



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione di tipologie di sistemi vegetali per migliorare l'efficienza energetica degli edifici nella città metropolitana.

Campiotti C., Consorti L., Giagnacovo G., Latini A., Puglisi G.,
Scoccianti M., Viola C.

AIDY GROUP SRL



BRYAPO
APPALTI | SRLS

CIRPS

TECNO.EL

Report RdS/PAR2015/141

CARATTERIZZAZIONE DI TIPOLOGIE DI SISTEMI VEGETALI PER MIGLIORARE L'EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI NELLA CITTA' METROPOLITANA

Campiotti C., Giagnacovo G., Latini A., Puglisi G., Scoccianti M., Viola C. (ENEA)

Con il contributo di: Luciano Consorti (CIRPS - Centro Interuniversitario di Ricerca Per lo Sviluppo sostenibile)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

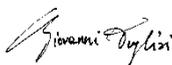
Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.1 Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: C. Tecnologie "green" per gli edifici

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 STATO DELL'ARTE.....	7
3 NORMATIVA ESISTENTE PER LE COPERTURE VEGETALI.....	13
4 LE COPERTURE VEGETALI PER L'EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI.....	17
4.1 LAI (LEAF AREA INDEX).....	18
5 LE COPERTURE VEGETALI PER MIGLIORARE L'EFFICIENZA ENERGETICA DEI SISTEMI DI CONDIZIONAMENTO.....	20
5.1 SISTEMI VEGETALI SENZA-SUOLO (SOIL-LESS) PER GLI EDIFICI.....	21
5.2 SISTEMI DI CONDIZIONAMENTO PER IL RAFFRESCAMENTO ESTIVO.....	22
5.3 INTERDIPENDENZE FUNZIONALI FRA I COMPONENTI DELL'IMPIANTO DI REFRIGERAZIONE.....	23
6 CARATTERISTICHE STRUTTURALI DEL PROTOTIPO DI PARETE VERDE.....	25
6.1 DISEGNI TECNICI.....	25
7 CLIMATIZZAZIONE CON SISTEMI INNOVATIVI A FONTE RINNOVABILE PER SISTEMI SERRA.....	36
7.1 BREVE DESCRIZIONE IMPIANTO SOLAR COOLING.....	36
7.2 SISTEMA DI REGOLAZIONE E CONTROLLO.....	38
7.2.1 <i>Requisiti sistema di regolazione e controllo</i>	38
7.2.2 <i>Regolazione circuito A</i>	39
7.2.3 <i>Regolazione circuito B</i>	44
7.2.4 <i>Regolazione circuito C</i>	47
7.2.5 <i>Interfaccia di controllo e regolazione</i>	49
7.3 VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DEGLI IMPIANTI DI SOLAR COOLING.....	50
8 CONCLUSIONI.....	51
9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	52
10 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	53
11 APPENDICE.....	54
11.1 CARATTERISTICHE DELL'ARIA SECCA.....	54
11.2 CARATTERISTICHE DELL'ARIA UMIDA.....	55
11.3 CICLO FRIGORIFERO.....	59

Sommario

Nell'ambito dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, nel periodo Luglio Agosto 2016, il gruppo di ricerca dell'Unità Tecnica Efficienza Energetica di ENEA Casaccia ha svolto una serie di attività che hanno preso in considerazione sia la realizzazione di un sistema prototipo di parete verde, in corso di installazione presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia (attività C1), sia la ottimizzazione tecnologica ed operativa di un sistema prototipo di *solar cooling* installato presso l'Università di Bari (attività C2). Le attività di ricerca sul prototipo di parete verde hanno previsto indagini sugli studi in corso riguardanti le diverse metodologie utilizzate per la definizione dei flussi di calore associati alla installazione di coperture vegetali sulle strutture edilizie, con particolare attenzione al raffrescamento estivo. Il report riporta una rassegna sui regolamenti e riferimenti normativi e amministrativi a livello nazionale, europeo e internazionale che definiscono l'impiego di *Green Roofs* (Tetti Verdi) e *Green Walls* (Pareti Verdi) sugli edifici. Sono riportate anche valutazioni generali sul processo di evapotraspirazione e sulla individuazione del LAI (*Leaf Area Index*). Questi ultimi sono tra i parametri più importanti che condizionano le variazioni di temperatura dell'aria rispetto al microclima che delimita il volume tra la copertura vegetale e l'edificio che ospita la copertura verde. In particolare, è stato sviluppato uno studio di pre-fattibilità tecnica per valutare i benefici delle coperture verdi ai fini del miglioramento dell'efficienza energetica dei sistemi di condizionamento estivo degli edifici. La ricerca sullo sviluppo di sistemi di *solar cooling* per il raffrescamento di edifici rurali, con particolare attenzione ai sistemi serra, ha preso in considerazione una valutazione comparativa sulla potenzialità degli impianti di *solar cooling*, considerando i regimi incentivanti attualmente vigenti; inoltre è stato progettato e realizzato un nuovo sistema di gestione e controllo dell'impianto, totalmente gestibile da remoto, che permetterà di effettuare la prima campagna sperimentale durante la prossima stagione estiva. Tale attività è stata svolta realizzando, a valle dei necessari studi propedeutici, i diagrammi di flusso che sono serviti alla ditta scelta per implementare le logiche di gestione nel controllore a bordo del sistema. Il report ENEA-UTEE per entrambe le linee di attività (C1 e C2) descrive i *lay-out* dei sistemi prototipo che sono in corso di realizzazione sia presso il Centro Enea Casaccia per quanto concerne la parete verde, sia presso l'Università di Bari per il prototipo di *solar cooling*. Di entrambe le installazioni-prototipo si riportano, in particolare, le fattibilità tecniche e il *design* dei sistemi di monitoraggio sviluppati per il rilevamento dei parametri climatico-energetici.

1 Introduzione

Nell'UE il 45% dell'energia per il riscaldamento e il raffreddamento è usata nel settore residenziale, il 37% nell'industria e il 18% nei servizi. Il riscaldamento degli ambienti è responsabile dell'80% del consumo per riscaldamento e raffreddamento nei climi più freddi. Nei climi più caldi, tra i quali si può annoverare anche l'area mediterranea, nella quale ricade una buona parte del territorio italiano, è il raffreddamento degli ambienti a rappresentare la maggior parte del consumo – e tale consumo è in crescita. Nel 2012 il settore dei servizi ha consumato 96 Mtep di energia finale per il riscaldamento e il raffreddamento (Figura 1).

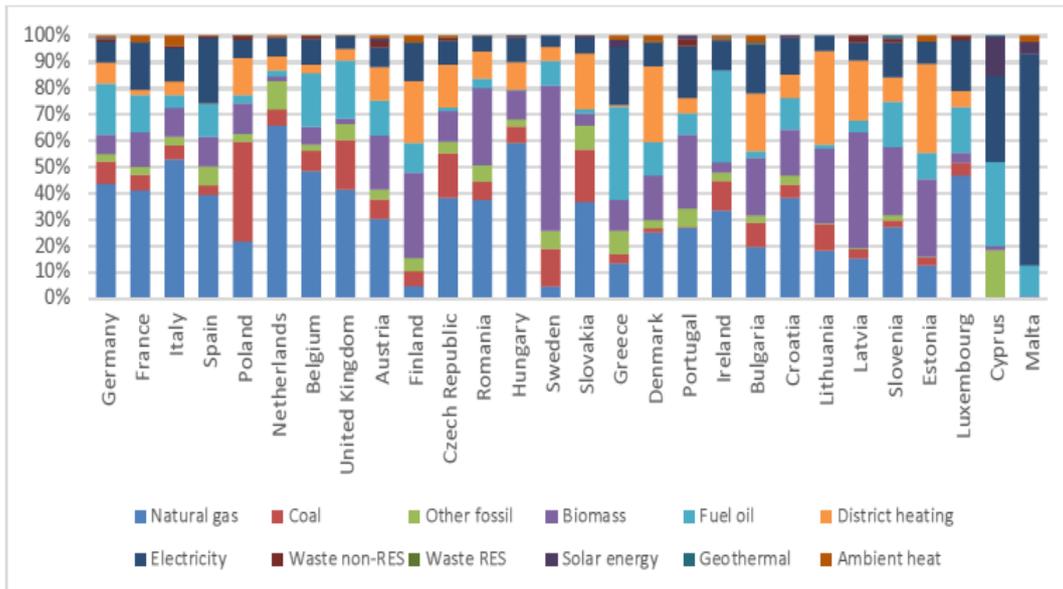
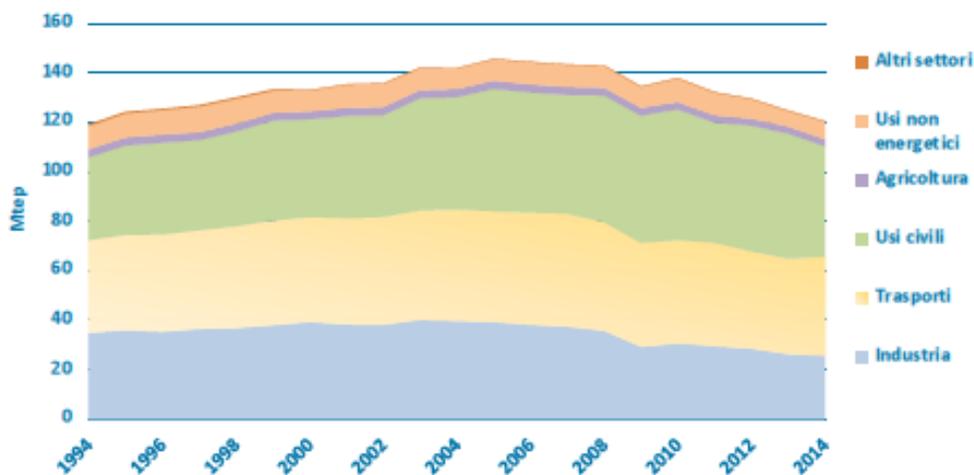


Figura 1. Consumo finale di energia in Europa per il riscaldamento e il raffreddamento, 2012

In dettaglio, il 62% per il riscaldamento di ambienti; il 19% per il raffreddamento; il 14% per l'acqua calda; e il 5% per il riscaldamento di processi di lavorazione [1]. Sono questi i motivi che hanno spinto l'Unione Europea ad accelerare sulle normative per migliorare l'efficienza energetica degli edifici. Per quanto riguarda l'Italia, il RAEE riporta che il settore civile assorbe la quota maggiore dei consumi di energia (37,1%), seguito dal settore trasporti con il 33,3% e dal settore industria con il 21,3% (Figura 2) [2].



Fonte: EUROSTAT

Figura 2. ENEA-RAEE 2016

Nell’Unione Europea, a partire dal 2020, per gli edifici di nuova costruzione dovranno essere applicate norme e criteri costruttivi rigorosi nei confronti dell’efficienza energetica del fabbricato. In particolare, gli Stati Membri dovranno impegnarsi ad elaborare piani nazionali destinati ad aumentare il numero degli edifici in cui le emissioni di CO2 e il consumo di energia primaria dovranno essere bassi o nulli; dovranno, inoltre, fissare obiettivi in ordine alla percentuale minima che tali edifici dovranno rappresentare nel 2020, rispetto al totale di edifici e alla metratura utile totale. Tali obiettivi dovranno essere fissati per gli edifici residenziali di nuova costruzione e ristrutturati, gli edifici non residenziali di nuova costruzione e ristrutturati e gli edifici occupati da enti pubblici. In Italia, è già in vigore il decreto legislativo 4 luglio 2014, n. 102, di attuazione della direttiva 2012/27/UE sull’efficienza energetica; tuttavia il nuovo Decreto Legislativo del 18 luglio 2016, “Disposizioni integrative al decreto legislativo 4 luglio 2014, n. 102, di attuazione della direttiva 2012/27/UE sull’efficienza energetica”, ha modificato le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abrogato le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE”, con l’obiettivo di migliorare il D.Lgs. 102/2014, nel recepire la direttiva 2012/27/CE, nota come EED *Energy Efficiency Directive*. In particolare, l’Unione Europea stima la richiesta di energia elettrica, per il condizionamento climatico dell’aria per il 100% degli edifici utilizzati per scopi civili e commerciali (case, negozi, uffici) in 60 Mtep al 2020 (Fig.2). Tali consumi sono riferiti principalmente al mantenimento di un microclima confortevole all’interno degli edifici utilizzati per servizi e localizzati sia in aree rurali che aree urbane e non per impieghi industriali, quali quelli che si riferiscono alla conservazione e/o alla refrigerazione dei cibi per le esigenze umane.

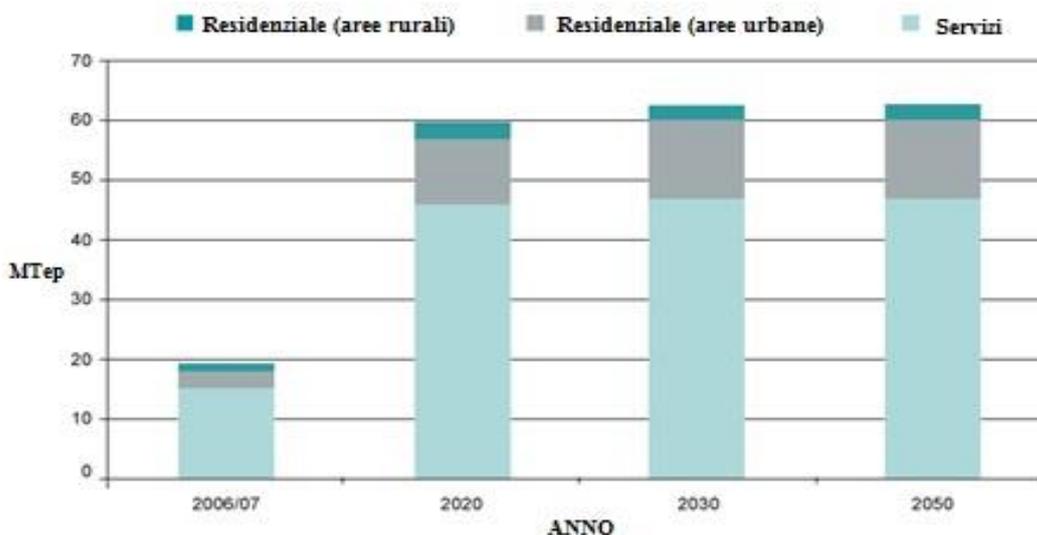


Figura 3. Stima dei consumi elettrici per il condizionamento in Europa.

