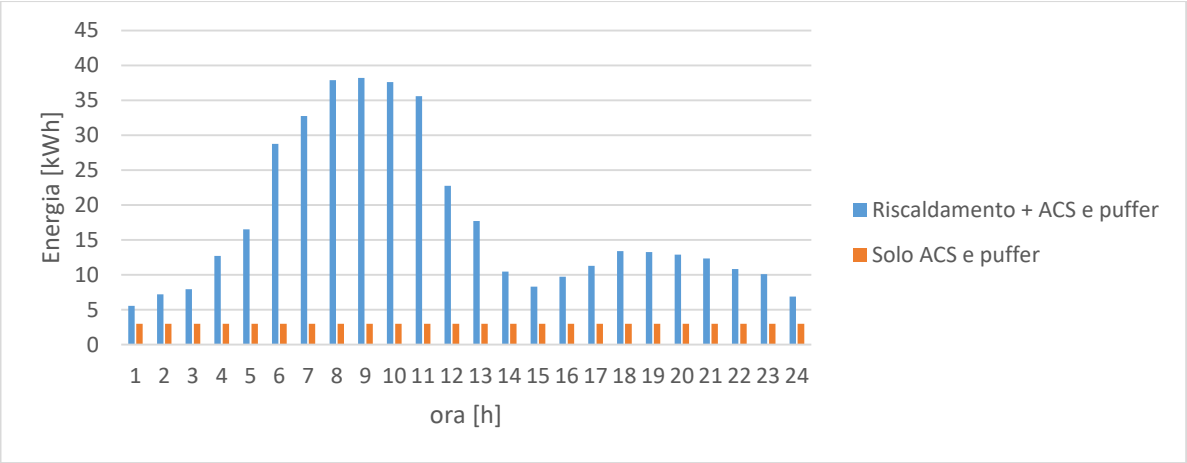


Figura 64 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 5 nel mese di Ottobre, Sist.1 Config.2

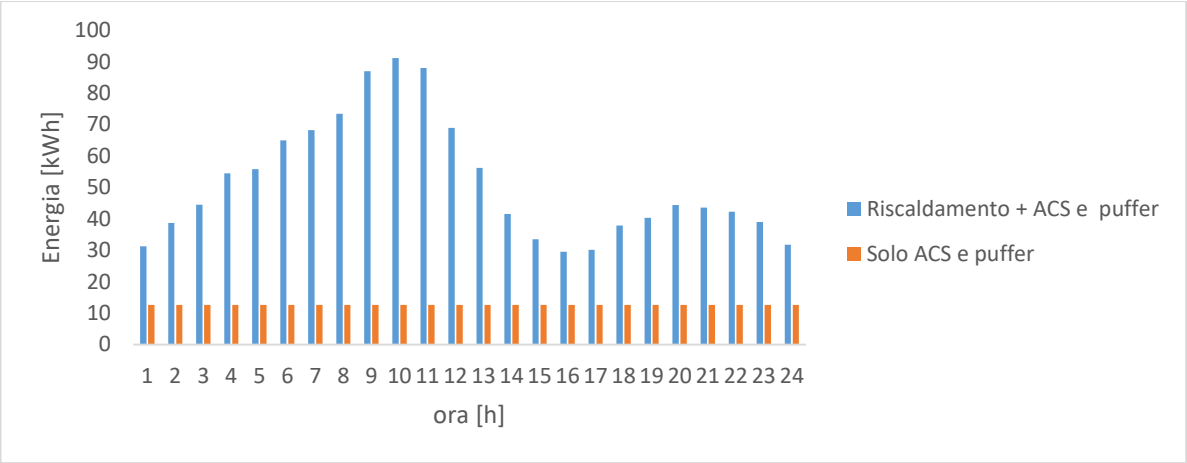


Figura 65 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 2 nel mese di Novembre, Sist.1 Config.2

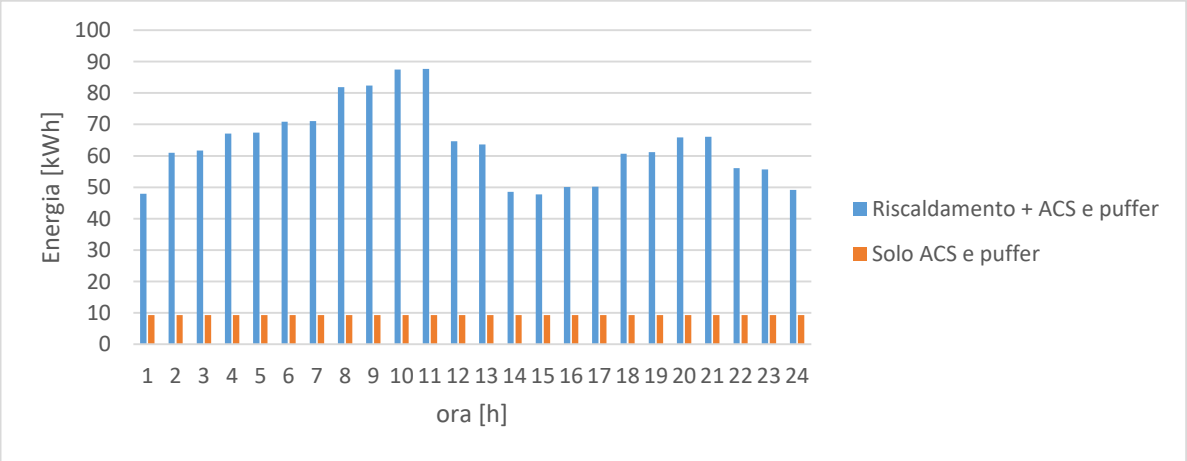


Figura 66 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 1 nel mese di Dicembre, Sist.1 Config.2

Per evidenziare le due diverse modalità di funzionamento gli istogrammi sono stati affiancati e non impilati come invece si è fatto nella configurazione precedente.

Configurazione 3

La terza configurazione prevede che la macchina lavori prima per soddisfare la richiesta di ACS e accumulo a potenza fissa pari al 50% della P_{nom}, all'interno dell'ora, e poi per il restante tempo soddisfi la richiesta energetica di riscaldamento, funzionando in modulazione. Questa configurazione è quella che più si avvicina al sistema semplice 0 in quanto la macchina non soddisfa mai contemporaneamente i due fabbisogni richiesti (riscaldamento e ACS). In questo modo si hanno due regimi di funzionamento ben diversi uno legato ad una mandata di 55°C per la richiesta di ACS e uno per il funzionamento a 42°C per la richiesta di riscaldamento. Il procedimento di calcolo del modello è simile alla prima configurazione ipotizzata. Dopo aver calcolato i tempi di funzionamento della pompa di calore nelle due modalità si procede al calcolo dell'energia elettrica assorbita nelle due modalità fino ad ottenere il valore di COP globale del sistema per ogni sottocentrale durante tutti i mesi della stagione di riscaldamento. Anche per questa configurazione si riportano in tabelle di riepilogo i valore di energia elettrica richiesta per il funzionamento dell'impianto nonché i parametri prestazionali massimi, minimi e medi (Tab.27 a 33).

Tabella 27: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 7 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1 Configurazione 3

RIEPILOGO MENSILE-S7						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	20991	1833	22825	4,18	3,76	4,06
FEBBRAIO	14380	1134	15515	4,18	3,52	3,86
MARZO	8620	500	9120	3,87	3,21	3,44
APRILE	5588	170	5758	3,42	3,13	3,21
OTTOBRE	6608	226	6834	3,49	3,14	3,25
NOVEMBRE	12138	792	12930	3,97	3,38	3,61
DICEMBRE	16339	1301	17640	4,11	3,75	3,91
STAGIONE RISCALDAMENTO	**84665**	**5957**	**90622**	**4,18**	**3,13**	**3,62**

Tabella 28: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 4 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1 Configurazione 3

RIEPILOGO MENSILE-S4						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	9831	843	10674	4,16	3,74	4,04
FEBBRAIO	6692	520	7212	4,14	3,48	3,82
MARZO	4448	267	4714	3,89	3,19	3,44
APRILE	2694	107	2801	3,48	3,08	3,20
OTTOBRE	4116	197	4313	3,70	3,10	3,32
NOVEMBRE	5204	310	5514	3,83	3,28	3,49
DICEMBRE	8793	699	9492	4,04	3,71	3,87
STAGIONE RISCALDAMENTO	**41777**	**2942**	**44719**	**4,16**	**3,08**	**3,60**

Tabella 29: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 3 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1 Configurazione 3

RIEPILOGO MENSILE-S3						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	10020	859	10879	4,14	3,73	4,03
FEBBRAIO	5966	428	6394	4,05	3,38	3,69
MARZO	5361	259	5619	3,76	3,15	3,36
APRILE	2099	64	2163	3,31	3,07	3,14
OTTOBRE	3669	137	3807	3,53	3,09	3,24
NOVEMBRE	6274	385	6659	3,88	3,31	3,54
DICEMBRE	8787	714	9501	4,09	3,77	3,93
STAGIONE RISCALDAMENTO	**42176**	**2846**	**45022**	**4,14**	**3,07**	**3,56**

Tabella 30: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 6 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1 Configurazione 3

RIEPILOGO MENSILE-S6						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	4005	362	4367	4,37	3,91	4,23
FEBBRAIO	2413	200	2613	4,30	3,59	3,94
MARZO	1445	105	1550	4,01	3,29	3,55
APRILE	1135	64	1199	3,73	3,19	3,37
OTTOBRE	1585	88	1673	3,84	3,20	3,43
NOVEMBRE	2314	150	2464	4,00	3,40	3,64
DICEMBRE	3894	334	4228	4,23	3,90	4,06
STAGIONE RISCALDAMENTO	**16791**	**1302**	**18093**	**4,37**	**3,19**	**3,75**

Tabella 31: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 5 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1 Configurazione 3

RIEPILOGO MENSILE-S5						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	9652	829	10481	4,19	3,76	4,06
FEBBRAIO	7205	526	7731	4,02	3,40	3,71
MARZO	4393	246	4639	3,83	3,17	3,40
APRILE	2983	108	3091	3,47	3,09	3,20
OTTOBRE	3993	233	4226	3,83	3,12	3,39
NOVEMBRE	6847	498	7345	4,07	3,45	3,72
DICEMBRE	9770	812	10582	4,05	3,78	3,92
STAGIONE RISCALDAMENTO	**44843**	**3252**	**48095**	**4,19**	**3,09**	**3,63**

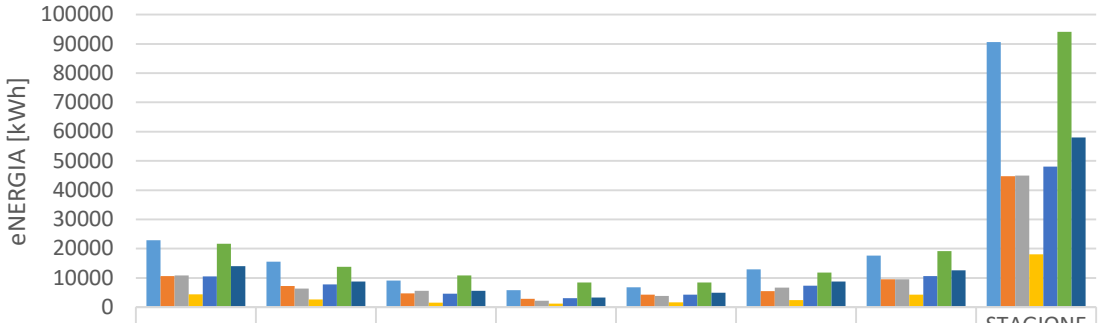
Tabella 32: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 2 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1 Configurazione 3