Ai fini della riduzione dei consumi di riscaldamento e di raffreddamento, l’ UE raccomanda anche soluzioni di tipo naturale, quali la collocazione di una vegetazione stradale, le coperture vegetali, tetti verdi e muri per l’isolamento e l’ombra agli edifici [3]. Una maggiore efficienza energetica degli edifici dovrebbe contribuire a rispettare anche gli impegni della Cop21. Inoltre, occorre sottolineare che nei climi più caldi è il raffreddamento degli ambienti a rappresentare la maggior parte del consumo – e tale consumo è in crescita. Al fine di implementare azioni finalizzate alla diminuzione della domanda di energia per il raffreddamento di ambienti, le attività di ricerca hanno preso in considerazione lo sviluppo di sistemi di coperture a verde per gli edifici, con particolare attenzione per la realizzazione di una tipologia prototipo di parete verde per un edificio civile localizzato presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia. Le attività di ricerca hanno preso in considerazione lo sviluppo di una fattibilità tecnica finalizzata alla verifica teorica della convenienza di utilizzare le coperture vegetali per aumentare l’efficienza energetica dei sistemi di condizionamento estivo nelle aree metropolitane. Contemporaneamente è stata portata avanti anche una attività di ricerca che ha preso in considerazione lo sviluppo di sistemi di *solar cooling* per il settore agricoltura, soprattutto per il comparto dei sistemi serra [4]. A questo proposito, il gruppo di ricerca ENEA-UTEE si è impegnato nella ottimizzazione di un impianto prototipo di *solar cooling*, installato presso il

campus tecnologico dell'Università degli Studi di Bari, precedentemente realizzato attraverso un contratto di ricerca europeo. Infatti, verificato sperimentalmente che il sistema di gestione e controllo del prototipo ha palesato, nelle prime prove effettuate, diversi problemi che hanno diminuito la potenzialità dell'impianto stesso, si è ritenuto di fare un *upgrade* sul sistema attuale per consentire la gestione dell'impianto prototipo da remoto ed effettuare il monitoraggio solo per un numero limitato di parametri. A tale proposito, si è resa necessaria la riprogettazione di un sistema di controllo in grado di aumentare la producibilità energetica dell'impianto di *solar cooling*. In questa prima annualità, pertanto, l'attività di ricerca ha incluso anche una valutazione comparativa sulla potenzialità degli impianti di *solar cooling* applicati ai sistemi serra, considerando i regimi incentivanti attualmente vigenti. Inoltre è stato progettato e realizzato un nuovo sistema di gestione e controllo dell'impianto, totalmente gestibile da remoto, che permetterà di effettuare la prima campagna sperimentale durante la prossima stagione estiva. Tale attività è stata svolta realizzando, a valle dei necessari studi propedeutici, i diagrammi di flusso che sono serviti per implementare le logiche di gestione nel controllore a bordo del sistema.

2 Stato dell'arte

I sistemi verdi di tipo "*Green Roofs (GR)*" e "*Green Walls (GW)*" utilizzati rispettivamente come coperture dei solai esterni (terrazzi e/o balconi) e come facciate verdi di parti strutturali di un edificio, costituiscono una superficie edilizia ricoperta da essenze vegetali. L'effetto isolante è dovuto allo strato d'aria che si crea tra la superficie verde e la superficie muraria, il quale funge da cuscinetto isolante sia nei periodi caldi e sia nei periodi freddi; inoltre una parte delle radiazioni infrarosse, irradiate dall'edificio, viene riflessa dalle foglie e un'altra parte viene assorbita (riduzione delle perdite di calore radiative dell'edificio); infine il cuscinetto di verde è in grado di attenuare i movimenti d'aria sulla superficie della costruzione, così da ridurre le perdite di calore per convezione. Sono stati simulati gli effetti di sistemi verdi di facciata sulla temperatura superficiale dell'involucro e sui consumi di energia degli edifici, utilizzando come variabile di riferimento la temperatura media radiante interna e l'energia utilizzata per il raffrescamento [5]. In particolare, sono stati ipotizzati tre scenari: il primo ipotizzava un edificio standard con muratura completamente opaca, in un primo caso ricoperto totalmente da vegetazione (scenario 1B) e in un secondo caso senza alcun tipo di protezione vegetale (scenario 1A); il secondo scenario era simile al primo, ma con la presenza di 7 finestre su ciascuna facciata simulato in due configurazioni, una con copertura vegetale (scenario 2B) una senza copertura vegetale sulle parti opache (scenario 2A); il terzo scenario ipotizzava un edificio completamente vetrato senza copertura vegetale (scenario 3A), e con una copertura vegetale, prima del 50% (scenario 3B) e successivamente del 100% (scenario 3C). E' emersa una riduzione dei consumi per raffrescamento in un ulteriore scenario, fino a valori di circa il 32%, che è raggiungibile con coperture vegetali ad alto LAI. Un indice ETTV (*Energy Thermal Transfer Value*) è stato calcolato per ogni scenario. L'indice ETTV è basato sul concetto di coefficiente di scambio termico globale e misura il carico termico in un edificio attraverso il suo involucro considerando l'ingresso di energia per conduzione tra le pareti e i vetri, e il coefficiente di *shading* per le finestre. L' ETTV più basso, pari a $35,32 \text{ W/m}^2$, è stato simulato con un coefficiente di *shading* per la parete vegetale di 0,041 e una efficienza pari a circa il 40%.

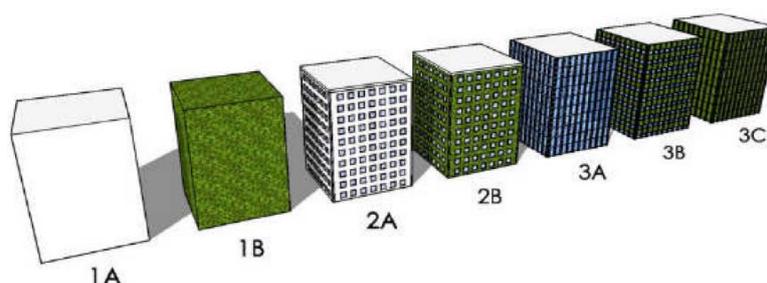


Figura 4. Differenti tipologie di inverdimento di edifici

Altri ricercatori hanno valutato l'effetto di sistemi di verde verticale sull'ambiente interno attraverso due esperimenti [6]. Il primo esperimento si è occupato di capire gli effetti dell'irrigazione sulla distribuzione di umidità nel substrato che accoglieva le piante; il secondo ha utilizzato un sistema di rivestimento verde verticale per studiare il potenziale di mitigazione dei carichi solari. Il test prevedeva l'installazione di 5 pannelli su ogni lato di un muro in calcestruzzo spesso 30 cm. Il monitoraggio è stato effettuato sia su di un muro ricoperto di vegetazione sia su di uno vicino lasciato appositamente scoperto. È emerso che le temperature medie dei moduli vegetali, misurate in corrispondenza del substrato, erano più basse delle temperature esterne anche di 14°C. Inoltre, considerazione importante, è emerso che più calde erano le giornate, migliore è risultato l'effetto di raffrescamento dato dai moduli vegetali che consentivano anche uno sfasamento di circa 14 ore. Per il muro nudo le temperature misurate sono arrivate anche a valori di 45 °C contro i 29 °C misurati sulla parete vegetale. Un ulteriore studio [7] ha riguardato una indagine di ricerca su 8 differenti sistemi di inverdimento verticale con l'obiettivo di valutare l'impatto di tali sistemi sulle performance energetiche degli edifici e sulle temperature prossime ai rivestimenti vegetali. Lo studio è stato condotto utilizzando come parametri di riferimento le temperature superficiali e quelle dell'aria ambiente. Le dimensioni dei muri in calcestruzzo retrostanti la struttura vegetale e di quella di controllo erano uguali e misuravano 4 m in larghezza e 8 m in altezza. Lo spessore del muro era di 30 cm. Il limite sperimentale risultava nel fatto che i muri erano esposti alla radiazione solare da entrambi i lati e non rappresentavano quindi una situazione reale di muro delimitante un ambiente chiuso e condizionato. Le temperature dell'ambiente esterno erano state monitorate ad una distanza di 15 cm, 30 cm, 60 cm e 100 cm. I risultati ottenuti hanno messo in luce un'evidente riduzione delle temperature superficiali delle pareti ricoperte da vegetazione, rispetto a una parete di controllo non coperta, con valori fino a 10°C. È inoltre emerso che il profilo di temperatura dell'ambiente esterno è modificato dalla presenza del sistema di vegetazione verticale fino ad una distanza di circa 15 cm e non oltre.

Un interessante modello matematico della radiazione solare incidente sulla parete verde è stato sviluppato in funzione degli angoli di incidenza e del coefficiente di torbidità. I risultati hanno dimostrato che i flussi di calore stagionali sulla parete verde variano con la variazione delle principali forzanti climatiche, in particolare della radiazione. L'effetto schermante del *green wall* assorbe l'energia solare impedendo che questa raggiunga la superficie del muro. Il muro a Sud, utilizzato negli esperimenti sul campo, mostra una riduzione dei flussi di calore entranti se confrontato con il muro posizionato a Nord.

Sono stati studiati [8] anche gli effetti sulla salute nell'ambiente abitato e gli aspetti economici e sociali conseguenti all'installazione di *Living Walls*. Viene fornita una classificazione dei sistemi di inverdimento e sottolineato come le piante possano offrire benefici nell'ambito urbano attraverso due meccanismi: schermatura diretta ed evapotraspirazione. Tali meccanismi portano, come già sottolineato da altri autori, alla riduzione delle temperature dell'aria e al miglioramento della qualità dell'aria attraverso la filtrazione delle polveri trasportate dall'aria. Da un punto di vista economico possono contribuire a ridurre i costi per le infrastrutture di smaltimento delle acque meteoriche grazie al contenimento dei flussi d'acqua piovana evitando così il sovraccarico delle strutture di drenaggio e possono aumentare la vita dell'involucro dell'edificio grazie alla riduzione dello stress climatico sulle facciate stesse. Infine, da un punto di vista sociale, possono aumentare la vivibilità degli spazi e favorire luoghi di incontro per il gioco, lo sport e la ricreazione. Sono state monitorate le temperature dell'aria e delle superfici su alcune installazioni di sistemi di inverdimento verticale sia diretti (sistemi che utilizzano piante rampicanti direttamente aderenti alla facciata dell'edificio) che indiretti (sistemi che utilizzano ancoraggi e supporti artificiali per le piante rampicanti) [9]. Inoltre, nello stesso lavoro, è stata monitorata la velocità del vento in alcuni punti nei pressi dell'installazione per poter studiare il profilo della velocità. Per i sistemi indiretti è stato dimostrato che la velocità dell'aria presenta una forte riduzione all'interno del fogliame, ma i valori di velocità dell'aria all'interno dell'intercapedine si ripristinano simili a quelli misurati all'esterno a circa 1 m dal *Living Wall*. In queste condizioni la componente della resistenza termica superficiale esterna legata alla velocità dell'aria non presenta differenze tra il caso con e senza parete vegetale. Diverse sono le conclusioni nel caso di sistemi diretti in cui la presenza di vegetazione direttamente a contatto con la parete, senza la formazione

di intercapedine, riduce la velocità del vento a valori vicini a 0 m/s, questo consente di ipotizzare che per la resistenza termica superficiale esterna si possa considerare una componente legata alla velocità dell'aria molto simile alla componente interna con dirette influenze sulla resistenza totale della parete. Gli stessi autori [10]. hanno sviluppato una analisi costi benefici per sei diversi sistemi vegetali. I costi possono andare da poche decine di euro al metro quadrato fino a molte centinaia di euro al metro quadrato a seconda del tipo di rivestimento e dei materiali utilizzati. Gli indicatori utilizzati per stimare la sostenibilità dell'intervento sono di tre tipi: *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR) e *PayBack Period* (PBP). Vengono poi considerati costi e benefici di tipo sociale (tra cui miglioramento della qualità dell'aria, impatti estetico e psicologico) e personale (riduzione dei consumi di raffrescamento e incentivi) e secondo tre scenari (migliore, medio, peggiore) Le conclusioni sono molto chiare: i sistemi diretti sono gli unici il cui NPV è positivo e il tempo di ritorno può variare da un minimo di 16 anni ad un massimo di 24 anni; praticamente tutti gli altri sistemi presentano un NPV negativo e in particolare i Living Walls presentano una insostenibilità economica che li porta ad avere un tempo di ritorno PBP maggiore di 50 anni dovuto ad alti costi di installazione e manutenzione. Infine, sul tema della valutazione ambientale globale anche altri autori hanno dato un importante e completo contributo [11]. Questo lavoro utilizza un altro indicatore ambientale chiamato Emergia da cui prende il nome la valutazione associata: *Emergy based Evaluation*. Rispetto ad altri indicatori ambientali comunemente utilizzati, l'Emergia pone molta attenzione ad informazioni complementari (costi e benefici ambientali) per valutare la sostenibilità o meno degli interventi analizzati. L'analisi è stata condotta per *Living Walls* ad intercapedine aperta e chiusa coltivati ad erba e giardino rispettivamente. I risultati mostrano come entrambi i tipi di rivestimento, in certe condizioni climatiche e costruttive (muro massivo orientato a Sud in clima mediterraneo), possano raggiungere una condizione "emergetica" neutrale in 25 anni come calcolato utilizzando l'indicatore CBR che esprime il rapporto tra i costi (energia e materiali) ed i benefici ambientali (risparmio energetico) [12]. In generale, tutte le informazioni raccolte in letteratura mostrano come gli effetti della presenza di rivestimenti vegetali siano prevalentemente collegati alla riduzione delle temperature superficiali dovuta all'evidente effetto schermante e ad una potenziale riduzione dei consumi di raffrescamento. Si possono raggiungere riduzioni nell'ordine dei 20°C e qualche autore ha legato la presenza dei *Living Walls* anche a riduzioni nei consumi di raffrescamento fino al 70%. Tuttavia, se per la riduzione delle temperature superficiali è stato possibile effettuare un monitoraggio direttamente sul campo, come proposto nei vari articoli citati, più complesso è stimare il beneficio sui consumi di raffrescamento; per tali valutazioni è necessario affidarsi alla modellazione numerica e alle simulazioni dinamiche. La rappresentazione del sistema fisico è stata realizzata per mezzo di un modello dinamico e monodimensionale [13]. La Figura 5 evidenzia i flussi energetici che si considerano nel modello, assumendo positivi i flussi energetici in ingresso; i termini presenti nella figura sono spiegati in Tabella 1.