RIEPILOGO MENSILE-S2						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	19858	1763	21620	3,98	3,66	3,91
FEBBRAIO	12904	944	13848	4,00	3,41	3,71
MARZO	10284	554	10838	3,87	3,21	3,44
APRILE	8075	360	8435	3,74	3,16	3,35
OTTOBRE	8052	432	8484	3,84	3,15	3,41
NOVEMBRE	11082	715	11797	3,95	3,36	3,60
DICEMBRE	17639	1480	19119	3,98	3,73	3,87
STAGIONE RISCALDAMENTO	**87893**	**6249**	**94141**	**4,00**	**3,15**	**3,61**

Tabella 33: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 1 nella stagione di riscaldamento - Sistema 1 Configurazione 3

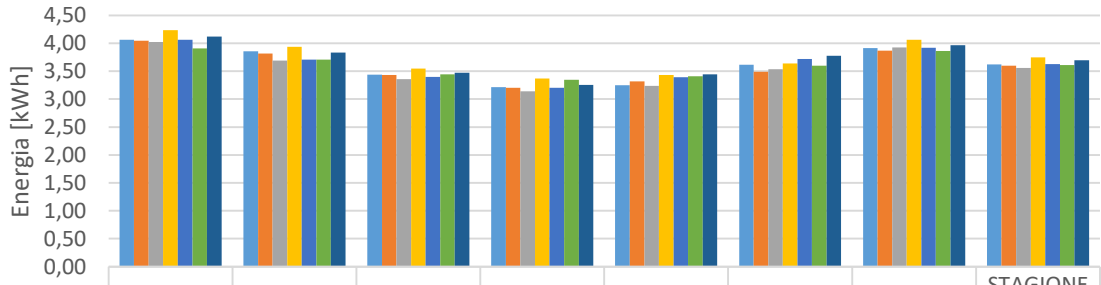
RIEPILOGO MENSILE-S1						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	12898	1149	14047	4,24	3,82	4,12
FEBBRAIO	8117	621	8738	4,18	3,51	3,83
MARZO	5332	302	5633	3,89	3,25	3,47
APRILE	3202	101	3303	3,45	3,18	3,26
OTTOBRE	4679	270	4949	3,86	3,20	3,45
NOVEMBRE	8167	600	8767	4,15	3,51	3,78
DICEMBRE	11642	970	12612	4,13	3,81	3,97
STAGIONE RISCALDAMENTO	**54037**	**4013**	**58050**	**4,24**	**3,18**	**3,70**

Come si può notare dall'analisi delle tabelle riepilogative appena riportate, l'energia elettrica assorbita per il funzionamento delle sottocentrali è in media il 30% inferiore rispetto alla prima configurazione che è quella che presenta i risultati energetici peggiori e un 20% inferiore rispetto alla seconda configurazione. Il trend è analogo anche per i valori medi di COP nell'intera stagione di riscaldamento. Si riporta un riepilogo del comportamento del polo residenziale in Fig.67 per i consumi di energia elettrica e in Fig. 68 per i valori medi prestazionali. Osservando i due grafici si può notare come l'andamento dei consumi per sottocentrale cosi come quello dell'intero polo residenziale sia simile alle due configurazioni precedenti, ovviamente con valori numerici molto inferiori, mentre l'andamento delle prestazioni si avvicina a quello della prima configurazione con valori numerici circa costanti da sottocentrale a sottocentrale.



	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE	STAGIONE RISCALDAMENTO
S7	22825	15515	9120	5758	6834	12930	17640	90622
S4	10674	7212	4714	2801	4313	5514	9492	44719
S3	10879	6394	5619	2163	3807	6659	9501	45022
S6	4367	2613	1550	1199	1673	2464	4228	18093
S5	10481	7731	4639	3091	4226	7345	10582	48095
S2	21620	13848	10838	8435	8484	11797	19119	94141
S1	14047	8738	5633	3303	4949	8767	12612	58050

Figura 67 - Riepilogo dei consumi di energia elettrica delle sottocentrali per il Sistema 1 nella Config. 3



	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE	STAGIONE RISCALDAMENTO
S7	4,06	3,86	3,44	3,21	3,25	3,61	3,91	3,62
S4	4,04	3,82	3,44	3,20	3,32	3,49	3,87	3,60
S3	4,03	3,69	3,36	3,14	3,24	3,54	3,93	3,56
S6	4,23	3,94	3,55	3,37	3,43	3,64	4,06	3,75
S5	4,06	3,71	3,40	3,20	3,39	3,72	3,92	3,63
S2	3,91	3,71	3,44	3,35	3,41	3,60	3,87	3,61
S1	4,12	3,83	3,47	3,26	3,45	3,78	3,97	3,70

Figura 68 - Riepilogo delle prestazioni medie delle sottocentrali nella Config.3 del Sistema 1

Dalla Fig.69 a 75 si riporta il funzionamento orario della pompa di calore installata in ogni sottocentrela, nella stagione di riscaldamento in questa terza configurazione del sistema 1, riportando per completezza un profilo per sottocentrale. E' importante ricordare che la macchina funziona in questa configurazione soddisfacendo prima la richiesta di ACS e

puffer che ha ordine prioritario con una mandata a 55°C e poi nella restante parte dell'ora soddisfa il fabbisogno di riscaldamento con una mandata a 42°C.

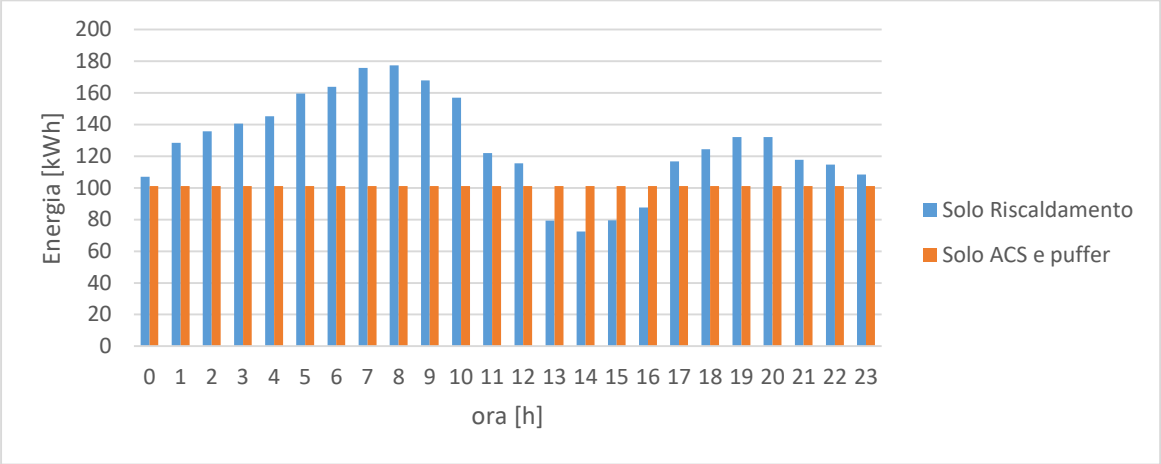


Figura 69 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 7 nel mese di Gennaio, Sist.1 Config.3

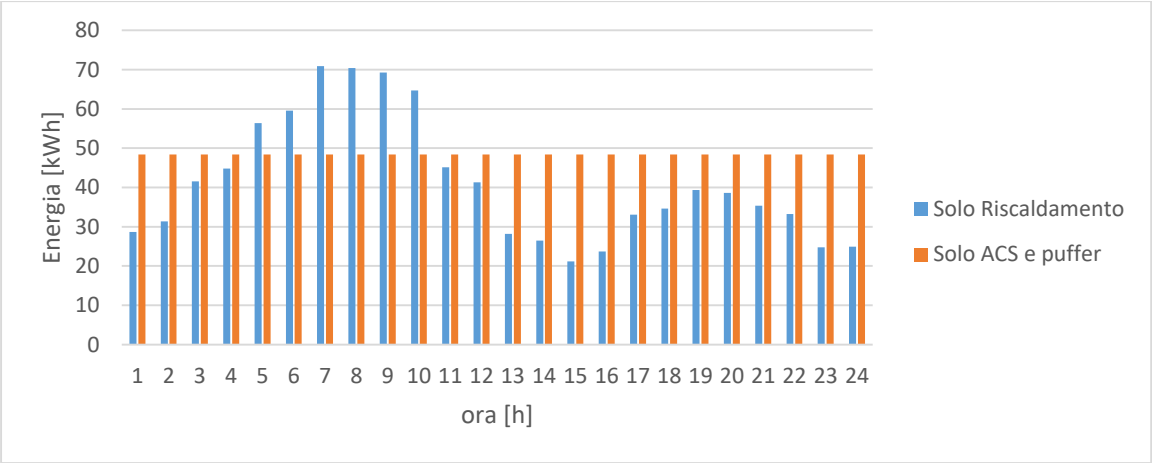


Figura 70 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 4 nel mese di Febbraio, Sist.1 Config.3

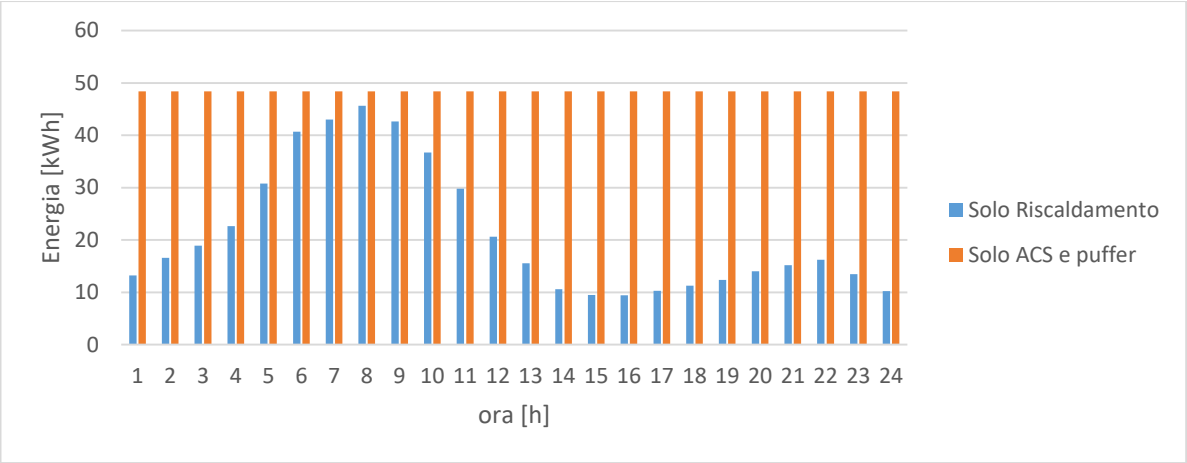


Figura 71 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 3 nel mese di Marzo, Sist.1 Config.3

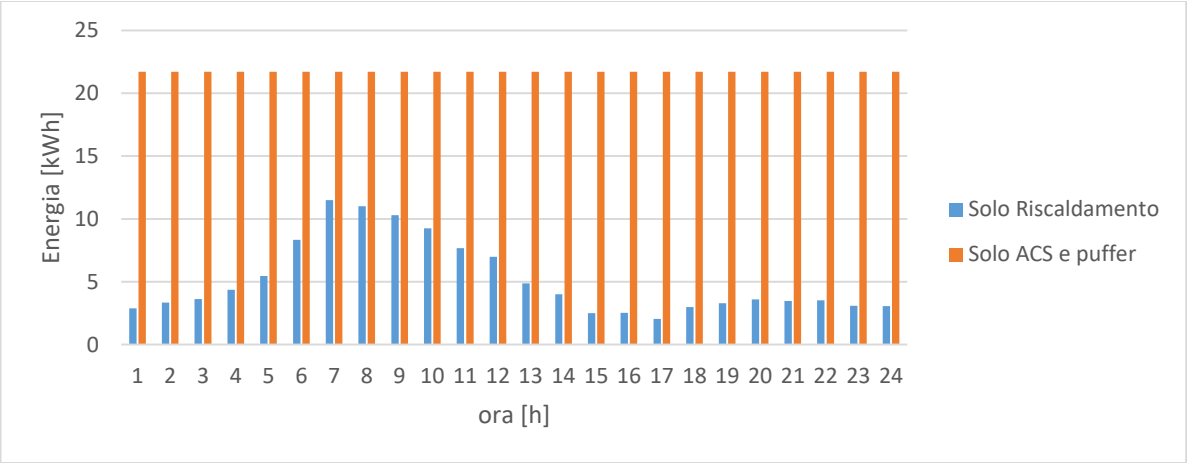


Figura 72 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 6 nel mese di Aprile, Sist.1 Config.3

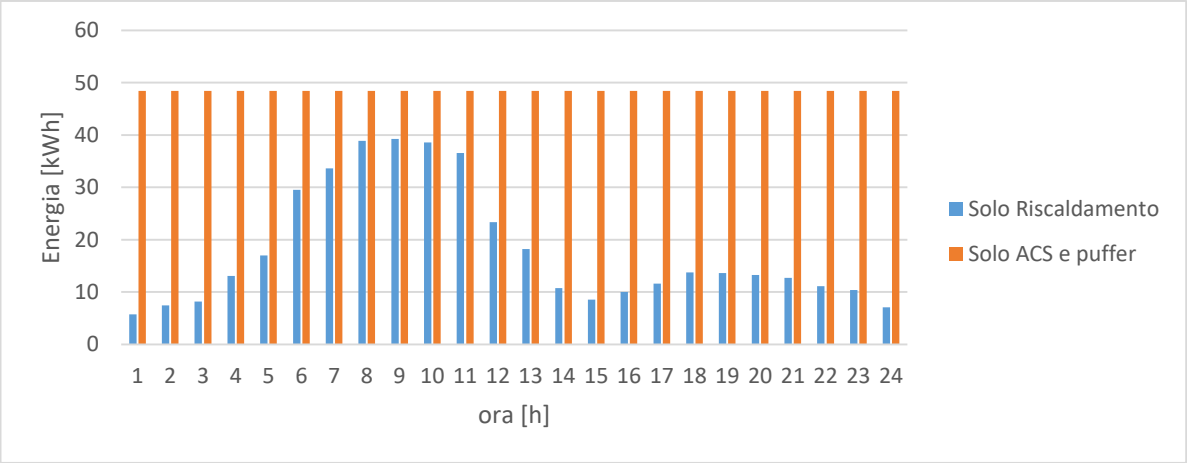


Figura 73 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 5 nel mese di Ottobre, Sist.1 Config.3

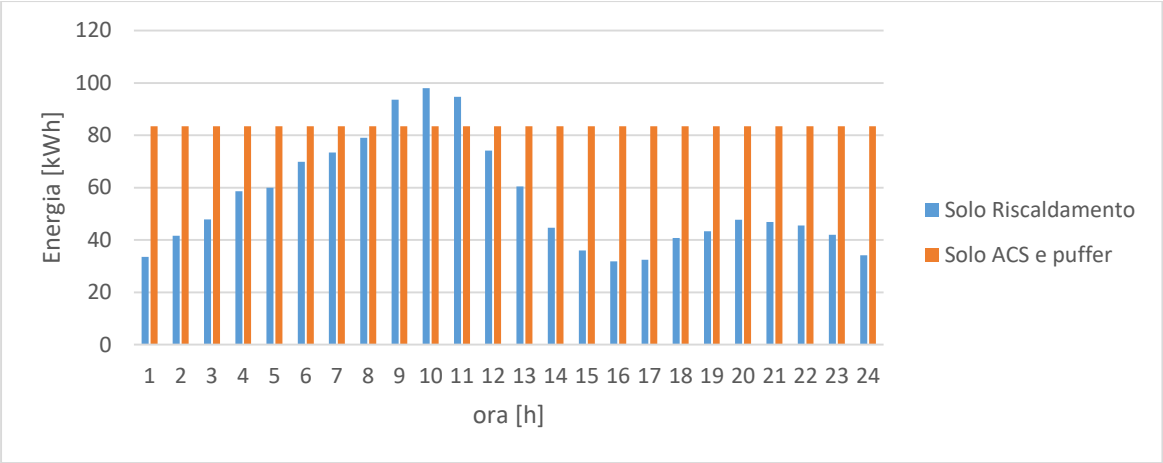


Figura 74 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 2 nel mese di Novembre, Sist.1 Config.3

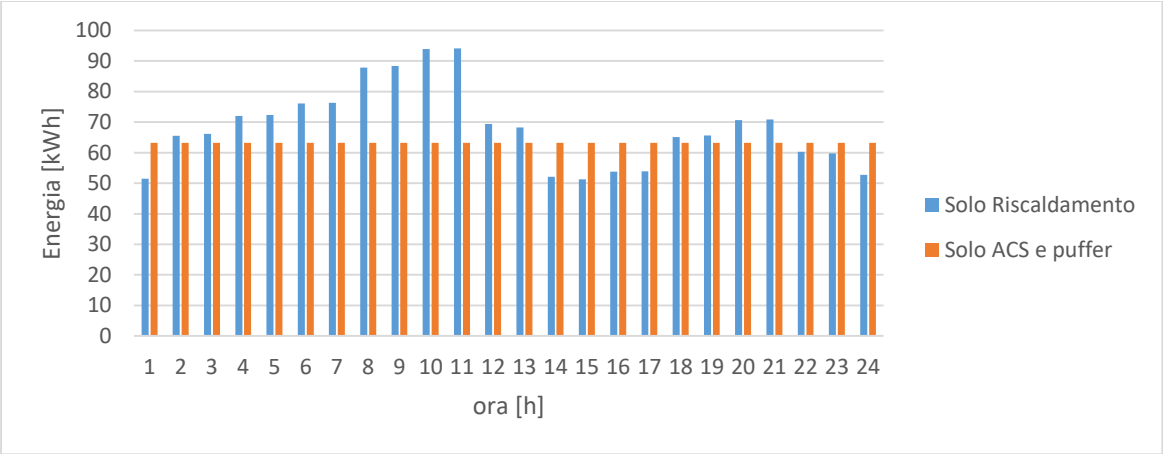


Figura 75 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 1 nel mese di Dicembre, Sist.1 Config.3

Anche in questo caso, per evidenziare le due diverse modalità di funzionamento gli istogrammi sono stati affiancati e non impilati come si è fatto nella prima configurazione. La principale differenza nelle tre configurazioni del **Sistema 1** appena esposte è rappresentata dal funzionamento della macchina, in particolare la sua parzializzazione. Nella prima configurazione la pompa di calore lavora con una parzializzazione maggiore degli altri due casi anche se il regime di funzionamento è costante durante tutto il corso dell'ora di funzionamento. Nella seconda configurazione la parzializzazione è la minore in assoluto, essendo la potenza di funzionamente fissa e pari all'80% della potenza nominale, ma influisce parecchio sulle performance il tempo in cui la macchina funziona in solo ACS e accumulo. La terza configurazione presenta una parzializzazione della macchina molto simile alla prima configurazione ma risulta la più ottimizzata in termini di prestazioni in quanto è quella che permette di sfruttare i valori di COP più alti in quanto lavora per la

maggior parte del tempo con una mandata a 42 °C . Questo si traduce in COP più alti soprattutto quelli minimi relativi ai periodi in cui c'è meno richiesta e quindi in generale si ha una diminuzione dell'energia elettrica richiesta dalla sottocentrale per il suo funzionamento. Nella seconda regolazione per alcuni periodi di tempo la macchina è costretta a lavorare solo per il fabbisogno di ACS e accumulo, arrivando ad una parzializzazione molto spinta con valori di COP molto bassi ma prevalgono i periodi in cui la machina lavora per entrambi i fabbisogni con COP che raggiungono i valori massimi per il regime di funzionamento a 55 °C. Durante questa fase i valori di energia in ingresso nella sottocentrale sono più bassi rispetto alla prima configurazione a parità di mandata perché la macchina funziona per lunghi periodi ad una potenza costante pari all'80% della potenza nominale (quindi è meno parzializzata e lavora nell'intorno del PLR in cui si hanno i rendimenti massimi) ma maggiori rispetto alla terza configurazione (che non è costretta a lavorare sempre a 55°C).

3.2.3 Il "Sistema 2"

La prima alternativa allo stato di fatto è rappresentata dal sistema energetico 2. Esso consiste in un estensione del sistema precedente in cui si è pensato di inserire un accumulo termico anche per le utenze di riscaldamento. Il questo sistema ci saranno dunque due tipi di accumulo uno dedicato esclusivamente all'ACS che segue le ipotesi di funzionamento mostrate nel Sistema 1 e uno esclusivamente per soddisfare i picchi di richiesta di riscaldamento alla temperatura di 42 °C. L'accumulo in questione sarà sempre di tipo puffer. Si riporta in Fig.76 lo schema d'impianto semplificato della seconda configurazione.

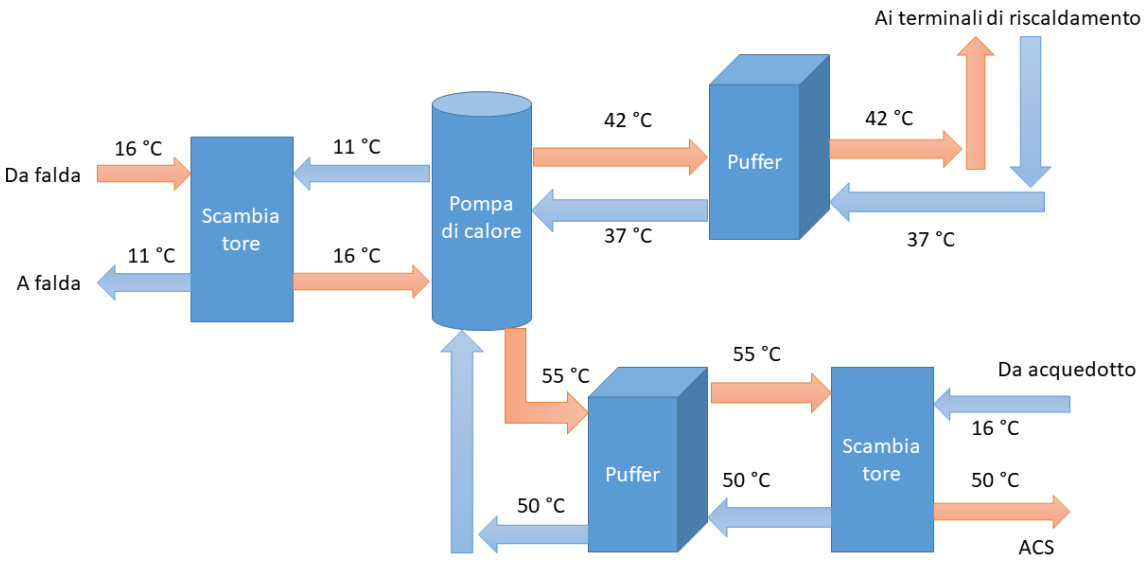


Figura 76 - Schema d'impianto semplificato della seconda configurazione

Il comportamento fisico dell'accumulo è identico a quello descritto per il caso 1. Si ipotizza che l'accumulo in questione sia perfettamente miscelato e non stratificato, ovvero da qualunque punto dell'accumulo si prelevi l'acqua tecnica per il riscaldamento, essa sarà alla stessa temperatura. Inoltre si sviluppa un modello di accumulo giornaliero, ovvero la carica e la scarica dell'accumulo si concludono nelle 24h che compongono il giorno in esame; in altre parole le condizioni iniziali dell'accumulo per t=0 coincidono con le condizioni finali a t=24. Per il caso 2 valgono inoltre tutte le ipotesi di funzionamento enunciate nel caso 0 e 1, per quanto riguarda la potenza e le prestazioni della pompa di calore nelle condizioni nominali e al carico parziale e i valori di temperature di

funzionamento, sia per la mandata verso le utenze sia per la temperatura delle sorgente fredda. Come per il caso 1, il primo passo all'interno del modello è quello di determinare un valore di potenza di funzionamento della pompa di calore che dovrà fornire al sistema di accumulo costantemente per tutta la giornata di funzionamento sia per l'ACS sia per il riscaldamento. Il procedimento per ricavare la Q_{funz} è lo stesso mostrato nel caso 1. Si ottiene ,per esempio, che in un giorno tipo di dicembre si ha una Q_{funz} che la pompa di calore deve fornire in ogni intervallo orario all'accumulo di 46 kWh. Questo valore di energia viene fornito dalla macchina lavorando costantemente ad una potenza di 46 kW. Si nota, come mostrato in Fig.77, che il valore di Q_{funz} calcolato è maggiore rispetto alla richiesta dell'utenza nelle prime ore del giorno per cui il sistema d'accumulo si starà caricando. Il vantaggio dell'accumulo risulta evidente nelle ore della giornata in cui sono presenti i picchi di richiesta di ACS. Si può osservare come per esempio alle ore 8-9 a.m o alle ore 20-21 p.m orari in cui è presente la massima richiesta di ACS la pompa di calore sia avvantaggiata dalla presenza dell'accumulo in quanto dovrà fornire solo 46 kWh invece di fornirne 60 kWh. Il resto dell'energia termica necessaria sarà fornita dall'accumulo.