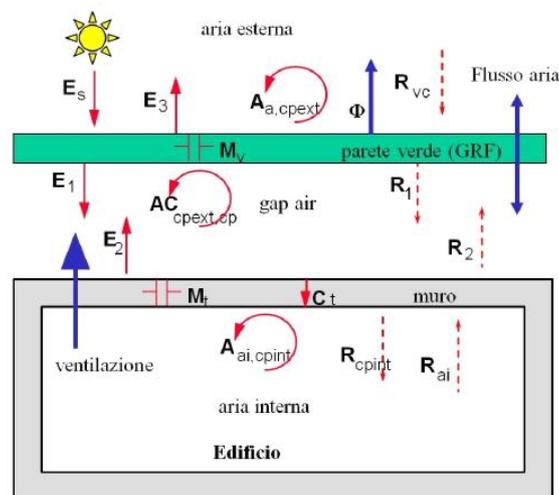


Figura 5. Modello dei flussi energetici di un prototipo di parete verde

Le equazioni di bilancio energetico, cui si aggiungono le equazioni per la rappresentazione del regime termico nella muratura, sono: GRF (nella formula indicato con "cpext"):

GRF (nella formula indicato con "cpext"):

$$E_s + E_2 - E_3 - E_1 + A_{a,cpext} - AC_{cpext,cp} + \varepsilon_{cpext} (R_{vc} + R_2) - 2\varepsilon_{cpext} \sigma T_{cpext}^4 - \Phi + M_v = 0 \tag{1}$$

superficie esterna muratura:

$$E_1 - E_2 + AC_{cpext,cp} + \varepsilon_{cp} R_1 - \varepsilon_{cp} \sigma T_{cp}^4 + C_t - M_t = 0 \tag{2}$$

superficie interna muratura:

$$\varepsilon_{cp} R_{ai} - \varepsilon_{cp,int} \sigma T_{cp,int}^4 + A_{ai,cpint} = 0 \tag{3}$$

aria interna:

$$A_{ai,cpint} - KT(T_{ai,ext} - T_{ai}) - H_{vent} = 0 \tag{4}$$

Tabella 1. Modello generale per il calcolo dei flussi energetici nelle coperture vegetali

A = trasmissione di calore per convezione [W/m ²]	T = temperatura [K]
AC = trasmissione di calore per conduzione-convezione [W/m ²]	t = tempo [s]
C = trasmissione di calore per conduzione [W/m ²]	v = velocità del vento [m/s]
Φ = scambio di calore per evapotraspirazione [W/m ²]	clv = calore latente di evaporazione [J/Kg]
Cp = capacità termica massica [J/Kg K]	z = spazio discreto nel muro [m]
D = diffusività termica [m ² /s]	β' = coeff. Volumetrico di espansione aria β' = 1/T [1/K]
E = radiazione nel solare (0.3-3μm) [W/m ²]	ε = emissività [%]
g = costante gravitazionale g = 9.8 [m/s ²]	γ = angolo di inclinazione materiali di copertura rispetto al piano orizzontale = 0°
Hvent = energia asportata per ventilazione [W/m ²]	LAi = indice di area fogliare
h = coefficiente convettivo [W/m ² K]	λ = conduttività termica [W/m K]
K T = coefficiente globale di trasm. [W/m ² K]	ν = viscosità cinematica [m ² /s]
L = distanza [m]	ρ = coefficiente di riflessione [%]
M = capacità di accumulo termico [W/m ²]	pd = massa volumica [Kg/m ³]
Nu = numero di Nusselt	σ = costante di Stefan-Boltzmann σ = 5.6697x10 ⁻⁸ [W/m ² K ⁴]
R = flusso di energia radiante nell'IR lungo (>3μm) [W/m ²]	τ = coefficiente di trasmissione [%]
Ra = numero di Rayleigh	
Pedici	
a = aria	Δ = intercapedine
cp = superficie esterna muro	j = contatore passo temporale Δt
cpint = superficie interna muro	k = contatore passo spaziale Δz
cpext = parete verde o GRF	r = banda dell'infrarosso lungo (>3μm)
ext = esterno	s = banda della radiazione solare (0.3-3μm)
i = interno	t = muro
int = interno	vc = volta celeste

Al fine di valutare la riduzione di energia per effetto della copertura verde, si è ritenuto opportuno definire

un indice detto “costante verde” (K_v *green factor*), il quale descrive il comportamento energetico delle diverse specie vegetali che si possono utilizzare per la realizzazione di una parete verde [14], [15]. Il *green factor* varia tra 0 e 1: è pari a zero nel caso in cui le temperature superficiali sono uguali in assenza e in presenza di parete verde; mentre è pari a 1 quando la temperatura superficiale della parete verde è pari a quella dell’aria. La formula di definizione della costante verde è la seguente:

$$K_v = \frac{T_s - T_{sv}}{T_s - T_{air}} = 1 - \tau_v \frac{h_e}{h_e^*}$$

Le variabili necessarie per il calcolo di tale costante sono:

T_{air} : la temperatura dell’ambiente esterno;

T_s : la temperatura superficiale della parete nuda (in assenza del verde);

T_{sv} : la temperatura superficiale della parete con copertura verde;

τ_v : coefficiente di trasmissione solare dello strato verde;

h_e, h_e^* : coefficienti di trasmissione del calore per la superficie senza e con strato verde.

Nota la temperatura dell’ambiente esterno e calcolata la temperatura superficiale della parete non coperta da verde, è possibile determinare *la temperatura superficiale della parete in presenza di verde* a seconda della specie scelta (T_{sv}):

$$T_{sv} = T_s - K_v (T_s - T_{air}) = (1 - K_v) T_s + K_v T_{air}$$

Come si può notare, la temperatura superficiale in presenza di strato verde è una media ponderale tra T_s e T_{air} ; quindi nel periodo diurno, in presenza di irraggiamento solare, $T_{air} < T_{sv} < T_s$. La Tabella 2 e 3 riportano i valori del *green factor* per alcune specie vegetali, derivati da esperienze concrete di misura, usualmente utilizzate per la realizzazione di una parete verde.

Tabella 2. Simulazioni su essenze vegetali presso Politecnico di Torino

SPECIE ANALIZZATA	K_v
<i>Actinidia</i>	0,36
<i>Wisteria</i>	0,52
<i>Ampelopsis</i>	0,61
<i>Parthenocissus</i>	0,65
<i>Rincospermo</i>	0,69
<i>Hedera</i>	0,82

Tabella 3. Misure su essenze vegetali sperimentate presso l’Università di Bari

COPERTURA VERDE	K_v
<i>Rhyncospermum jasminoides</i>	0,81
<i>Pandorea jasminoides variegata</i>	0,95

Dopo aver individuato la differenza tra la temperatura su parete verde e la temperatura su parete nuda, è possibile valutare i conseguenti vantaggi dal punto di vista energetico.

In particolare il modello adottato ci permette di quantificare la riduzione di energia entrante nell'edificio per effetto della schermatura verde; infatti si ha :

$$\frac{E}{A} = U(T_{sol-air} - T_i) t \quad (\text{senza parete verde})$$

$$\frac{E^*}{A} = U(T_{sol-air}^* - T_i) t \quad (\text{con parete verde})$$

E, E*: energia entrante all'interno dell'edificio tramite l'involucro, senza e con parete verde;

$T_{sol-air}$, $T_{sol-air}^*$: temperature sol-air senza e con parete verde;

T_i : temperatura della superficie interna dell'involucro. Si suppone che la temperatura interna sia regolata e quindi uguale per le due situazioni senza e con parete verde;

U : coefficiente di trasmittanza dell'involucro;

t : tempo su cui si valuta la differenza di energia;

G : radiazione solare totale mediata sull'intervallo t;

A : area dell'involucro interessata allo scambio di calore.

Eseguendo la differenza tra le due grandezze sopra riportate, si ottiene:

$$\begin{aligned} \frac{E - E^*}{A} &= U(T_{sol-air} - T_{sol-air}^*)t = U(T_{air} + \alpha \frac{G}{h_e} - T_{air} - \tau_v \alpha \frac{G}{h_e^*})t = U\alpha \frac{G}{h_e} (1 - \tau_v \frac{h_e}{h_e^*})t = \\ &= U K_v \alpha \frac{G}{h_e} t \quad (\text{Risparmio energetico sull'intervallo } t). \end{aligned}$$

Le pareti verdi e i tetti verdi attenuano l'incidenza della radiazione solare sul costruito, evitando il surriscaldamento degli edifici e, pertanto, determinano anche i carichi di condizionamento mantenuti per il comfort termo-igrometrico dell'ambiente interno degli edifici e dell'area circostante il costruito. I GR e i GW sono in grado di mitigare i picchi di temperatura estivi grazie all'ombreggiamento nei confronti dell'irraggiamento solare diretto sugli edifici e sulle superfici circostanti e all'evapotraspirazione delle piante consentendo, in questo modo, un comfort maggiore degli edifici durante i periodi caldi (Tabella 4).

Tabella 4. Differenze di temperatura

Elemento protettivo	Riduzione media della temperatura diurna (°C)	
	In assenza di radiazione solare diretta	In presenza di radiazione solare diretta
Pianta rampicante poco densa	4,4	7,7
Pianta rampicante molto densa	4,2	8,9

La schermatura della radiazione solare incidente sugli edifici mediante l'applicazione di sistemi vegetali oltre ad apportare un vantaggio microclimatico rispetto ai consumi di energia per il raffrescamento estivo [15], favorisce lo sfasamento dei picchi di temperatura, ossia il ritardo temporale con cui il picco massimo di temperatura sulla superficie esterna, raggiunge la superficie interna priva di coperture verdi (Figura 6).

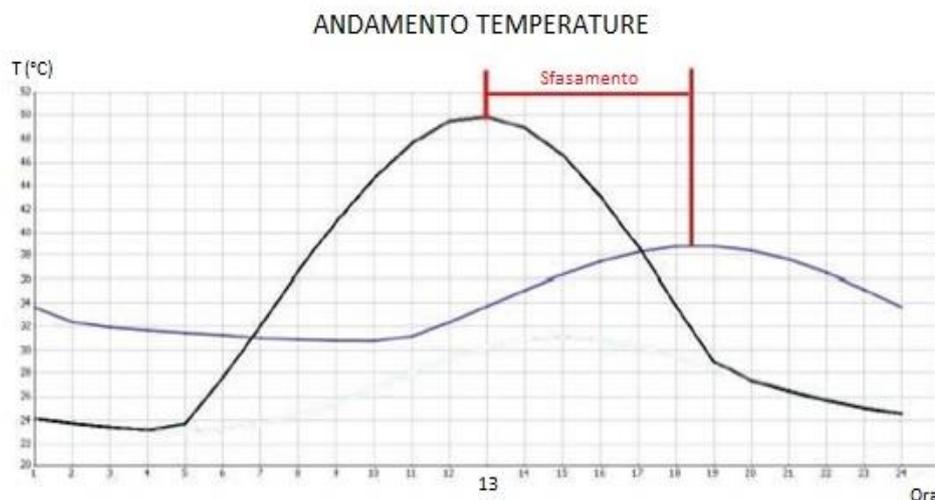


Figura 6. Simulazione teorica su un “tetto verde” che mostra il ritardo con cui l’onda termica raggiunge la superficie interna della copertura verde (curva blu) rispetto alla superficie esterna (curva nera).

Il fenomeno dello sfasamento è molto importante rispetto al consumo elettrico degli impianti di condizionamento nelle aree geografiche dove la richiesta di energia elettrica cade tra la tarda mattinata e le prime ore del pomeriggio: uno sfasamento di tre ore, per esempio, produce una riduzione di energia elettrica per soddisfare il funzionamento dei condizionatori in quanto viene spostato il picco di temperatura su temperature dell’aria meno elevate, con vantaggi sia economici e sia ambientali.

3 Normativa esistente per le coperture vegetali

La tecnologia dei moderni tetti verdi ha avuto origine e si è sviluppata soprattutto nei paesi del nord Europa caratterizzati da un clima a piovosità costante mentre non è ancora molto diffusa nell’area mediterranea. L’utilizzo di specie autoctone adattate a condizioni climatiche mediterranee (elevata temperatura e siccità estiva, piovosità invernale, vento) potrebbe essere una soluzione sostenibile per la realizzazione di tetti verdi in ambiente mediterraneo, oltre a contribuire alla tutela della biodiversità locale.

La regione climatica mediterranea, con la sua eccezionale diversità di specie, contiene diversi habitat che possono rappresentare “modelli” per una copertura a verde soprattutto rispetto alle essenze autoctone che dal punto di vista ecologico e per l’aspetto manutentivo, presentano le migliori caratteristiche biologiche ed agronomiche per la realizzazione di sistemi vegetali sulle superfici orizzontali e/o verticali degli edifici. Questo tipo di tecnologie vegetali offrono diversi tipi di benefici a partire da quelli che riguardano i miglioramenti del microclima esterno fino ad arrivare a benefici riguardanti gli ambienti interni degli edifici. Infatti l’ambiente esterno in ambito urbano è ormai caratterizzato dalla presenza di molte sostanze inquinanti, derivanti dalle attività industriali, dai gas di scarico delle automobili, dai riscaldamenti degli edifici e dallo squilibrio termico generato dalla sostituzione del tessuto naturale con quello costruito, che spesso determina la formazione di vere e proprie “isole di calore”.

La costruzione di tetti verdi e pareti verdi sebbene possano variare nei diversi paesi, in linea generale, si possono applicare a:

- aree industriali,
- centri-semi-periferie delle città,
- edifici residenziali (quartieri nuovi) e comunali (soprattutto scuole).