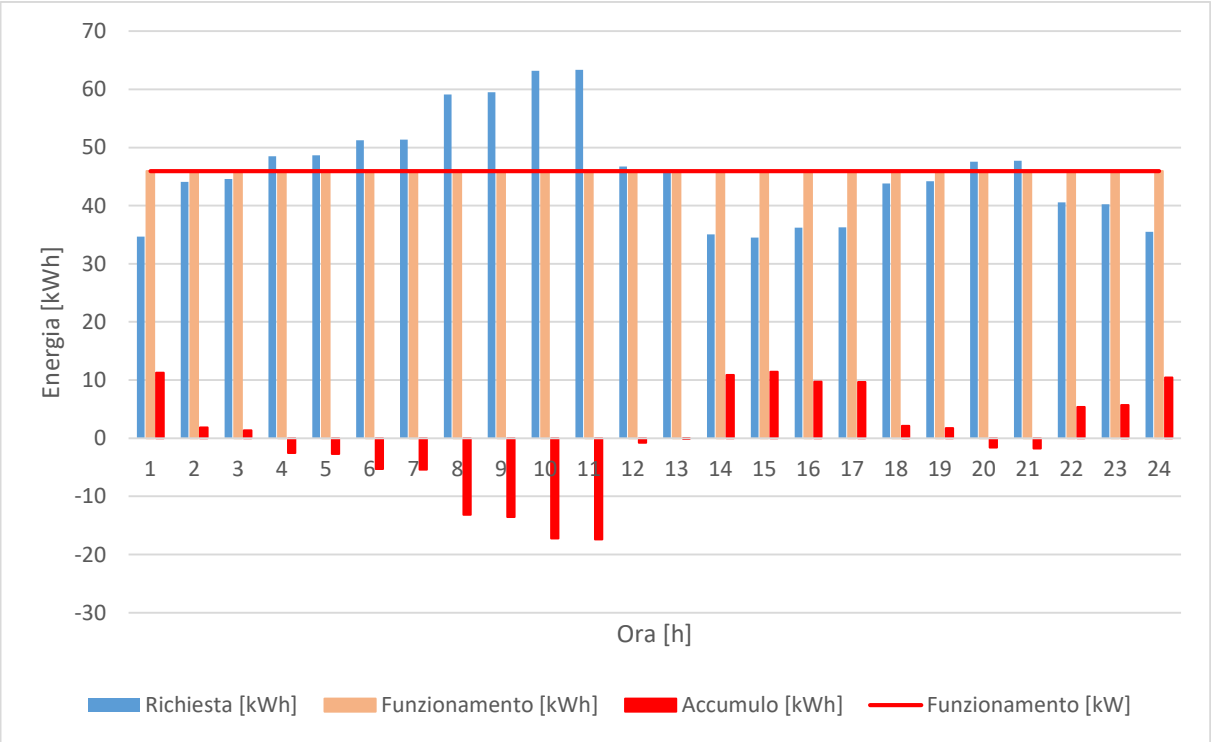


Figura 77 - Andamento della carica dell'accumulo del riscaldamento nel giorno tipo di Gennaio

Dopo aver determinato il comportamento dell'accumulo si procede a determinare il volume dell'accumulo. Il dimensionamento del volume d'accumulo si fa utilizzando un bilancio di energia di primo principio, come fatto per il caso dell'ACS e considerando il mese con il valore più alto di richiesta riscaldamento:

$$V = \frac{Q_{picco} * 3600}{\rho * c_p * \Delta T} \quad [m^3] \quad (31)$$

dove:

- Q_{picco} rappresenta il picco massimo della richiesta aggregata di riscaldamento espresso in kWh del mese più critico;
- ρ è la densità dell'acqua a 16°C approssimato a 1000 kg/m^3 ;
- c_p è il calore specifico dell'acqua pari a 4.186 kJ/kg/K;
- ΔT è la differenza di temperatura tra l'ingresso e l'uscita dall'accumulo puffer.

Si riportano in Tab. 19 le dimensioni in m^3 degli accumuli delle sette sottocentrali.

Tabella 34: Volumi d'accumulo delle sette sottocentrali - Riscaldamento

Sottocentrale	Volume accumulo [m^3]
S7	2.5
S4	1
S3	1
S6	0.5
S5	1
S2	2
S1	1.5

Una volta determinati i volumi d'accumulo si definiscono le prestazioni della pompa di calore nelle condizioni di funzionamento, come visto nel caso precedente. Anche qui è possibile ipotizzare due configurazioni del sistema:

Configurazione 1

La prima configurazione prevede che la macchina funziona a potenza costante all'interno dell'ora. In particolare verrà fornita contemporaneamente sia l'energia necessaria a soddisfare la richiesta di Riscaldamento e a caricare il relativo accumulo sia l'energia necessaria a soddisfare la richiesta di ACS e il relativo accumulo. La macchina in questa configurazione funzionerà costantemente con una mandata a 55 °C. Lo schema di calcolo del modello è uguale alla configurazione 1 del sistema 1, la differenza si riscontra nella potenza erogata per il riscaldamento che non sarà modulante in base alla richiesta delle utenze bensì è costante e pari alla Q_{funz} determinata per l'accumulo, come succede per l'ACS. Si riporta in Tab.35 a 41 il risultato numerico del modello di calcolo per le sette sottocentrali come riportato per le altre configurazioni.

Tabella 35: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 7 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S7						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	29123	1589	30712	3,03	3,03	3,03
FEBBRAIO	20021	1010	21032	2,89	2,89	2,89
MARZO	12101	498	12598	2,55	2,55	2,55
APRILE	7536	276	7812	2,39	2,39	2,39
OTTOBRE	8905	336	9242	2,43	2,43	2,43
NOVEMBRE	16550	763	17313	2,73	2,73	2,73
DICEMBRE	22718	1155	23874	2,90	2,90	2,90
STAGIONE RISCALDAMENTO	**116955**	**5628**	**122582**	**3,03**	**2,39**	**2,70**

Tabella 36: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 4 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S4						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	13866	733	14599	2,97	2,97	2,97
FEBBRAIO	9490	461	9952	2,82	2,82	2,82
MARZO	6357	260	6617	2,54	2,54	2,54
APRILE	3519	124	3643	2,34	2,34	2,34
OTTOBRE	4971	189	5160	2,44	2,44	2,44
NOVEMBRE	6677	280	6957	2,58	2,58	2,58
DICEMBRE	22718	572	23290	2,87	2,87	2,87
STAGIONE RISCALDAMENTO	**67599**	**2619**	**70218**	**2,97**	**2,34**	**2,65**

Tabella 37: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 3 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S3						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	14037	744	14781	2,98	2,98	2,98
FEBBRAIO	8344	388	8732	2,75	2,75	2,75
MARZO	7103	301	7404	2,60	2,60	2,60
APRILE	2894	98	2992	2,29	2,29	2,29
OTTOBRE	4949	188	5137	2,44	2,44	2,44
NOVEMBRE	8406	382	8788	2,71	2,71	2,71
DICEMBRE	12238	625	12863	2,91	2,91	2,91
STAGIONE RISCALDAMENTO	**57970**	**2725**	**60696**	**2,98**	**2,29**	**2,67**

Tabella 38: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 6 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S6						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	5811	317	6128	3,04	3,04	3,04
FEBBRAIO	3555	171	3727	2,81	2,81	2,81
MARZO	2177	87	2264	2,51	2,51	2,51
APRILE	1643	62	1704	2,42	2,42	2,42
OTTOBRE	2250	91	2341	2,52	2,52	2,52
NOVEMBRE	3206	146	3352	2,71	2,71	2,71
DICEMBRE	5450	292	5742	3,00	3,00	3,00
STAGIONE RISCALDAMENTO	**24092**	**1165**	**25257**	**3,04**	**2,42**	**2,71**

Tabella 39: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 5 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S5						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	13705	722	14427	2,97	2,97	2,97
FEBBRAIO	9749	478	10227	2,84	2,84	2,84
MARZO	6140	248	6388	2,53	2,53	2,53
APRILE	4065	148	4213	2,38	2,38	2,38
OTTOBRE	5703	225	5928	2,49	2,49	2,49
NOVEMBRE	9501	451	9952	2,78	2,78	2,78
DICEMBRE	13379	701	14080	2,96	2,96	2,96
STAGIONE RISCALDAMENTO	**62242**	**2973**	**65216**	**2,97**	**2,38**	**2,71**

Tabella 40: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 2 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S2						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	26286	1451	27737	3,06	3,06	3,06
FEBBRAIO	17075	865	17940	2,90	2,90	2,90
MARZO	13520	610	14130	2,70	2,70	2,70
APRILE	10642	448	11090	2,59	2,59	2,59
OTTOBRE	11012	464	11476	2,59	2,59	2,59
NOVEMBRE	14813	698	15511	2,77	2,77	2,77
DICEMBRE	23361	1258	24619	3,01	3,01	3,01
STAGIONE RISCALDAMENTO	**116709**	**5792**	**122502**	**3,06**	**2,59**	**2,80**

Tabella 41: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 1 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE-S1						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	17867	1000	18867	3,08	3,08	3,08
FEBBRAIO	11234	564	11799	2,88	2,88	2,88
MARZO	7403	313	7715	2,59	2,59	2,59
APRILE	4338	161	4500	2,41	2,41	2,41
OTTOBRE	6623	271	6894	2,54	2,54	2,54
NOVEMBRE	11274	553	11827	2,84	2,84	2,84
DICEMBRE	15766	854	16620	3,02	3,02	3,02
STAGIONE RISCALDAMENTO	**74505**	**3716**	**78222**	**3,08**	**2,41**	**2,77**

Osservando le tabelle di riepilogo si nota come i risultati numerici siano circa uguali a quelli dell'analoga configurazione del sistema 1. Questo è giustificato dal fatto che in questa configurazione la pompa di calore lavora con un valore medio di potenza che tiene ovviamente conto degli andamenti minimi e massimi del fabbisogno di richiesta dell'utenza, che è lo stesso utilizzato nel sistema 1. Si riporta in Fig.78 il funzionamento orario della macchina installata nella sottocentrale 7 in questa prima configurazione del sistema 2. Non si sono riportati gli istogrammi delle altre sottocentrali a differenza dei casi precedenti perché non danno infarmazioni in più sul comportamento del sistema. In particolare gli istogrammi saranno gli stessi della sottocentrale 7 ma con il valore massimo di potenza erogata che varia a seconda da sottocentrale a sottocentrale. Come si può notare dall'analisi delle figura, a differenza di tutte le precedenti configurazioni del sistema 1, in questa modalità anche la mandata di riscaldamento non sarà più modulante in base alla richiesta dell'utenza ma avrà un comportamento costante nella giornata di funzionamento, che rappresenta anche il vantaggio di questa configurazione. Si avrà quindi una maggiore stabilità meccanica del compressore della macchina che non dovrà variare mai regime di funzionamento all'interno della giornata. Poiché il valore totale della potenza erogata è circa prossimo all'80% della potenza nominale, il rendimento di funzionamento della pompa di calore è vicino al valore massimo per una mandata di 55°C.

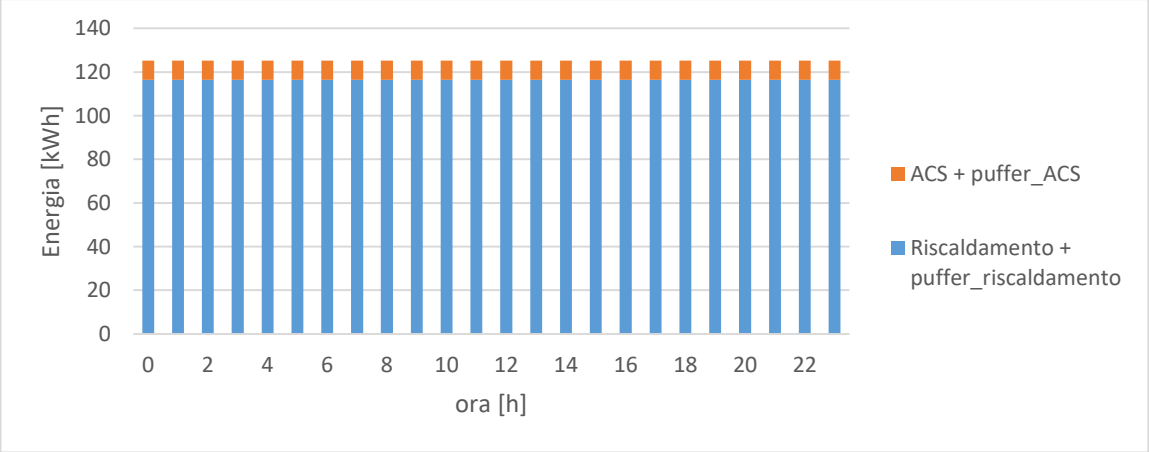


Figura 78 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 7 nel mese di Gennaio, Sist.2 Config.1

Configurazione 2

La seconda configurazione del sistema 2 prevede che la macchina all'interno dell'ora di funzionamento prima soddisfa la richiesta di ACS e il relativo accumulo, che hanno quindi ordine prioritario sul funzionamento della pompa di calore, con una temperatura di mandata di 55 °C e poi il restante tempo dell'ora soddisfa la richiesta di riscaldamento e il relativo accumulo, con una temperatura di mandata più bassa a 42 °C come fatto nella terza configurazione del sistema 1. I risultati numerici di riepilogo sono riportati da Tab.42 a 48.

Tabella 42: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 7 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S7						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	20991	1833	22825	4,18	3,76	4,06
FEBBRAIO	14380	1134	15515	4,18	3,52	3,86
MARZO	8620	500	9120	3,87	3,21	3,44
APRILE	5588	170	5758	3,42	3,13	3,21
OTTOBRE	6608	226	6834	3,49	3,14	3,25
NOVEMBRE	12138	792	12930	3,97	3,38	3,61
DICEMBRE	16339	1301	17640	4,11	3,75	3,91
STAGIONE RISCALDAMENTO	**84665**	**5957**	**90622**	**4,18**	**3,13**	**3,62**

Tabella 43: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 4 nella stagione di riscaldamento – Sistema 2 Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S4						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	9831	843	10674	4,16	3,74	4,04
FEBBRAIO	6692	520	7212	4,14	3,48	3,82
MARZO	4448	267	4714	3,89	3,19	3,44
APRILE	2694	107	2801	3,48	3,08	3,20
OTTOBRE	4116	197	4313	3,70	3,10	3,32
NOVEMBRE	5204	310	5514	3,83	3,28	3,49
DICEMBRE	8793	699	9492	4,04	3,71	3,87
STAGIONE RISCALDAMENTO	**41777**	**2942**	**44719**	**4,16**	**3,08**	**3,60**

Tabella 44: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 3 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S3						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	10020	859	10879	4,14	3,73	4,03
FEBBRAIO	5966	428	6394	4,05	3,38	3,69
MARZO	5361	259	5619	3,76	3,15	3,36
APRILE	2099	64	2163	3,31	3,07	3,14
OTTOBRE	3669	137	3807	3,53	3,09	3,24
NOVEMBRE	6274	385	6659	3,88	3,31	3,54
DICEMBRE	8787	714	9501	4,09	3,77	3,93
STAGIONE RISCALDAMENTO	**42176**	**2846**	**45022**	**4,14**	**3,07**	**3,56**

Tabella 45: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 6 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S6						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	4005	362	4367	4,37	3,91	4,23
FEBBRAIO	2413	200	2613	4,30	3,59	3,94
MARZO	1445	105	1550	4,01	3,29	3,55
APRILE	1135	64	1199	3,73	3,19	3,37
OTTOBRE	1585	88	1673	3,84	3,20	3,43
NOVEMBRE	2314	150	2464	4,00	3,40	3,64
DICEMBRE	3894	334	4228	4,23	3,90	4,06
STAGIONE RISCALDAMENTO	**16791**	**1302**	**18093**	**4,37**	**3,19**	**3,75**

Tabella 46: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 5 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S5						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	9652	829	10481	4,19	3,76	4,06
FEBBRAIO	7205	526	7731	4,02	3,40	3,71
MARZO	4393	246	4639	3,83	3,17	3,40
APRILE	2983	108	3091	3,47	3,09	3,20
OTTOBRE	3993	233	4226	3,83	3,12	3,39
NOVEMBRE	6847	498	7345	4,07	3,45	3,72
DICEMBRE	9770	812	10582	4,05	3,78	3,92
STAGIONE RISCALDAMENTO	**44843**	**3252**	**48095**	**4,19**	**3,09**	**3,63**

Tabella 47: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 2 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S2						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	19858	1763	21620	3,98	3,66	3,91
FEBBRAIO	12904	944	13848	4,00	3,41	3,71
MARZO	10284	554	10838	3,87	3,21	3,44
APRILE	8075	360	8435	3,74	3,16	3,35
OTTOBRE	8052	432	8484	3,84	3,15	3,41
NOVEMBRE	11082	715	11797	3,95	3,36	3,60
DICEMBRE	17639	1480	19119	3,98	3,73	3,87
STAGIONE RISCALDAMENTO	**87893**	**6249**	**94141**	**4,00**	**3,15**	**3,61**

Tabella 48: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 1 nella stagione di riscaldamento - Sistema 2 Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE-S1						
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**Energia Elettrica Pompa di Falda [kWh]**	**Energia Elettrica assorbita totale [kWh]**	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	12898	1149	14047	4,24	3,82	4,12
FEBBRAIO	8117	621	8738	4,18	3,51	3,83
MARZO	5332	302	5633	3,89	3,25	3,47
APRILE	3202	101	3303	3,45	3,18	3,26
OTTOBRE	4679	270	4949	3,86	3,20	3,45
NOVEMBRE	8167	600	8767	4,15	3,51	3,78
DICEMBRE	11642	970	12612	4,13	3,81	3,97
STAGIONE RISCALDAMENTO	**54037**	**4013**	**58050**	**4,24**	**3,18**	**3,70**

Come si può notare i risultati numerici sono leggermente maggiori degli omologhi della terza configurazione del sistema 1. Questo è dovuto al fatto che in questa configurazione la parzializzazione è maggiore rispetto alla terza configurazione del sistema 1 e quindi ci si allontana dal range di massimo rendimento che si trova in prossimità circa dell'80% della potenza nominale. Si riporta in Fig.79 il funzionamento orario della macchina installata nella sottocentrale 7 in questa prima configurazione del sistema 2. Anche in questa configurazione non si sono riportati gli istogrammi delle altre sottocentrali perché non danno infarmazioni in più sul comportamento del sistema. In particolare gli istogrammi saranno gli stessi della sottocentrale 7 ma con il valore massimo di potenza erogata che varia a seconda da sottocentrale a sottocentrale.

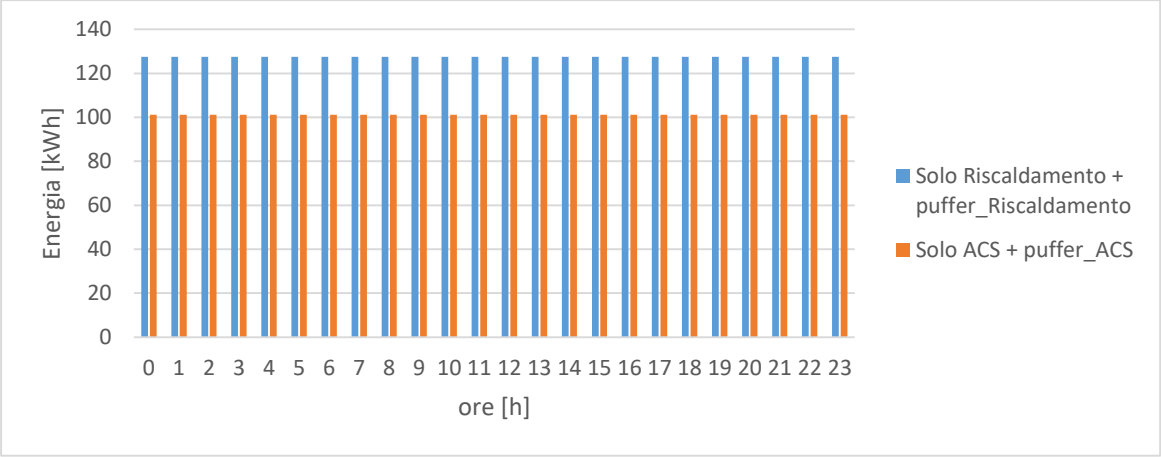


Figura 79 - Funzionamento orario della pompa di calore della sottocentrale 7 nel mese di Gennaio, Sist.2 Config.2

La prima soluzione proposta in ambito impiantistico senza dover cambiare tecnologia è stata come detto, l'aggiunta di un accumulo puffer anche sul lato del riscaldamento. Per poter valutare in maniera obbiettiva gli eventuali benefici portati da questa nuova configurazione è necessario fare un confronto con lo stato di fatto, sia in termini energetici che in termini di prestazioni medie nella stagione di riscaldamento. Si riporta il confronto solo per la sottocentrale 7, perché il trend mostrato dalle restanti sei sottocentrali è analogo. Come si evince facilmente dalle Fig.80 e 81 le prestazioni del sistema energetico nella terza configurazione del sistema 1, ovvero con accumulo solo sul lato ACS e con la mandata che opera su due livelli termici a secondo del fabbisogno da soddisfare, sono praticamente identiche a quest'ultima configurazione proposta (sistema due

configurazione due). Risulta quindi evidente che, l'investimento necessario ad un secondo accumulo, nonchè la quasi totale assenza di benefici in termini di risparmio energetico e aumento di prestazioni, portano ad escludere questa soluzione come realizzabile. Si affronterà nel prossimo capitolo la possibilità di cambiare tecnologia di conversione per ottenere dei risparmi energetici significativi.