L'uso delle piante in funzione di copertura di superfici costruite (edifici), ai fini del miglioramento ambientale e delle prestazioni energetiche dell'edificio, risulta ancora scarsamente definita ed articolata se consideriamo che la normativa cogente si riferisce soprattutto al verde di tipo orizzontale ossia distribuito sulle aree pubbliche o collocato sulle superfici piane degli edifici (tetti verdi). Per quanto riguarda invece i sistemi per il verde verticale, soltanto alcune norme locali e regionali contribuiscono a regolare tecnicamente l'impiego di coperture con vegetazione collocate in modo da svilupparsi verticalmente sulle facciate degli edifici con funzione di schermatura della radiazione solare o per migliorare il microclima dell'aria (diminuzione della temperatura dell'aria attraverso il fenomeno bio-fisico della traspirazione delle piante) che circonda l'edificio. Attualmente, l'integrazione del verde nelle strutture edilizie delle aree urbane del nostro Paese, risulta regolata da una normativa di riferimento specifica per le tipologie di coperture vegetali "tetto verde".

Tale normativa ha come riferimento la norma UNI 11235:2007 "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde", recentemente aggiornata dalla norma 11235:2015, che sebbene non sia una legge tuttavia costituisce un riferimento essenziale per la tematica del verde pensile [16]. Tale norma oltre ad indicare le "regole dell'arte" per quanto riguarda la progettazione, l'esecuzione e il controllo delle coperture a verde riporta anche le indicazioni necessarie per la manutenzione dei sistemi vegetali. Particolare attenzione viene posta per quanto riguarda il sistema colturale realizzato su substrato e le indicazioni dei parametri biologici che determinano le tecnologie e la gestione agronomica delle essenze vegetali quando utilizzate per le coperture verdi sugli edifici, i.e.: pH, conducibilità elettrica, permeabilità, capacità e controllo della ritenzione idrica dei substrati. La Tabella 5 elenca le principali norme attualmente in vigore in Italia.

Tabella 5. Legislazione sulle coperture verdi

NORME NAZIONALI ED EUROPEE	
Legge n. 10 del 14 giugno 2013	Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani che riconosce l'importanza della vegetazione per l'ambiente.
D.P.R. 59/09	L'articolo 4 riporta che il progettista al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti, nel caso di edifici di nuova costruzione e nel caso di ristrutturazioni di edifici esistenti...può utilizzare "tecniche e materiali, anche innovativi, ovvero coperture a verde....."
UNI 11235:2015	"Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde". La norma definisce i criteri di progettazione, esecuzione, controllo e manutenzione di coperture continue a verde, in funzione delle particolari situazioni di contesto climatico, di contesto edilizio e di destinazione d'impiego.
Legge 14 gennaio 2013, n. 10, "Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani. (13G00031), (GU n.27 del 1-2-2013). Vigente al: 1-2-2013.	Prende in considerazione il verde pubblico, nelle sue diverse possibili declinazioni.
Legge 83/2012 per interventi volti al recupero e alla ristrutturazione degli edifici.	Prevede sgravi fiscali in funzione del tipo di interventi
Bruxelles, 16.2.2016,	COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE AL PARLAMENTO EUROPEO, AL

COM(2016) 51 final	CONSIGLIO, AL COMITATO ECONOMICO E SOCIALE EUROPEO E AL COMITATO DELLE REGIONI. Una strategia dell'UE in materia di riscaldamento e raffreddamento. {SWD(2016) 24 final}.
--------------------	---

NORME ENTI LOCALI E REGIONI IN ITALIA	
Comune di Collegno, Allegato Energetico del 5/03/09	Impone l'obbligo di mettere in opera coperture verdi per il 30% della superficie costruita; inoltre considera l'integrazione di coperture verdi per ridurre l'effetto isola di calore per i nuovi edifici residenziali qualora almeno il 50% della copertura sia libera e non occupata da impianti solari.
R.I.E (Riduzione Impatto Edilizio) del 2007	Il verde pensile è annoverato fra gli strumenti di mitigazione e compensazione ambientale per il raggiungimento di determinate prestazioni che devono essere garantite per ottenere la concessione.
Regolamento Edilizio di Firenze, 2007	L'articolo 3 riporta per diminuire l'effetto isola di calore: interventi sull'albedo e uso del verde, riporta indicazioni relative all'uso e alla disposizione di vegetazione per l'ombreggiamento di facciate esposte alla radiazione solare.
Regolamento Edilizio comunale di Genova, 2010. Nell'Articolo 54 "Coperture piane", Indicazioni progettuali per l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche degli edifici	Viene esplicitata la volontà di incentivare l'impiego di coperture verdi e di schermature vegetali per ridurre il surriscaldamento estivo, qualora sia garantito il corretto rispetto ai caratteri architettonici dell'edificio.
Regolamento Edilizio del Comune di Vezzano Ligure (LA Spezia)	Riconosce le funzioni ambientali e microclimatiche della vegetazione per la qualità ecosistemica e definisce i criteri per la progettazione di coperture vegetali.
L'ART.19 bis "Procedura per la riduzione dell'impatto edilizio" del R.E. del Comune di Bolzano, del 10.02.2004 rende obbligatoria l'adozione della procedura R.I.E.per gli interventi di qualsiasi natura che incidano sulle superfici esterne (coperture, terrazze, sistemazioni esterne, cortili, aree verdi, aree pavimentate, ecc.).	E' stato dato un coefficiente moltiplicativo diverso in base alle diverse categorie di superfici. Alla copertura verde, viene dato un coefficiente oscillante tra 0.20 e 1.00, in base ai diversi spessori di terreno utilizzati e alla diversa pendenza della copertura stessa. Non vengono però date indicazioni in merito all'uso del verde in facciata.
Norme tecniche di Attuazione del P.R.G. di Roma (2004)	All'art.10 comma 7 viene citata la categoria "Miglioramento bioenergetico" (MBE). Tra i vari tipi di intervento, vi è anche l'uso del verde con finalità di regolarizzazione microclimatica e di protezione dall'inquinamento acustico e atmosferico.
Linee guida al regolamento edilizio mirate alla sostenibilità degli interventi sul	Riportano gli incentivi previsti (incentivi di natura procedurale, economica ed edilizia), in misura del 25% della superficie "dell' intero sviluppo di prospetti e copertura dell'edificio". Le tipologie considerate prendono in considerazione casi in cui la vegetazione è ancorata direttamente alla

<p>territorio, del Comune di Brescia, emanate all'inizio del 2008.</p>	<p>struttura o inserita in un apposito strato separato dall'involucro attraverso una sottile lama d'aria; oppure strutture sovrapposte alle pareti dell'edificio ricoperte da specie rampicanti con sviluppo denso; o strutture costituite da piante messe a dimora in appositi contenitori purchè realizzate con continuità.</p>
--	---

<p>L'ART.19 bis "Procedura per la riduzione dell'impatto edilizio" del R.E. del Comune di Bolzano, del 10.02.2004 rende obbligatoria l'adozione della procedura R.I.E.per gli interventi di qualsiasi natura che incidano sulle superfici esterne (coperture, terrazze, sistemazioni esterne, cortili, aree verdi, aree pavimentate, ecc.).</p>	<p>E' stato dato un coefficiente moltiplicativo diverso in base alle diverse categorie di superfici. Alla copertura verde, viene dato un coefficiente oscillante tra 0.20 e 1.00, in base ai diversi spessori di terreno utilizzati e alla diversa pendenza della copertura stessa. Non vengono però date indicazioni in merito all'uso del verde in facciata.</p>
--	--

<p>NORMATIVE, INCENTIVI, SGRAVI FISCALI NELLE CITTA' NELLE CITTA' EUROPEE O INTERNAZIONALI</p>	
<p>Basilea, Zurigo, Lucerna</p>	<p>Dal 2005 prevedono l'obbligo di inverdire, tutte le coperture delle nuove costruzioni.</p>
<p>L'Amministrazione pubblica di Berlino è stata la prima a definire un metodo applicativo al fine di incrementare la presenza del verde all'interno della città.</p>	<p>La procedura utilizzata si basa sul B.A.F. ("biotope area factor"). Simile ad un normale indice urbanistico, come la superficie coperta e la superficie fondiaria, il B.A.F. esprime la porzione destinata a piante o ad altre funzioni legate all'ecosistema.</p>
<p>Copenaghen</p>	<p>Vige l'obbligo di inverdire tutte le coperture piane o con inclinazione inferiore a 30° degli edifici pubblici e privati.</p>
<p>Singapore</p>	<p>Il National Parks Board (NParks) promuove e incentiva l'integrazione di verde urbano, coperture verdi e facciate verdi nell'area urbana di Singapore.</p>
<p>Tokio</p>	<p>Nel 2001 è stato attuato il Tokio Plan 2000 che prevede l'obbligo per le nuove costruzioni con coperture maggiori di 1000 m2 di inverdire almeno il 20%.</p>
<p>Malmo (Svezia)</p>	<p>Linee Guida per le coperture verdi e le facciate verdi (muri vegetali). La valutazione del valore ecologico dei singoli interventi è stata fatta attraverso l'uso del "Green Space Factor", sulla base dell'esperienza berlinese del B.A.F.</p>
<p>La città di Seattle (USA) ha emanato l'ordinanza n. 122311, che regola il "Seattle Green Factor" (SGF) è in vigore da gennaio 2007.</p>	<p>Linee Guida per le coperture verdi e le facciate verdi (muri vegetali). La procedura è stata resa attiva attraverso la definizione del "Seattle Green Factor" (SGF) in accordo con l'esperienza di Berlino e Malmö.</p>
<p>New York, Linz, Monaco, Colonia, Stuttgart, Basilea, London,</p>	<p>Prevedono incentivi o sgravi fiscali per gli edifici oppure parametri che aumentano il valore dell'edifici dotati di sistemi vegetali.</p>

Chicago, Los Angeles, Milwaukee, Minneapolis, Philadelphia, Portland, San Francisco, Washington, Boston	
--	--

4 LE COPERTURE VEGETALI PER L'EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI

La UNI 11235:2007, di recente aggiornata al 2015, distingue le coperture a verde in coperture estensive o a bassa manutenzione e coperture intensive o a media e alta manutenzione. La differenza tra le due tipologie consiste nello spessore dei substrati, inferiore ai 20 cm delle coperture estensive, superiore ai 20 cm delle coperture intensive leggere, da cui consegue un diverso impegno manutentivo e una diversa accessibilità. Esiste anche una tipologia di tetto verde intensivo pesante (spessore anche superiore 30-40 cm) che permette la piantumazione di essenze di medie dimensioni e la cui fruibilità è simile a quella di un giardino a terra. Un'ulteriore differenza è il peso delle stratificazioni: dai 90-150 kg/mq delle coperture verdi estensive ai 200 kg/mq di quelle intensive fino a carichi di oltre 350 kg/mq di quelle intensive pesanti . L'applicazione dei sistemi vegetali agli edifici, richiede la valutazione in fase progettuale di una serie di parametri tra i quali particolarmente importanti risultano la scelta delle essenze vegetali e i relativi consumi di acqua. Infatti, la sostenibilità del sistema edificio-copertura vegetale richiede prioritariamente sia di non trascurare il quantitativo di acqua necessario per le piante, sia di privilegiare essenze autoctone. Il sistema alla base dei processi di scambio energetico considera diversi strati: aria esterna, vegetazione, aria compresa nell'intercapedine tra la copertura verde e la parete esterna dell'edificio, superficie esterna della parete dell'edificio, parete dell'edificio, superficie interna della parete, aria interna all'edificio. Nell'ambito di tali strati si attivano processi di trasmissione del calore di tipo radiativo, dovuti sia alla radiazione solare sia alla radiazione nell'IR lungo emessa e ricevuta dalle superfici, di tipo convettivo, tra GRF ed aria e tra superfici dell'edificio ed aria, e di tipo conduttivo nelle pareti. In generale, il bilancio energetico di una copertura vegetale è espresso dall'equazione:

$$Q = q_h + q_e + q_s + q_p$$

La quota di radiazione solare assorbita dalla copertura vegetale viene utilizzata per i processi energetici quali fotosintesi (Q_p), respirazione e traspirazione, per quelli metabolici (crescita e sviluppo), in parte trattenuta come calore sensibile (Q_h) e in parte dissipata come calore latente (Q_e), la rimanente quota invece viene ripartita e dissipata tra il sistema suolo-biomassa-atmosfera (Q_s). Mentre i valori di Q_s e Q_p risultano molto bassi, i valori più elevati di Q_p sono variabili nel range 5-16 W/m² di superficie fogliare. I valori relativi alle perdite di calore sensibile e latente tra la superficie fogliare e l'atmosfera risultano invece considerevoli in quanto fortemente dipendenti dai gradienti di umidità e temperatura da cui dipendono gli scambi convettivi tra la superficie fogliare e l'atmosfera (nel processo di traspirazione della pianta, per l'evaporazione di 1 kg di acqua sono necessari circa 2500 kJ) [17]. Un elemento che contribuisce a diminuire il carico radiante sull'edificio è costituito dal fenomeno dell'albedo, che indica la frazione di radiazione solare incidente che viene riflessa da una superficie sulla quale incide la radiazione solare, condizionando quindi la sua capacità di assorbire la stessa radiazione solare. Per quanto riguarda l'albedo di una copertura vegetale (Tabella 6), che rappresenta il coefficiente di riflessione totale, cioè tutte le lunghezze d'onda, si è visto che il suo valore varia tra 0,12 e 0,30 per molte specie vegetali (il suo valore è inversamente proporzionale all'altezza della vegetazione) (Figura 7)[18].

Tabella 6. Valori tipici del fattore di albedo

<i>Superfici riflettenti</i>	<i>Coefficienti</i>
Neve	0,75
Superfici acquose	0,07
Suolo (creta, marne...)	0,14
Strade sterrate	0,04
Bosco in inverno	0,07
Bosco in autunno	0,26
Asfalto invecchiato	0,22
Foglie morte	0,3
Erba secca	0,2
Erba verde	0,26
Tetti o terrazzi in bitume	0,13
Pietrisco	0,2
Superfici scure di edifici	0,27
Superfici chiare di edifici	0,6

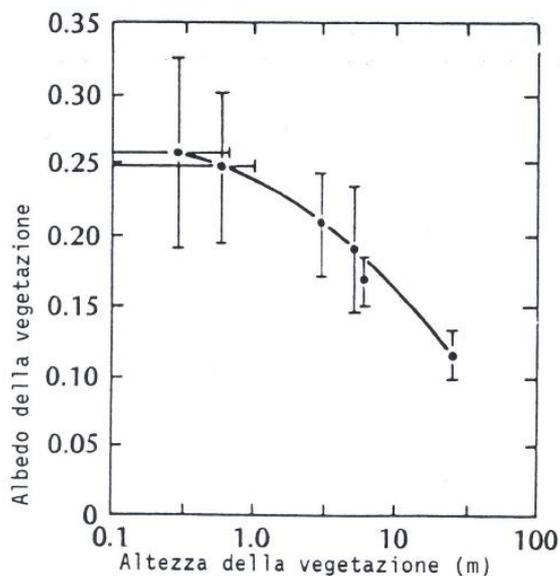


Figura 7. Relazione tra l'albedo della vegetazione e la sua altezza

Le coperture verdi riducono la temperatura superficiale dell'aria circostante in quanto oltre a dissipare una quota significativa dell'energia solare incidente attraverso l'evapotraspirazione presentano anche una albedo fortemente inferiore a quella delle superfici costruite.