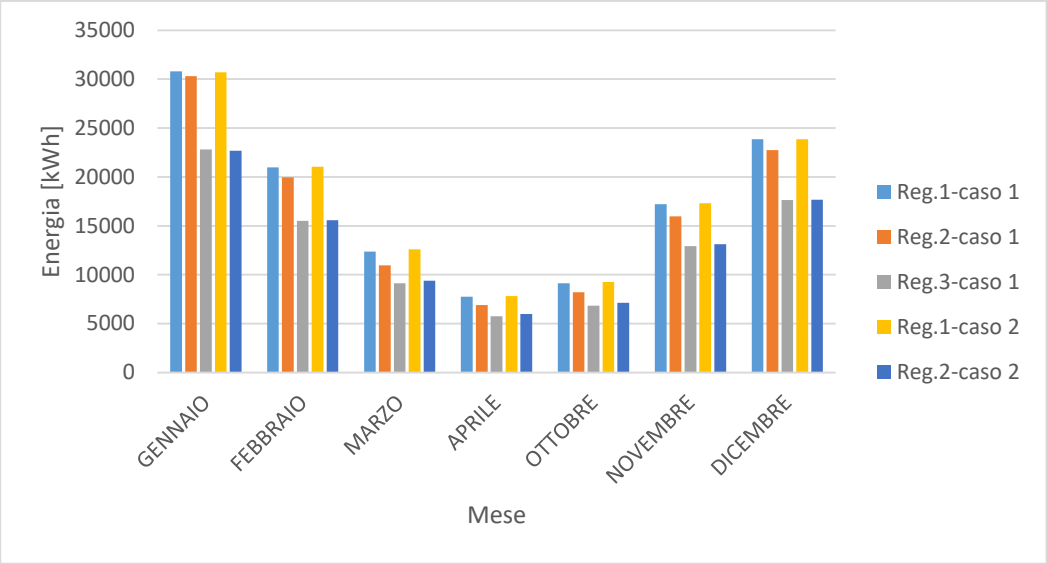


Figura 80 - Confronto dei consumi nei due stati e nelle rispettive configurazioni per la sottocentrale 7

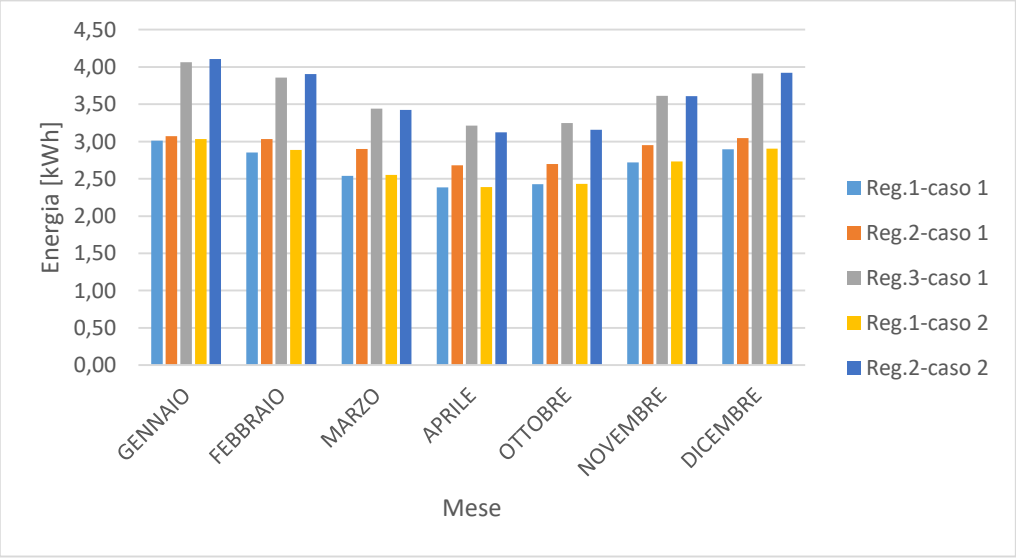


Figura 81 - Confronto delle prestazioni medie tra il caso 1 e 2 nelle rispettive configurazioni per la sottocentrale 7

3.3 Pompa di calore aria-aria

Nel paragrafo precedente si sono proposte diverse configurazione dello stato di fatto, agendo principalmente sulla regolazione della macchina e inserendo un nuovo puffer lato utenza di riscaldamento. Una voce non trascurabile del consumo elettrico delle sottocentrali è attribuito all'energia elettrica assorbita dalle pompe per movimentare il fluido dalla falda all'anello principale di distribuzione fino agli scambiatori che si interfacciano con gli evaporatori delle pompe di calore. In questo paragrafo si analizzerà l'eliminazione dell'anello di circolazione e la sostituzione delle pompe di calore ad acqua con quelle ad aria, dello stesso fornitore. Una rappresentazione dello schema d'impianto del sistema aria-acqua è mostrato in Fig.82

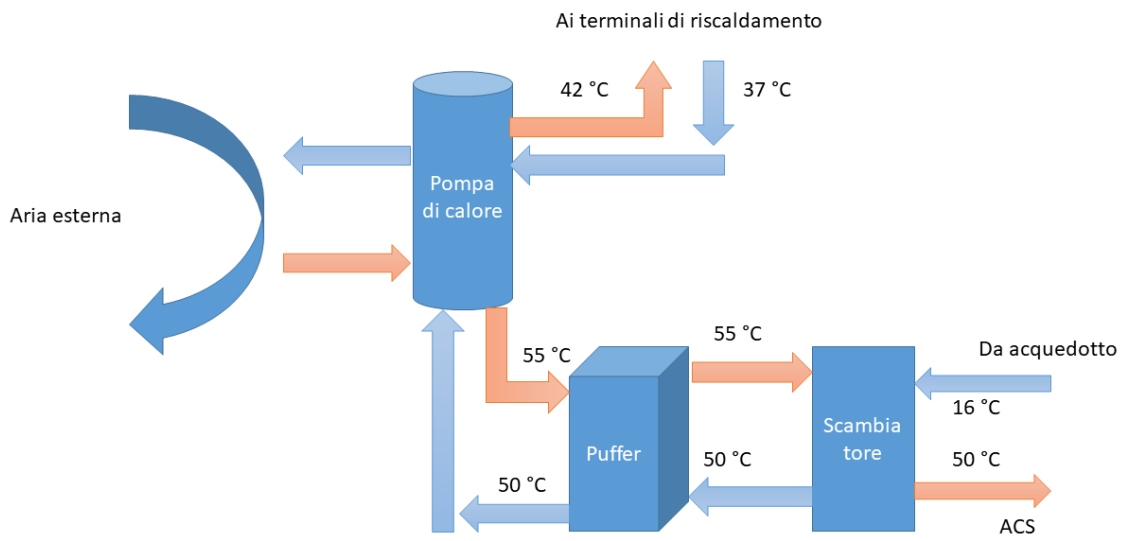


Figura 82 - Schema semplificato della configurazione aria-aria

Le prestazioni della macchina in questa configurazione dipenderanno, oltre che dalle temperature di mandata a 42°C o 55°C, dalla temperatura dell'aria esterna. Per calcolare i valori di potenza nominale di funzionamento e il COP al variare della temperatura esterna si è utilizzato un file contenente le temperature convenzionali della stagione di riscaldamento per la città di Milano. Le ipotesi di funzionamento del puffer posto sul ramo delle utenze di ACS sono le stesse considerate nel sistema 1 e 2.

Cosi come fatto in precedenza anche per il sistema aria-acqua si sono supposte due possibili configurazioni di funzionamento.

Configurazione 1

La prima configurazione della pompa di calore aria-aria prevede che la pompa di calore soddisfi il fabbisogno di riscaldamento e ACS lavorando costantemente all'interno dell'ora, come si è supposto nell'omologa configurazione del Sistema 1. La potenza totale di funzionamento nell'ora sarà quindi data dalla somma della potenza di funzionamento ACS più quella di funzionamento per il riscaldamento. A titolo di esempio si riporta in Fig.83 questa configurazione per la sottocentrale 7 nel giorno tipo di Gennaio.

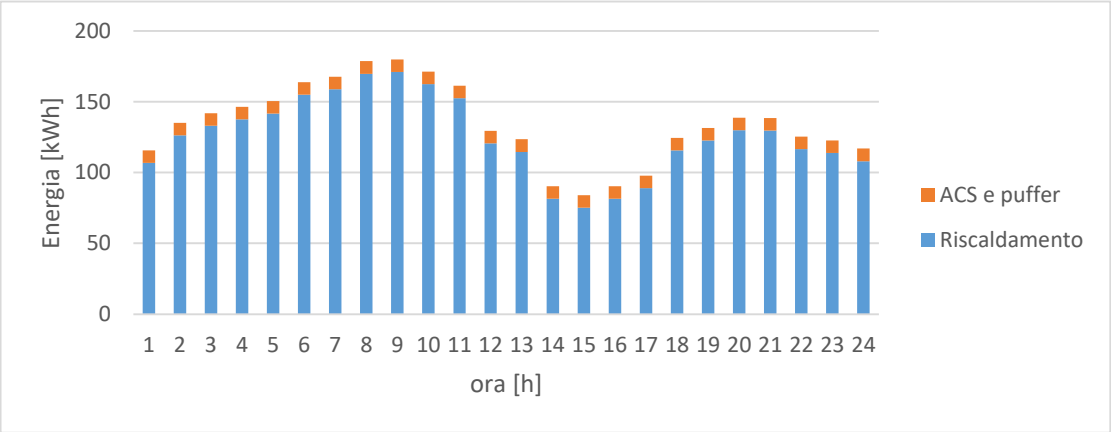


Figura 83 - Funzionamento orario della macchina nel giorno tipo di Gennaio per la prima configurazione del sistema aria-acqua

Il modello di calcolo è simile all'omologa configurazione del Sistema 1. L'unica differenza si può riscontrare nel calcolo della potenza nominale della macchina che, come detto, dipenderà oltre che dalla temperatura di mandata anche dalla temperatura dell'aria esterna per cui si è scelto di non riportare l'estratto del foglio di calcolo. In più nel calcolo del valore totale di energia elettrica assorbita dalla sottocentrale ci sarà solo il termine dovuto al compressore della pompa di calore. I risultati dei consumi di energia elettrica nonché le prestazioni della macchina sono riportati in Tab.49 per la sottocentrale 7.

Tabella 49: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 7 nella stagione di riscaldamento – Sistema aria-acqua Configurazione 1

RIEPILOGO MENSILE – S7				
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	39127	2,82	2,04	2,33
FEBBRAIO	25649	2,83	2,13	2,41
MARZO	12578	3,05	2,15	2,58
APRILE	3684	3,14	2,10	2,77
OTTOBRE	4629	3,03	2,30	2,62
NOVEMBRE	18920	2,85	2,10	2,46
DICEMBRE	30069	3,04	2,04	2,30
STAGIONE RISCALDAMENTO	**134657**	**3,14**	**2,04**	**2,46**

Come si può osservare i risultati energetici nonché le prestazioni del sistema risultano peggiorate rispetto allo stato di fatto. Questo è dovuto alla temperatura esterna dell'aria che per lunghi periodi si trova sono sotto gli 0°C durante la stagione di riscaldamento. L'eliminazione dell'anello idrico non basta a compensare il peggioramento delle performance della macchina per cui questa soluzione non è ottimale per una riduzione dei consumi rispetto allo stato di fatto. Il comportamento della macchina inoltre, come si può osservare in Fig.78, è analogo alla prima configurazione del sistema 1. Questa soluzione non è quindi positiva per una riduzione dei consumi nè per migliorare la stabilità del sistema.

Configurazione 2

La seconda configurazione del sistema aria-acqua prevede che la macchina lavori prima per soddisfare la richiesta di ACS e accumulo a potenza fissa pari al 50% della P_{nom}, all'interno dell'ora, e poi per il restante tempo soddisfi la richiesta energetica di riscaldamento. Questa configurazione è quella che più si avvicina al caso semplice 0 in quanto avremo due parametri prestazionali, uno legato al funzionamento a 55°C e uno per il funzionamento a 42°C. In Fig.84 si riporta il funzionamento della macchina in termini di

energia fornita alle utenze anche in questo caso per il giorno tipo di Gennaio della sottocentrale 7.