4.1 LAI (Leaf Area Index)

Il LAI (*Leaf Area Index*) è un indice adimensionale pari all'area della superficie fogliare (m²) per unità di superficie di terreno (m²) [19]. Poiché la funzione principale dell'area fogliare è di intercettare la radiazione

solare, il LAI deve essere massimo quando è massima la disponibilità di radiazione. IL LAI viene definito come il rapporto tra la superficie fogliare totale e la superficie del suolo su cui le foglie si proiettano.

$$LAI = \frac{\text{Area Fogliare Totale}}{\text{Area al Suolo}}$$

Il LAI è un indice non normalizzato: mentre è ben definito che il valore 0 corrisponde al suolo nudo, i valori del LAI per i vari tipi di vegetazione possono variare dallo 0 a un arbitrario numero positivo (infatti le foglie, quando la vegetazione è fitta, possono sovrapporsi e la loro area totale può superare l'area del suolo sottostante la pianta). L'estinzione della luce al crescere della "profondità" della massa fogliare segue la legge di Lambert-Beer:

$$I_z = I_0 e^{-k LAI}$$

dove :

I_z è l'intensità di radiazione ad una certa profondità dalla cima della copertura vegetale alla profondità Z ,

I_0 è la radiazione incidente alla cima della copertura,

k è un coefficiente di estinzione che dipende dal tipo di vegetazione presente.

Maggiore il LAI maggiore la quota di radiazione intercettata, minore quella che arriva al terreno. Il LAI con 90% di intercettazione della radiazione incidente è compreso tra 3 e 5 (Figura 9). A parità di LAI l'intercettazione può essere diversa in relazione all'architettura delle foglie di piante differenti, sulla base dei seguenti parametri:

K = coefficiente di estinzione della radiazione solare, $K=1$ per foglie planofile (dipende dall'angolo di inserzione della foglia). Se consideriamo:

I = radiazione disponibile alla superficie del terreno,

I_0 = quantità di radiazione disponibile sopra la copertura vegetale,

I/I_0 = frazione di radiazione intercettata,

quindi abbiamo:

$$I/I_0 = e^{-KL}$$

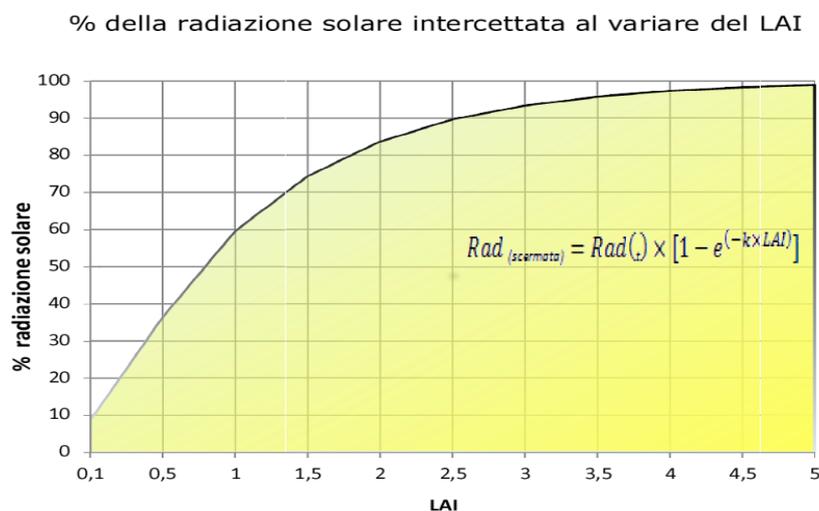


Figura 8. Valori della variazione del LAI

L'indice di area fogliare dipende da alcuni fattori quali: la fase di sviluppo della pianta bosco, le condizioni climatiche del sito in cui si misura il parametro. Il LAI è estremamente variabile, in primavera ed in autunno e può cambiare anche giorno per giorno in relazione allo stato fisiologico e alle cure colturali (Figura 9).

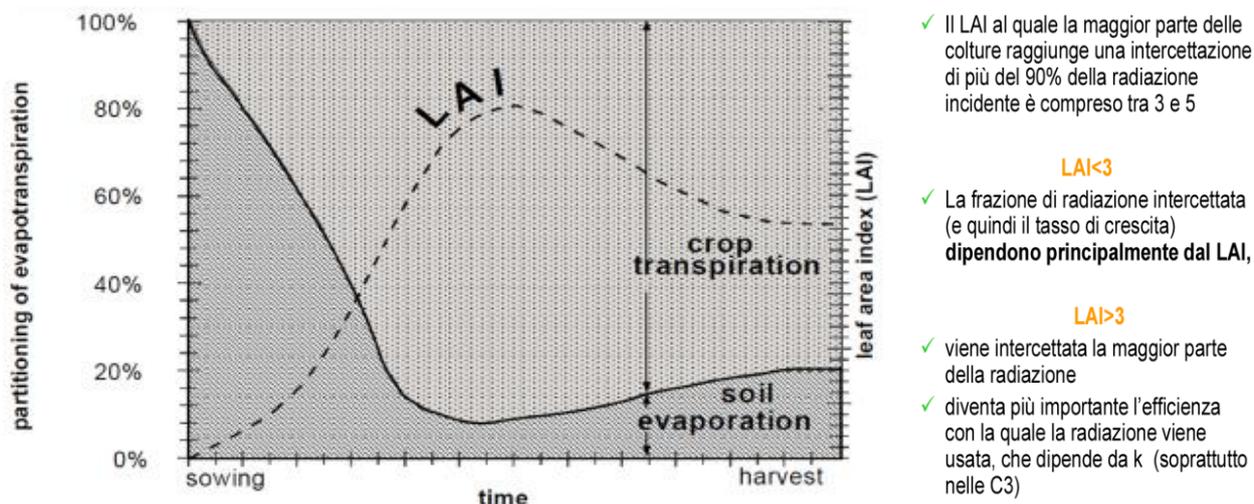


Figura 9. Relazioni tra il LAI, la evapotraspirazione e il ciclo colturale

5 Le coperture vegetali per migliorare l'efficienza energetica dei sistemi di condizionamento

La copertura verde fornisce prestazioni di isolamento termico in inverno e di raffrescamento nel periodo estivo, consentendo consistenti risparmi nei costi di riscaldamento e di condizionamento, in confronto ad una copertura tradizionale non inverdita. L'efficacia del raffrescamento estivo mediante coperture verde realizzate su sistemi senza suolo (soil-less) [20] e integrate in fabbricati per uso civile o industriale, dotati di sistemi di condizionamento, risulta particolarmente efficace soprattutto in zone molto soleggiate. L'obiettivo principale della realizzazione della combinazione sistema idroponico-sistema di condizionamento, che si può realizzare sia su una parete verticale (Figura 10) e sia su una superficie orizzontale (Figura 11) risiede nella capacità della copertura verde di aumentare l'umidità dell'aria che circonda il sistema di condizionamento e, in questo modo, di abbassare la temperatura dell'aria di alcuni gradi con vantaggi in termini di efficienza energetica del sistema di condizionamento [21]. Da sottolineare che la combinazione idroponica-condizionamento, valida soprattutto nei periodi caldi, presuppone l'impiego di accortezze tecniche in ordine alle strutture e rispetto alla resistenza del carico costituito dal sistema vegetale e dalle specie vegetali coltivate che dovrebbero assicurare la maggiore traspirazione di acqua (non inferiore a $2 \text{ mm/m}^2/\text{giorno}$) [22].



Figura 10. Unità esterna del condizionamento

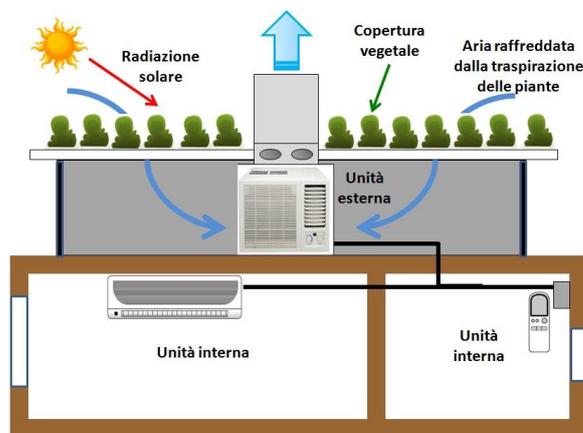


Figura 11. Sistema di condizionamento per edifici

5.1 Sistemi vegetali senza-suolo (soil-less) per gli edifici

La parola *idroponica* identifica la coltivazione delle piante in una soluzione acquosa contenente gli ioni minerali necessari per il processo di accrescimento. Più in generale, il termine comprende tutti i metodi di coltivazione senza suolo (*Soil-less culture*), anche quelli - senz'altro i più adatti per le coperture verdi sugli edifici - che prevedono l'impiego di un substrato diverso dal comune terreno. Gli elementi di una coltura idroponica sono sostanzialmente i seguenti:

1. (nelle colture in contenitore) un substrato inerte e sterile, di origine naturale (torba, pomice, sabbia, ghiaia,..) od artificiale (perlite, argilla espansa, lana di roccia), con la funzione di sostenere la pianta ed assicurare un certo volano chimico e fisico (idrico e termico);
2. una soluzione nutritiva con particolari caratteristiche chimiche (pH, EC, composizione salina);
3. un sistema di erogazione della soluzione nutritiva (fertirrigazione) in grado di fornire continuamente o con un'elevata frequenza la soluzione nutritiva alle piante;
4. un sistema di controllo delle soluzione nutritiva (non necessariamente automatico o computerizzato).

In modo estremamente sintetico, due sono i principi fondamentali dell'idroponica:

- un ambiente radicale sano, se non proprio sterile, poiché la soluzione nutritiva ricircolante e l'assenza di un volano microbiologico in grado di contenere la virulenza dei patogeni determinano le condizioni per una rapida diffusione delle malattie a carico dell'apparato radicale;
- una soluzione nutritiva equilibrata dal punto di vista chimico-nutrizionale.

La prima condizione può essere garantita da una serie di interventi preventivi, quali il lavaggio e la disinfezione degli impianti e della serra alla fine di ogni coltura, e soprattutto l'impiego di materiale di propagazione sano (preparato quindi in ambienti e in substrati privi di patogeni). La seconda condizione è garantita, oltre che dalla scelta di un formula nutritiva adeguata, da un continuo monitoraggio e aggiustamento della soluzione (soprattutto nei sistemi chiusi, cioè a soluzione ricircolante), le cui caratteristiche sono più o meno rapidamente modificate dall'assorbimento idrico e minerale delle piante. Infine, si sottolinea che ai fini della sostenibilità dei sistemi vegetali è raccomandabile l'impiego sia di substrati naturali e sia di acqua piovana o da reflui degli edifici opportunamente trattati.

5.2 Sistemi di condizionamento per il raffrescamento estivo

Un particolare tipo di macchina frigorifera è la “pompa di calore”. In essa l’evaporatore è posto in un ambiente dal quale può assorbire calore senza variare apprezzabilmente le condizioni ambientali (ad esempio un evaporatore immerso nell’acqua di mare). Tale calore può essere reso disponibile per impianti di riscaldamento elevandone la temperatura mediante la fornitura di lavoro meccanico. In questo caso la parte utile della macchina è il condensatore che nell’impianto di utilizzazione del calore diventa “caldaia”. Si chiama “coefficiente di amplificazione ρ ” il rapporto tra la portata di calore resa disponibile al condensatore e la potenza spesa. Detto coefficiente è chiamato anche C.O.P. e misura le prestazioni della macchina. Riferendosi alla macchina ideale di Carnot, l’effetto utile di una pompa di calore ρ si può definire anche come il rapporto tra la temperatura T_1 della sorgente calda e la differenza di temperatura T_1-T_2 delle due sorgenti :

$$\rho = C.O.P. = \frac{T_2}{T_1 - T_2} + 1 = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

Dalla precedente relazione si può stabilire una relazione tra il *coefficiente di effetto calorifico* π e il *coefficiente di effetto frigorifero* ε , si ha infatti che:

$$\rho = \varepsilon + 1$$

Da questa relazione si evince che il coefficiente calorifico del ciclo è tanto più elevato quanto maggiore è il coefficiente di effetto frigorifero. In pratica un COP di 5,13 equivale a 5130 Watt Termici restituiti sotto forma di calore per ogni 1000 W di corrente elettrica consumata ed un EER di 5,13 equivale a 5130 Watt termici restituiti sotto forma di calore per ogni 1000 W di corrente elettrica consumata. Dal 1° gennaio 2013 è in vigore la nuova etichetta energetica che riporta la classe di efficienza misurata in base ai nuovi indici di efficienza stagionale: SEER per il funzionamento in raffrescamento e SCOP per quello in riscaldamento calcolati nell’arco di un intero anno in tre fasce climatiche [23].

L’indice SEER viene calcolato dal rapporto tra il fabbisogno annuo di raffreddamento e il consumo annuo di energia elettrica per il raffreddamento. L’indice SCOP è il rapporto tra il fabbisogno annuo di riscaldamento e il consumo annuo elettrico per il riscaldamento. La determinazione di questi dati viene calcolata tenendo in considerazione delle condizioni stabilite in alcune tabelle, appositamente elaborate, quali:

- Le condizioni stagionali europee;
- Le condizioni di progettazione;
- Il consumo di energia riferita ai diversi modi operativi;
- Gli effetti della degradazione dell'efficienza energetica;
- Le correzioni dei coefficienti di efficienza stagionale;
- Il contributo di un sistema di back-up, se del caso.

Il nuovo sistema verrà adottato gradualmente, dal 1 gennaio 2013 al 1 gennaio 2019, con le seguenti scadenze per le diverse categorie di prodotto:

1 gennaio 2013: A+++, A++, A+, A, B, C, D, E, F e G.

1 gennaio 2015: A+++, A++, A+, A, B, C, D, E e F.

1 gennaio 2017: A+++, A++, A+, A, B, C, D e E.

1 gennaio 2019: A+++, A++, A+, A, B, C e D.

5.3 Interdipendenze funzionali fra i componenti dell'impianto di refrigerazione

L'aria è il mezzo refrigerante per il desurriscaldamento, la condensazione ed il successivo sottoreffreddamento del fluido refrigerante. Nota la quantità di calore q_c che si deve smaltire, la portata d'aria necessaria è espressa dalla relazione:

$$V_c = \frac{q_c}{\rho c_p (t_2 - t_1)} \quad [1]$$

dove:

V_c – portata d'aria (m^3/h),

q_c – calore da smaltire (kJ/s),

c_p – calore specifico dell'aria ($t_m = 30^\circ C$; $c_p = 1 \text{ kJ/kg K}$),

ρ – massa volumica ($t_m = 30^\circ C$; $\rho = 1,165 \text{ kg/m}^3$),

t_2, t_1 – temperatura a bulbo asciutto all'uscita e all'ingresso del condensatore.

Possiamo pertanto scrivere la [1] nella forma:

$$V_c = 3090 \frac{q_c}{(t_2 - t_1)} \quad [2]$$

La temperatura di riferimento dell'aria, t_1 , in ingresso al condensatore, in Italia è fissata ad un valore di $35^\circ C$ a bulbo secco, mentre la temperatura t_2 in uscita dal condensatore si fissa in un intervallo che va da $3,0$ a $5,5$ al di sotto della temperatura di condensazione t_{cond} del gas refrigerante. Considerando che per 1 kW di refrigerazione si devono dissipare $1,25 \text{ kW}$ al condensatore, la [2] può essere scritta nella forma:

$$V_c = \frac{3862}{(t_2 - t_1)} \quad [3]$$

In virtù dell'intervallo di temperatura che caratterizza la t_2 , la portata d'aria può variare tra 320 a $400 \text{ m}^3/h$ per kW di refrigerazione prodotta ad una temperatura di aria entrante t_1 pari a $35^\circ C$. Nei condensatori ad aria, la temperatura di condensazione t_{cond} viene normalmente fissata dai 10 ai $15^\circ C$ al di sopra della temperatura t_1 a bulbo asciutto dell'aria entrante e dunque, tanto più bassa è la temperatura di condensazione t_{cond} , tanto maggiore è la resa frigorifera, a parità di potenza assorbita [24]. . Nella figura sottostante viene riportato l'andamento della resa frigorifera del condensatore in funzione della temperatura di condensazione e della temperatura a bulbo asciutto dell'aria entrante (Figura 12).

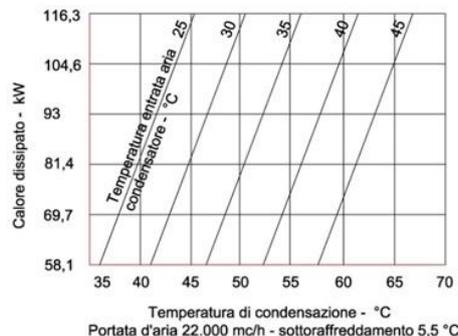


Figura 12. Resa frigorifera del condensatore in funzione della temperatura di condensazione e della temperatura a bulbo asciutto dell'aria entrante

La figura 12, sopra riportata, mostra chiaramente che un aumento della temperatura di condensazione determina una resa minore del condensatore, e dunque un maggiore assorbimento di potenza elettrica. Poiché la temperatura di condensazione è strettamente legata alla temperatura dell'aria esterna, ne consegue che ad una diminuzione di quest'ultima, corrisponde una maggiore efficienza energetica della macchina dovuta in particolare a :

- una minor temperatura del fluido di raffreddamento;
- una minore temperatura di condensazione;
- una minore pressione di condensazione in quanto la temperatura di condensazione è direttamente legata alla pressione di condensazione;
- un minore rapporto di compressione.

In ultima analisi, si può affermare che l'integrazione dell'elemento verde, costituito da sistemi vegetali applicati in forma di tetto verde, facciata verde oppure come sistema vegetale nella tipologia sia di orto pensile che di orto realizzato sulle superfici orizzontali esterne degli edifici, è in grado di diminuire la temperatura del volume d'aria che circonda il gruppo esterno del sistema di condizionamento, con il fenomeno della evapotraspirazione. In questo modo, pertanto, si possono ottenere benefici sia in termini di minore consumo di energia elettrica e sia in termini di una minore usura degli elementi in movimento del sistema di condizionamento (compressore e ventilatori). Tenuto conto che nei condensatori ad aria per il condizionamento, la temperatura di condensazione, (t_{cond}), è strettamente legata alla temperatura dell'aria esterna (t_1) che li attraversa, come sopra riportato, un aumento della temperatura dell'aria esterna (t_1), determina un aumento della temperatura e della pressione di condensazione del gas. Infatti un aumento della pressione di condensazione del gas (p_{cond}) determina, a parità delle altre condizioni, un aumento del rapporto di compressione (pressione di mandata gas refrigerante/pressione di aspirazione gas refrigerante), secondo le caratteristiche tecniche del compressore. Pertanto, in ultima analisi, un aumento della temperatura dell'aria esterna (t_1), favorisce un maggior assorbimento di potenza elettrica (W) con conseguente diminuzione della resa frigorifera, e quindi un maggior consumo di elettricità (Figura 13) [25].

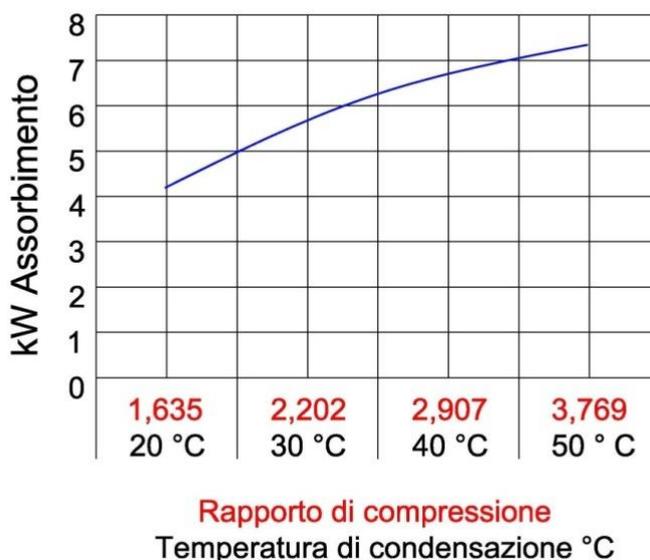


Figura 13. Curva di assorbimento elettrico in relazione alla temperatura dell'aria esterna

6 Caratteristiche strutturali del prototipo di parete verde

La presente ha per oggetto il calcolo strutturale di una costruzione sperimentale e temporanea da realizzare nell'ambito del progetto RDS. La struttura portante composta interamente in acciaio tipo S235JRH UNI EN 10219-1 zincato a caldo e verniciato a fuoco con vernici epossidiche colore RAL 1004 giallo opaco, è realizzata in 10 profili scatolari S 235JRH UNI EN 10219-1 con sezione 60x120x3 completi di piastra di appoggio e ancoraggio piatto da 200x200x10 con fori di fissaggio diametro 12mm per alloggiamento di tasselli BERNER Simplex anchor BA ETA-10/0456. I montanti sono composti da 2 elementi, uniti tra loro da sotto giunto per consentire eventuali dilatazioni.

Ai montanti verticali sono collegate delle staffe di sostegno composte da 2 angolari 40x40x4 uniti tra loro da un profilo IPE 40x50x6 ancorato ai montanti mediante viti MA10x100 e dadi antisvito. Sono presenti n.30 staffe di ancoraggio telescopiche realizzate con scatolare in acciaio tipo S235JRH UNI EN 10219-1 60x60x3 larghezza 600mm saldate all'interno del montante mentre all'altra parte mobile di compensazione, è saldata ad un piatto 70x120x10 completo di fori di fissaggio diametro 12mm per alloggiamento di tasselli BERNER Simplex anchor BA,ETA-10/0456. Il calcolo della staticità della struttura è stato condotto considerando l'ipotesi, cautelativa, che questa venga completamente rivestita con piante e vasi con il massimo peso (terra e acqua). Pertanto si è tenuto conto della spinta del vento agente su tutta la superficie esterna. La struttura è controventata orizzontalmente oltre che dalle staffe porta vaso anche mediante rete metallica realizzata con tondino diametro 6mm maglia 100x100 fissata alla struttura mediante tondino da 6mm sagomato ad "U" filettato alla due estremità inserito in un piatto da 30x100x4 e bloccato mediante dadi. La struttura è vincolata al fabbricato realizzato in calcestruzzo armato, mediante delle piastre tassellate sul cordolo esistente e sulle quali sono collegate staffe telescopiche S235JRH UNI EN 10219-1 60x60x3 larghezza 600mm alla quota dei solai dei piani (terra, 1° e 2°). I pianerottoli sono realizzati mediante un grigliato metallico (rete keller) con maglia 15x75 mm e piastra portante 25x3 mm. Ogni piano della struttura è delimitato sui finali con sbarramenti realizzati con scatorali commerciali e specchiatura chiusa con rete maglia 100x100 e tondino di ferro diametro 6mm. Nel calcolo sono stati inseriti i montanti verticali le staffe di fissaggio al muro con relative piastre di ancoraggio e stop d'acciaio e le staffe portavaso, trascurando il contributo alla stabilità del portavaso in lamiera 15/10.

6.1 Disegni tecnici

PESI PROPRI DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI

I valori relativi ai pesi propri degli elementi strutturali:

- Profilo scatolare acciaio S235JRH EN 10219-1 ; 120x60x3 : 8,19 kg/ml
- Profilo scatolare S235JRH EN 10219-1 60x60x3 : 3,64 kg/ml
- Profilo angolare; 40x40x4; 2,4 kg/ml
- Profilo IPE a "C" ; 40x50x40x6 :
-

CARICHI su struttura

Peso proprio grigliato : 28 kg/mq

Carico vasi in configurazione di utilizzo: 48 kg vaso

Sovraccarico Carico max in condizioni accidentali= 120 kg

AZIONE DEL VENTO

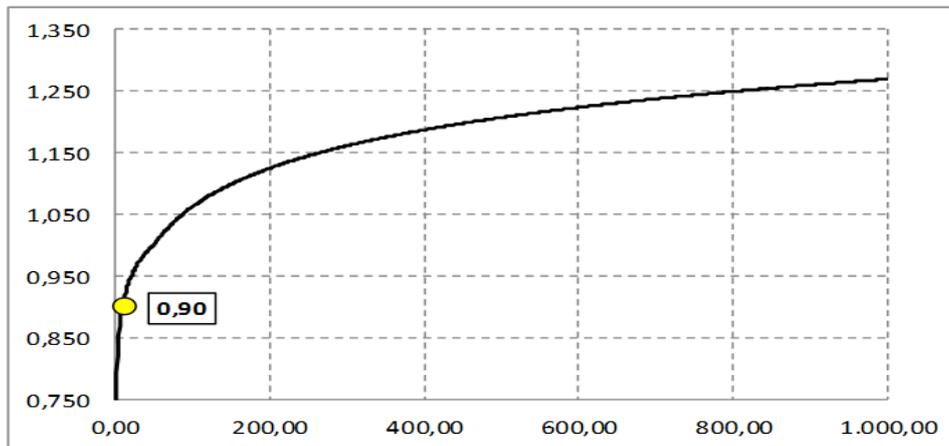
La azione del vento, la cui direzione si considera orizzontale, si traduce in pressioni e depressioni agenti normalmente alle superfici, sia esterne che interne, degli elementi che compongono la struttura:

Velocità di base di riferimento

Zona ove è ubicata la costruzione	Zona	=	3	-
Altitudine sul livello del mare del sito ove sorge l'edificio	a_s	=	150	m
Velocità di base sul livello del mare	$v_{b,0}$	=	27	m/s
Parametri relativi alla Tabella 3.I	a_0	=	500	m
	k_a	=	0,37	-
Coefficiente di altitudine	c_a	=	1,00	-
Velocità di base di riferimento	v_b	=	27,00	m/s

Periodo di ritorno e velocità di riferimento di progetto

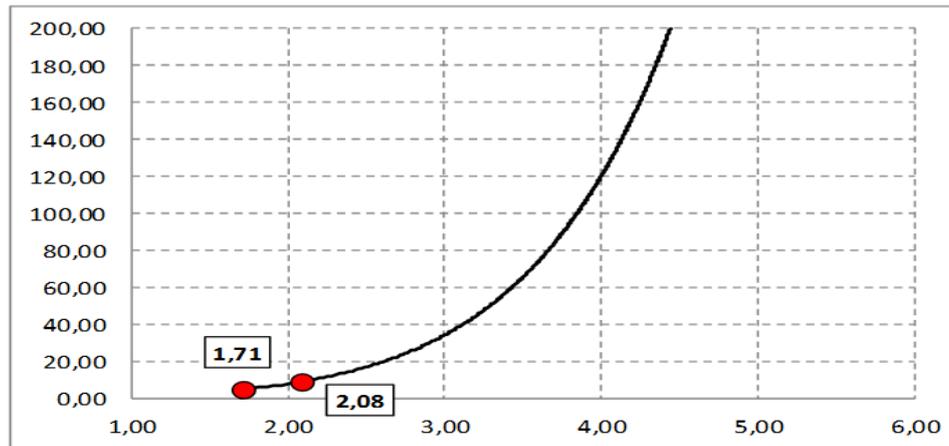
Periodo di ritorno espresso in anni	T_R	=	10	anni
Coefficiente di ritorno	c_r	=	0,90	-
Velocità di riferimento di progetto	v_R	=	24,38	m/s



Categoria di esposizione

Categoria di esposizione del sito (in numero romano)	Cat.	=	III	-
Altezza massima dell'edificio	z_{max}	=	9,18	m
Generica quota z	z	=	5,00	m
Coefficiente topografico	c_t	=	1,00	-
Parametri relativi alla Tabella 3.II	k_r	=	0,20	-
	z_0	=	0,10	m
	z_{min}	=	5,00	m