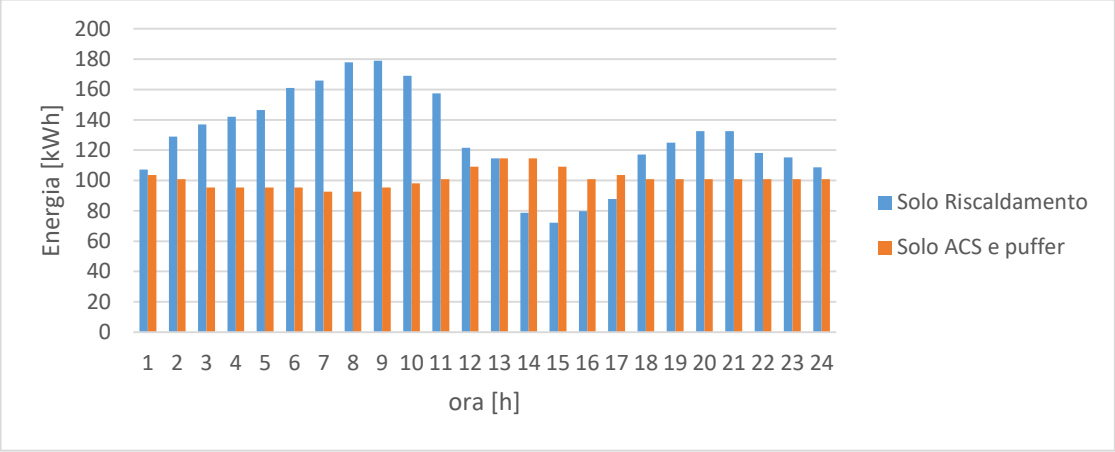


Figura 84 - Funzionamento della pompa di calore nella terza configurazione ipotizzata per il sistema 1 per la sottocentrale 7

La zona centrale del grafico è caratterizzata da una richiesta termica per riscaldamento più bassa essendo le ore centrali della giornata più calde e la macchina lavorerà ad una parzializzazione maggiore per la potenza di riscaldamento che copre la parte variabile della richiesta mentre nella quota fissa pari al 50% della potenza nominali per il soddisfacimento della richiesta di ACS più puffer ci sarà per la stessa causa un aumento (picchi arancioni). I risultati numerici del modello della sottocentrale 7 sono riportati in Tab.50.

Tabella 50: Riepilogo dei consumi elettrici e delle prestazioni della sottocentrale 7 nella stagione di riscaldamento – Sistema aria-acqua Configurazione 2

RIEPILOGO MENSILE – S7				
	Energia Elettrica Compressore [kWh]	**COP max**	**COP min**	**COP med**
GENNAIO	32959	3,52	2,12	2,78
FEBBRAIO	21362	3,44	2,20	2,87
MARZO	11393	3,41	2,31	2,78
APRILE	3568	3,21	2,06	2,83
OTTOBRE	4435	3,05	2,40	2,71
NOVEMBRE	16767	3,30	2,11	2,76

DICEMBRE	26092	3,41	2,06	2,66
STAGIONE RISCALDAMENTO	**116576**	**3,52**	**2,06**	**2,77**

Al fine di valutare se l'utilizzo di una tecnologia diversa porti ad un significativo risparmio di energia elettrica assorbita dalle sottocentrale si procede ad un confronto del sistema aria-aria appena descritto con il sistema acqua-acqua analizzato nel paragrafo precedente e le rispettive configurazioni ipotizzate. Il risultato è mostrato in un istogramma in Fig.85 per la sottocentrale 7. In Fig.86 è possibile osservare invece l'istogramma relativo alle prestazioni medie della stessa sottocentrale durante la stagione di riscaldamento. Dall'osservazione delle due figure si può notare come l'utilizzo di una tecnologia diversa non sia giustificata in quanto i consumi aumentano in ogni mese cosi come diminuiscono le performance, considerando anche la configurazione più ottimizzata per il sistema ad aria, ovvero la seconda. Questo è giustificato dal fatto che la macchina è costretta a lavorare per un numero elevato di ore l'anno sotto gli 0°C con dei valori di COP sicuramente più bassi della configurazione ad acqua, dove la temperatura è circa costante durante tutto l'anno a 16°C.

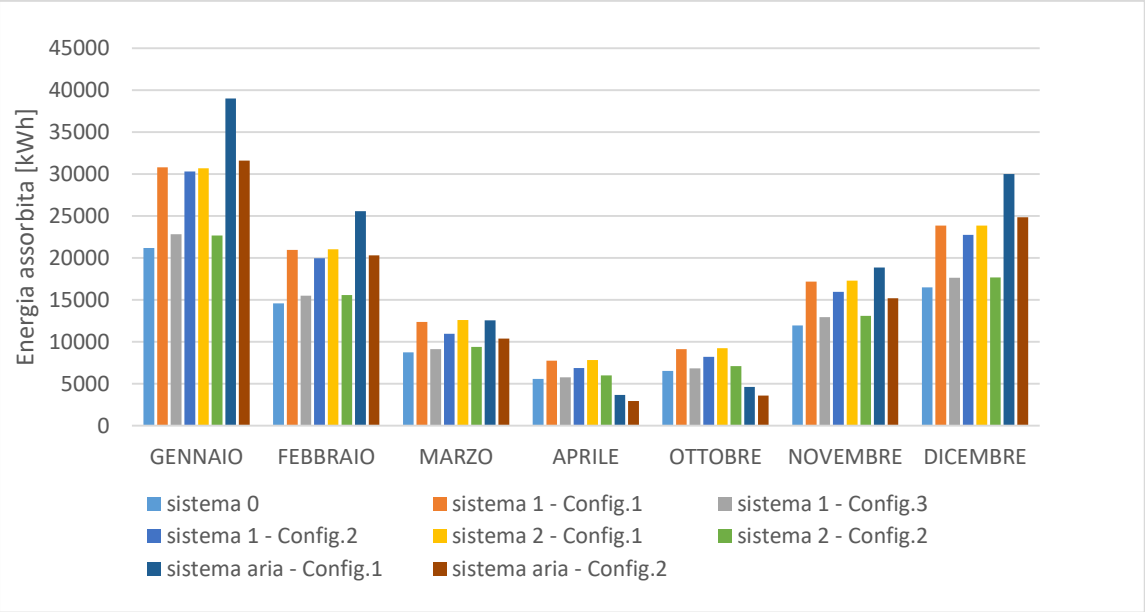


Figura 85 - Confronto dei consumi di energia elettrica della sottocentrale 7 nelle configurazioni proposte

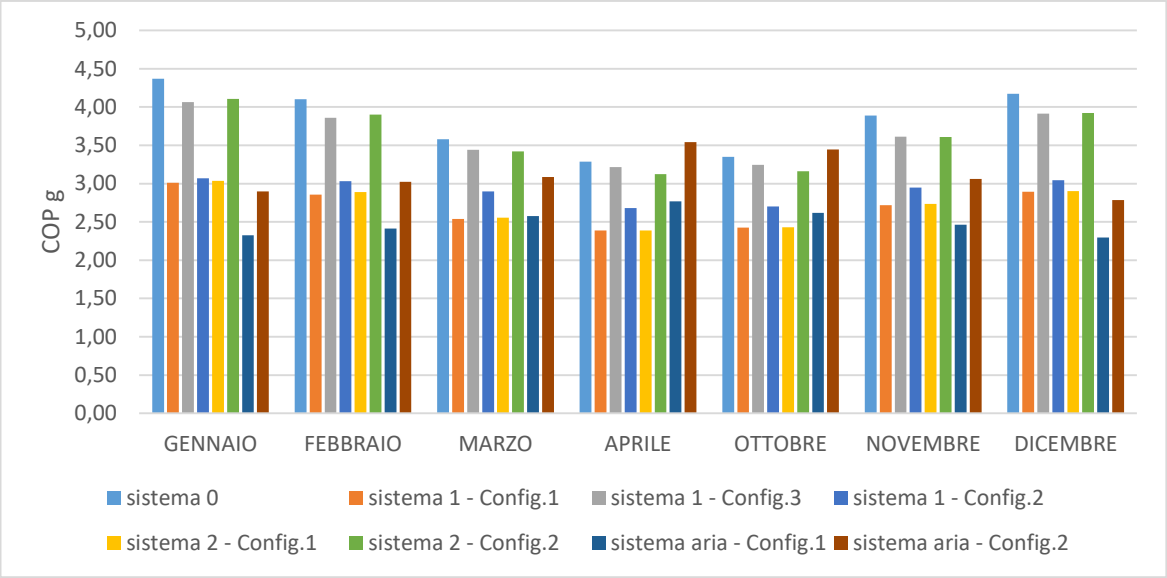


Figura 86 - Confronto delle performance della sottocentrale 7 nelle configurazioni proposte

Dal punto di vista impiantistico quindi per ottenere le migliori performance in termini di consumo di energia elettrica nonché di COP si potrebbe pensare di far lavorare le macchine come previsto nella terza configurazione del sistema 1 (istogramma grigio di Fig.85 e 86). Questa configurazione non permette però al compressore della pompa di calore installate nelle sottocentrali in cui la richiesta di ACS è molto bassa (sottocentrale 6, 4, 3) di lavorare sopra i 4 minuti per una corretta lubrificazione quando la stessa lavora in regime di sola ACS. Per chiarire il concetto si possono osservare i grafici riportanti i tempi di funzionamento nelle tre configurazioni previste per il sistema 1 per la sottocentrale 6 che tra le tre sottocentrali è quella con una richiesta di ACS quasi nulla in alcuni mesi della stagione di riscaldamento.

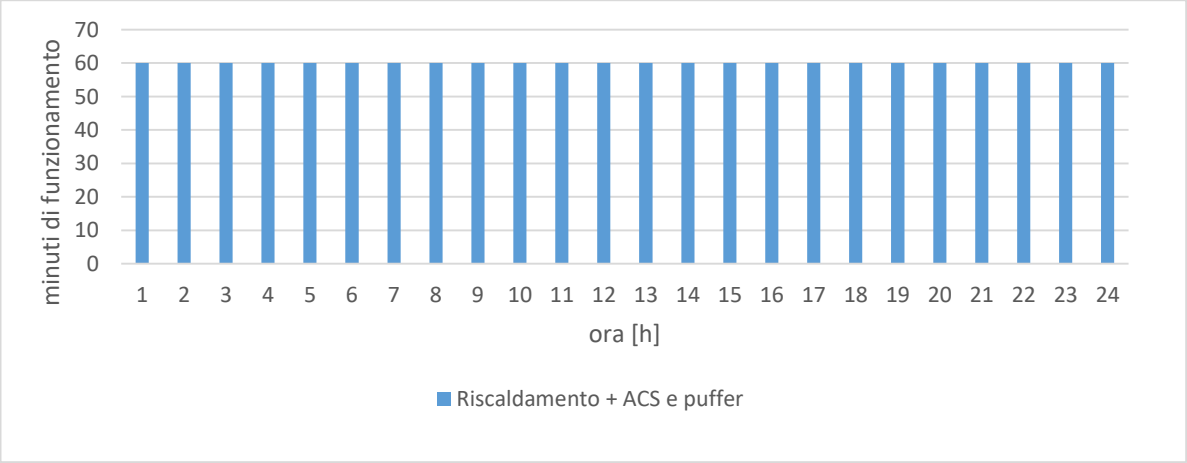


Figura 87 - Funzionamento orario della macchina in sottocentrale 6 nella Conf.1 Sist.1 nel mese con meno richiesta di ACS (produzione contemporanea con desurriscaldamento per ACS e modulazione sul riscaldamento)