Coefficiente di esposizione alla quota z_{max}	$c_e(z_{max})$	=	2,08	-
Coefficiente di esposizione alla generica quota z	$c_e(z)$	=	1,71	-



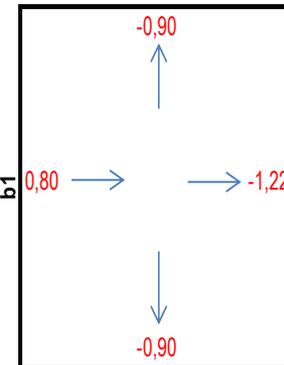
Coefficienti aerodinamici globali - Pareti laterali

Configurazione rettangolare 1

Vento in direzione x

Dimensione della faccia perpendicolare al vento	b_1	=	8,00	m
Dimensione della faccia parallela al vento	d_1	=	0,60	m
Altezza del volume 1	h_1	=	9,18	m
Rapporto h_1/d_1	h_1/d_1	=	15,30	-

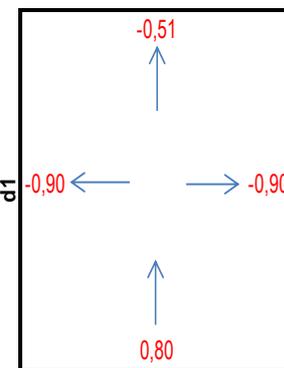
Coefficiente di pressione per la faccia sopravvento	$C_{pe,x,1}$	=	0,80	-
Coefficiente di pressione per le facce laterali	$C_{pe,y,1}$	=	-0,90	-
Coefficiente di pressione per la faccia sottovento	$C'_{pe,x,1}$	=	-1,22	-



Vento in direzione y

Dimensione della faccia perpendicolare al vento	b_1	=	0,60	m
Dimensione della faccia parallela al vento	d_1	=	8,00	m
Altezza del volume 1	h_1	=	9,18	m
Rapporto h_1/d_1	h_1/d_1	=	1,15	-

Coefficiente di pressione per la faccia sopravvento	$C_{pe,y,1}$	=	0,80	-
Coefficiente di pressione per le facce laterali	$C_{pe,x,1}$	=	-0,90	-
Coefficiente di pressione per la faccia sottovento	$C'_{pe,y,1}$	=	-0,51	-



$$p = q_{ref} * C_e * C_d$$

Figura 19. Calcoli sulla resistenza della struttura all'azione del vento

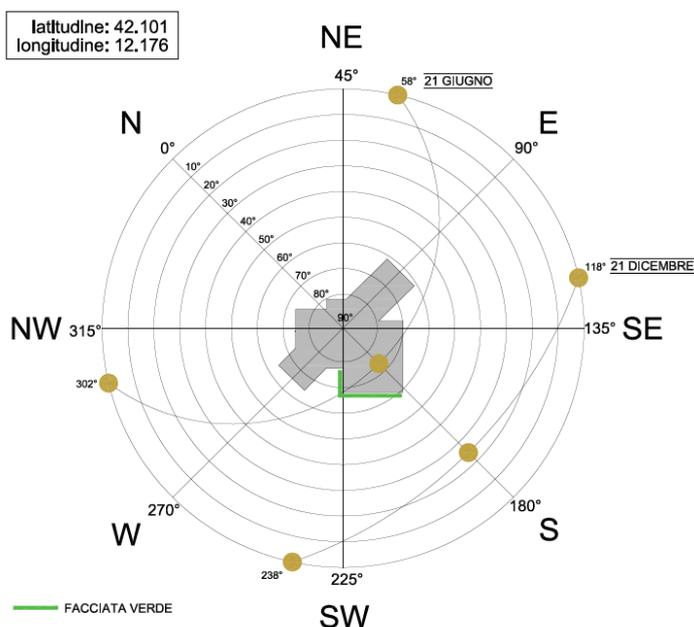


Figura 20. Coordinate geografiche del sito di installazione della parete verde



Figura 21. Edificio privo di inverdimento (a sinistra) e simulazione dell'edificio con inverdimento