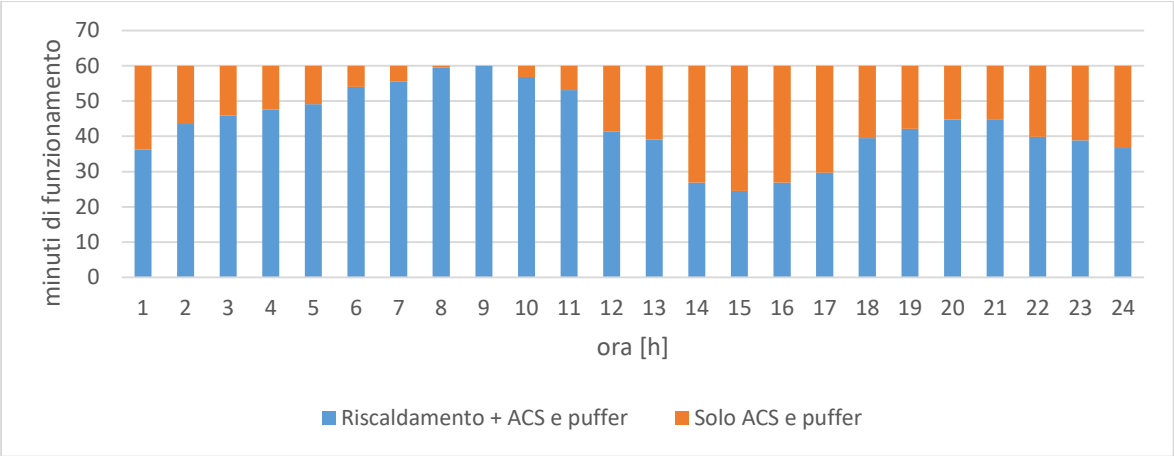


Figura 88 – Funzionamento orario della macchina in sottocentrale 6 nella Conf.2 Sist.1 nel mese con meno richiesta di ACS (a potenza erogata fissa)

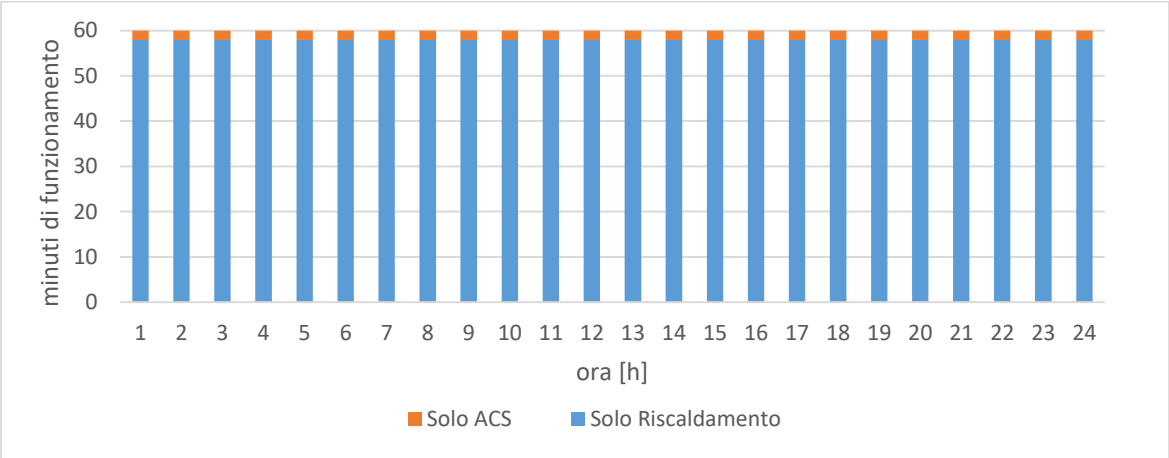


Figura 89 - Funzionamento orario della macchina in sottocentrale 6 nella Conf.3 Sist.1 nel mese con meno richiesta di ACS (priorità ACS, produzione separata e non contemporanea a temperature diverse)

Come si può osservare in Fig.89, la configurazione che genera i risultati prestazionali migliori ha dei tempi ridottissimi in funzionamento solo ACS, inferiori ai 4 minuti necessari alla corretta lubrificazione del compressore (istogramma arancione). La soluzione che presenta un compromesso tra stabilità di funzionamento e prestazioni è rappresentata quindi dalla prima configurazione, in cui la pompa di calore fornisce contemporaneamente i due fabbisogni, modulando la potenza erogata in base alla somma della richiesta di riscaldamento, variabile in ogni intervallo orario, più la potenza richiesta dal puffer e ACS, costante nella giornata (Fig.87, istogramma blu).

Per uno sviluppo futuro del lavoro di tesi si potrebbe osservare il comportamento del sistema aggiungendo una caldaia per integrare la produzione di ACS, così da far lavorare le macchine ad una temperatura più bassa. Per rendere il modello più completo inoltre,

sarebbero necessari i dati di funzionamento estivo, in cui la macchina funziona in modalità di recupero totale/parziale per la produzione di ACS, così da poter fare un confronto dei consumi del polo residenziale nelle due stagioni.

Bibliografia

(s.d.). *Energy Hub: una tendenza proiettata nel futuro, Infrastrutture e reti di Florian Kienzle*.

AICARR. (s.d.).

AICARR. (2011). *POSIZIONE DI AiCARR SUL D.LGS 28/11 PER GLI ASPETTI RIGUARDANTI LE RINNOVABILI TERMICHE.* Milano.

Bettio, N. (2012, Dicembre 18). *expoclima.* Tratto da expoclima.net: http://www.expoclima.net/special/40/le_unita_ad_assorbimento/pompe_di_calore_ad_assorbimento_principi_di_funzionamento.htm

Biglia, A. (2014, Marzo 14). MODELLAZIONE DEL SISTEMA ENERGETICO. *Analisi di sistemi multi-energia per l'edilizia ospedaliera: Il caso dell'AOB di Cagliari*.

Biglia, A. (2017).

Bo, G. (2018, Febraio 22). Analisi tecnica ed economica sull'impiego di macchine polivalenti per la climatizzazione e la produzione di ACS.

Caleffi. (2011, dicembre). Impianti ibridi. *Idraulica*.

Caleffi. (2014, Aprile 30). Gli impianti a pannelli radianti. *Quaderni Caleffi*.

Carbone pulito zero emissioni. (s.d.). Tratto da Sito web ITEA Flameless Technology: http://www.iteaspa.it/prodotti/carbone-pulito/

Consulente Energia. (s.d.). *Consulente-energia.com*. Tratto da http://www.consulente-energia.com/ar-che-differenza-ce-tra-bollitore-puffer-serbatoio-di-accumulo-termico-inerziale-perche-un-boiler-e-diverso-da-un-puffer.html

D. Lgs. 115/08. (2008, Maggio 30). *Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE*.

D. Lgs. 192/2005. (2005, Settembre 23). *Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*.

D. Lgs. 28/2011. (2011, Marzo 3). *Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili*.

De Franceschi, D. (2011, Luglio 02). Analisi dei consumi energetici. *Analisi dei consumi energetici residenziali e vantaggi connessi all'utilizzo di un manager energetico*. Milano.

Devecioğlua, A. G., & Oruça, V. (2015). The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015 . *Characteristics of Some New Generation Refrigerants with Low GWP.* Elsevier.

Direttiva 2009/28/CE. (2009, Aprile 23). *DIRETTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO*. Europa.

ENEA. (2013). *Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2011.* Roma.

ENEA. (2015). *Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2015.* Roma.

ENEA. (2017). Impieghi finali di energia nel settore residenziale e terziario. *Rapporto Annuale Efficienza Energetica*.

European Commission. (2002). *energy efficiency.* Tratto da ec.europa.eu: https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings

European Commission. (2006, Aprile 5). DIRETTIVA 2006/32/CE. *Efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici*.

European Commission. (2010). *Document 32010L0031.* Tratto da http://eur-lex.europa.eu: http://data.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj

Fabrizio, E. (2008, Luglio 2). Modelling of multi-energy systems in buildings. *Modelling of multi-energy systems in buildings*.

Fabrizio, E., & Filippi, M. (2008). L'energy hub: uno strumento di analisi per la valutazione di tecnologie impiantistiche integrate. *AICARR*.

Fabrizio, E., Filippi, M., & Virgone, J. (2009). An hourly modelling frame work for the assessment of Energy sources exploitation and Energy converters selection and sizing in buildings. *Energy and Buildings*.

Felice, L. (2013, Luglio 16). *Dailye.* Tratto da dailyenmoveme.com: http://www.dailyenmoveme.com/it/normativa/efficienza-energetica-evoluzione-del-quadro-normativo#

FIRE-Federazione Italiana per l'Uso Razionale dell'Energia. (2013). Strategie di funzionamento e relative specifiche di progettazione. *I sistemi di accumulo termico*.

Geidl, M. (2007). Integrated modelling and optimization of multi-carrier energy. *Integrated modelling and optimization of multi-carrier energy*.

International Energy Agency. (2014). *Net Zero Energy Solar Buildings.* International Energy Agency: Solar Heating and Cooling Programme.

Jensen, J. K., Ommen, T., B.Markussen, W., & Elmegaard, B. (2016, Ottobre 15). *ScienceDirect.* Tratto da ScienceDirect.com: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.164

Legambiente. (2017). *viviconstile*. Tratto da viviconstile.org: http://www.viviconstile.org/lo-sapevi-che/clima-in-casa/le-pompe-di-calore-ad-aria

Legionellaonline.it. (s.d.). *Legionellaonline.it*. Tratto da Legionellaonline.it: http://www.legionellaonline.it/domande_frequenti.htm

Mitsubishielectric. (s.d.). *La tecnologia delle pompe di calore Mitsubishi Electric per i climi freddi*. Tratto da Mitsubishielectric.com: http://www.mitsubishielectric.com/believe/it/heatpump/

Olimpia Splendid Group. (s.d.). *Catalogo tecnico sherpa*.

PAEE. (2007). Piano d'Azione italiano per l'Efficienza Energetica. *PAEE*.

Pompe di calore - prestazioni. (s.d.). Tratto da wikipedia.com: https://it.wikipedia.org/wiki/Pompa_di_calore

Simion, I. (2013, Agosto 05). *Industria e tecnologie del riscaldamento: dagli inizi del novecento alle ultime innovazioni*. Tratto da expoclima.com: http://www.expoclima.net/special/55/industria_del_riscaldamento_in_italia_storia_tradizione_innovazione/tecnologie_del_riscaldamento_storia.htm

Società ICSSEA. (2011, Febbraio). *Ottimizzazione economica, ambientale ed energetica di sistemi energetici innovativi a servizio di reti distribuite dell'energia termica ed elettrica a servizio di sistemi edificio-impianto*.

Termoidrogas2000. (s.d.). *Climatizzatori Mitsubishi Electric PUHZ SHW*. Tratto da Termoidrogas2000 - Soluzioni per l'ambiente: http://www.termoidrogas2000.it/condizionatori/104/unita-esterne-commerciali/commerciale-zubadan.html

UNI. (2014, Febbraio). *Impianti di alimentazione e distribuzione d'acqua fredda e calda - Progettazione, installazione e collaudo*.

UNI CEI EN ISO 50001 . (2011). *Sistemi di gestione dell'energia - Requisiti e linee guida per l'uso*. Italia.

Wanga, G., Zhao, Y., Quana, Z., & Tonga, J. (2017, Giugno 18). *Application of a multi-function solar-heat pump system in residential buildings.* Tratto da ScienzeDirect: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111734111X?via%3Dihub

Wikipedia.com. (s.d.). Tratto da Wikipedia: https://it.wikipedia.org/wiki/Clustering