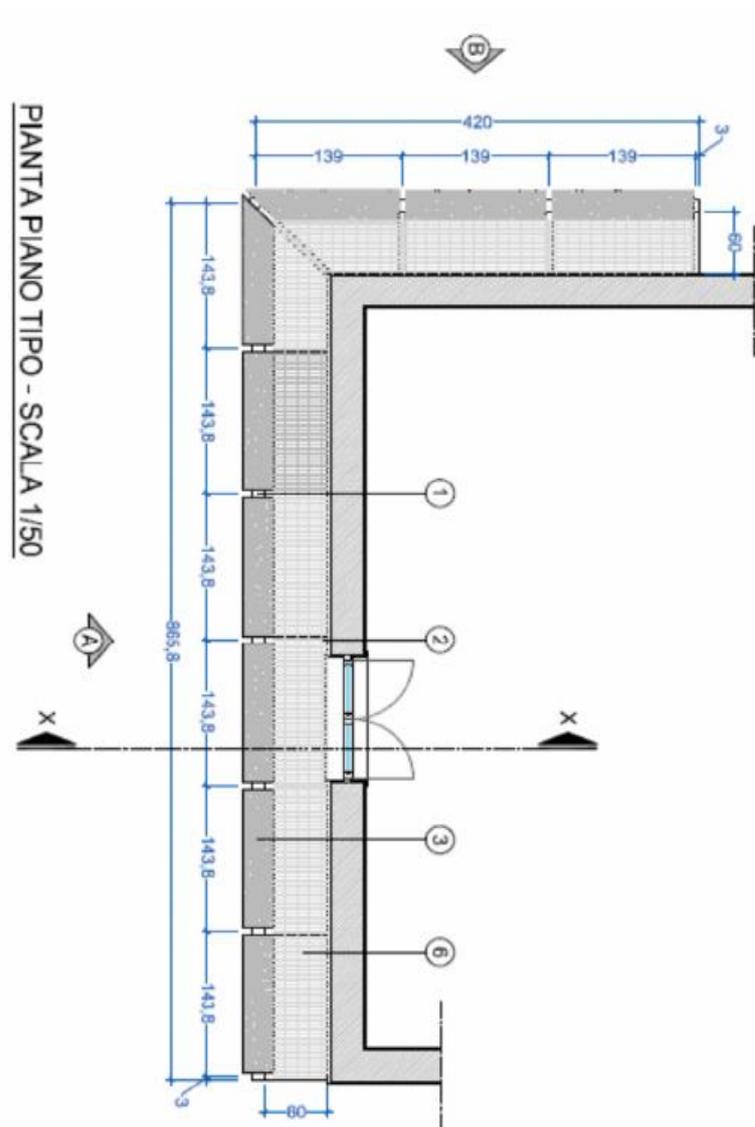


Figura 22. Dettagli tecnici

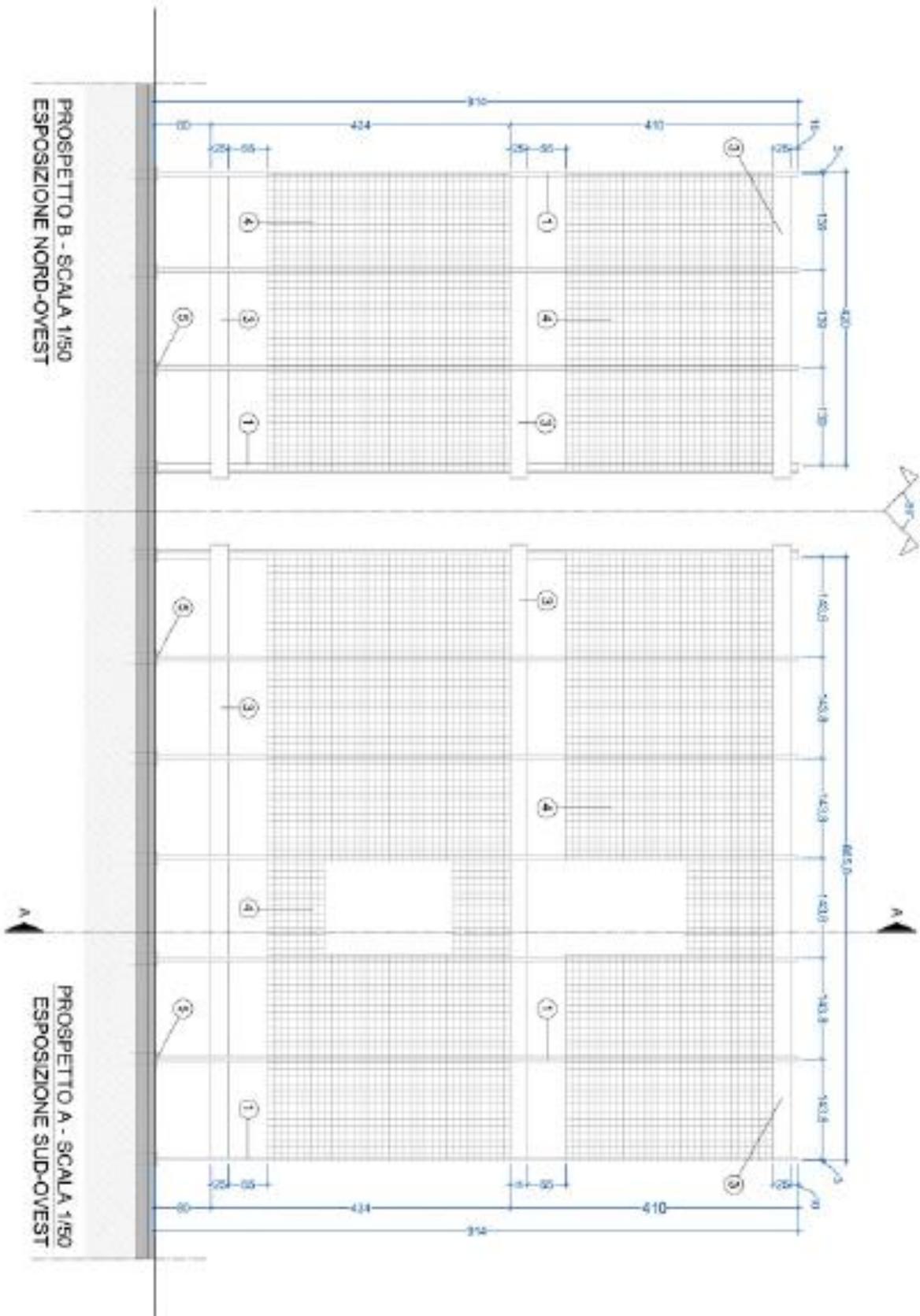


Figura 23. Lay-out della parete verde

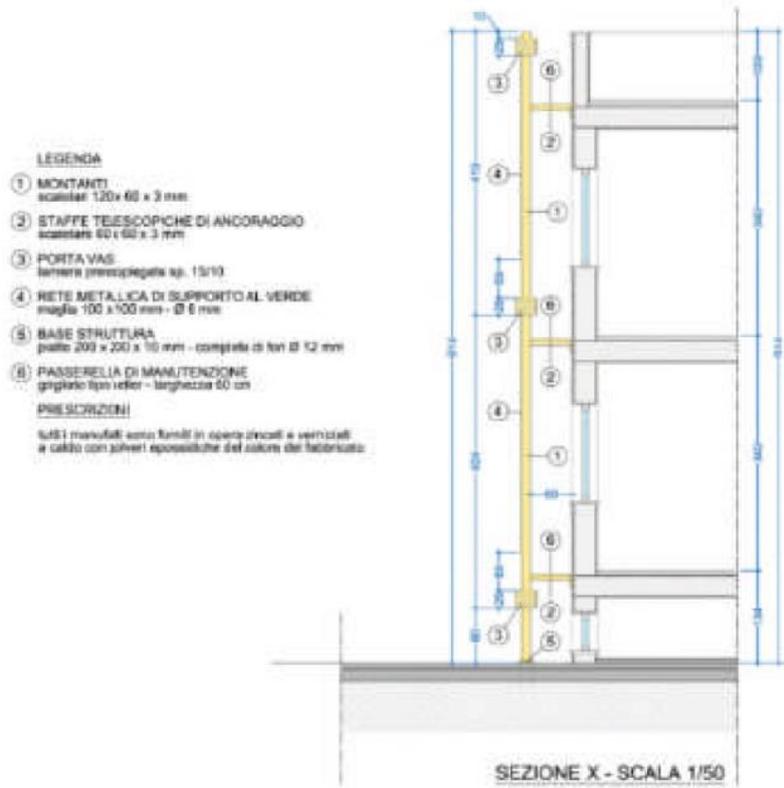


Figura 24. Dettagli tecnici

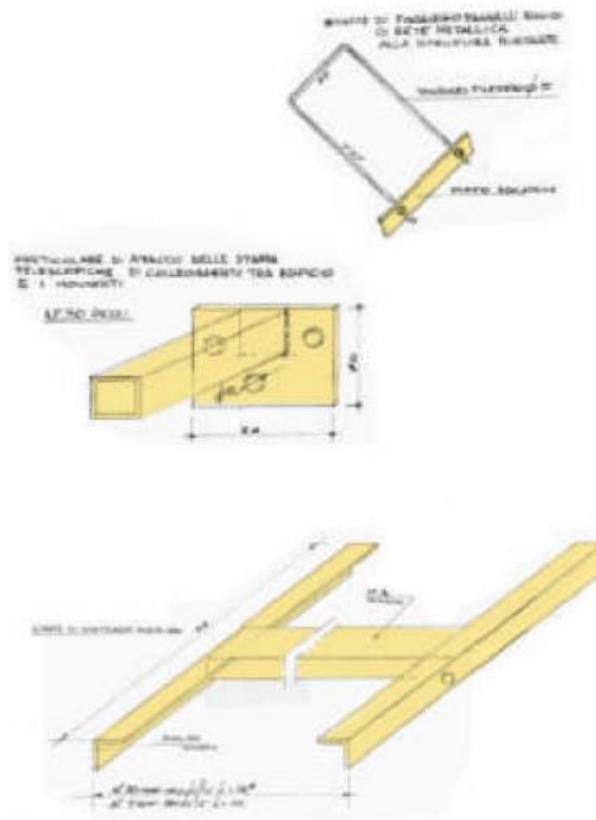
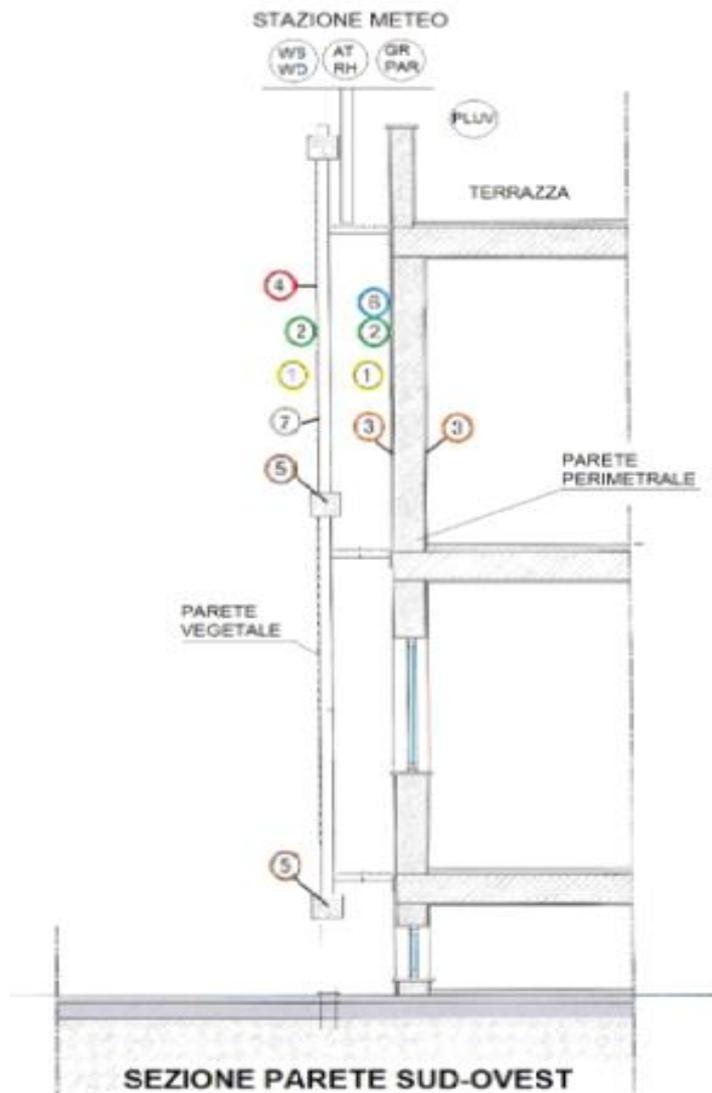


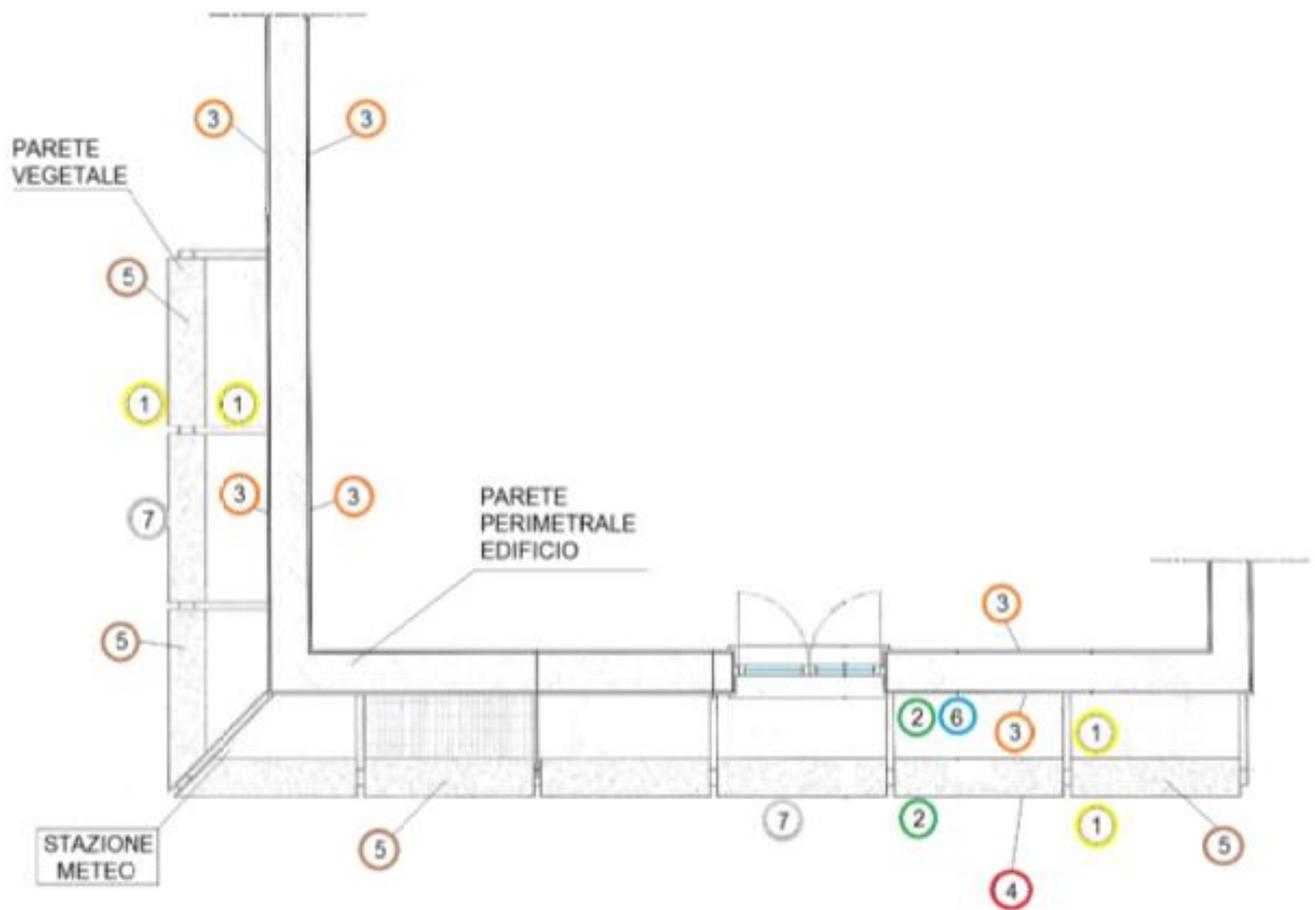
Figura 25. Dettagli tecnici



LEGENDA

- ① TERMOIGROMETRO IN SCHERMO
- ② RADIAZIONE SOLARE PAR
- ③ TEMPERATURA SUPERFICIALE
- ④ PIROMETRO TEMPERATURA FOGLIARE
- ⑤ TEMPERATURA E UMIDITA' TERRA
- ⑥ RADIAZIONE SOLARE GLOBALE
- ⑦ CO2 E OSSIGENO
- WS
WD ANEMOMETRO
- AT
RH TERMOIGROMETRO IN SCHERMO
- GR
PAR RADIAZIONE SOLARE E PAR PIANO CRIZZONTALE
- PLUV PIOGGIA

Figura 26. Design del sistema di monitoraggio climatico



LEGENDA

- ① TERMOIGROMETRO IN SCHERMO
- ② RADIAZIONE SOLARE PAR
- ③ TEMPERATURA SUPERFICIALE
- ④ PIROMETRO TEMPERATURA FOGLIARE
- ⑤ TEMPERATURA E UMDITA' TERRA
- ⑥ RADIAZIONE SOLARE GLOBALE
- ⑦ CO2 E OSSIGENO

Figura 27. Design del sistema di monitoraggio climatico

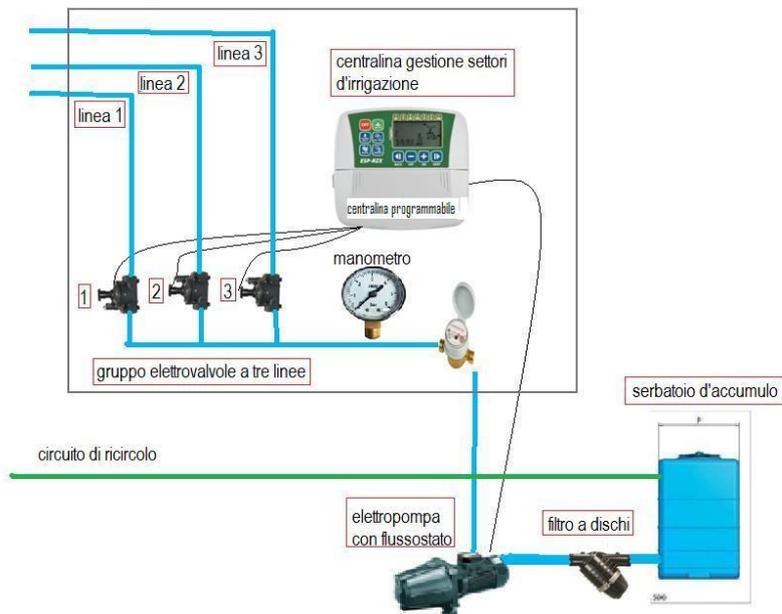


Figura 28. Sistema di fertirrigazione

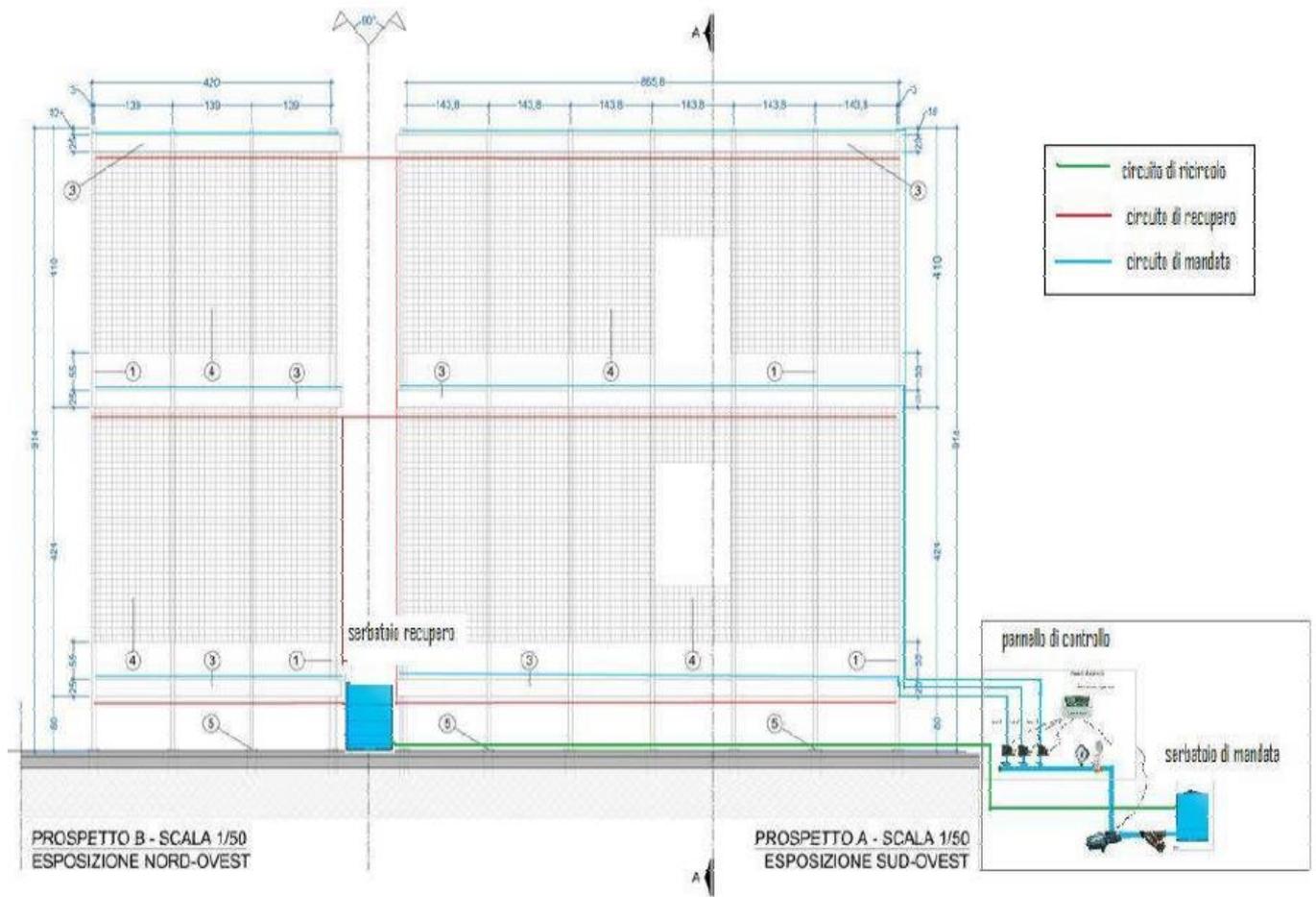


Figura 29. Lay-out del sistema di fertirrigazione installato alla parete verde



Figura 32. Progetto di parete verde

7 Climatizzazione con sistemi innovativi a fonte rinnovabile per sistemi serra.

L'attività proposta ha lo scopo di valutare i benefici indotti da una climatizzazione alimentata da fonte rinnovabile per i sistemi serra basata sulla tecnologia del solar cooling rispetto ai sistemi adiabatici di condizionamento comunemente usati (macchine a compressione di vapore, fanpad, etc.). La scelta del solar cooling è dettata dall'esigenza di considerare soluzioni impiantistiche innovative ma già disponibili sul mercato che garantiscano alto potenziale di replicabilità e di diffusione nell'agricoltura protetta.

In particolare l'attività sull'impianto avrà l'obiettivo di ottimizzarne la gestione sviluppando logiche di controllo che consentano di massimizzare il risparmio di energia elettrica, fonte quasi esclusivamente utilizzata per la climatizzazione delle serre.

Il caso studio è stato scelto con il criterio prevalente della elevata replicabilità, sia come caratteristiche del sistema serra sia come tipologia di impianto di solar cooling. Entrambi, infatti, sono stati costruiti con componentistica reperibile nel mercato e sono dotati di sistemi di monitoraggio che consentiranno al termine delle campagne sperimentali e delle conseguenti analisi dei dati prestazionali di generalizzare i risultati che saranno ottenuti.

L'impianto è localizzato a Valenzano (Ba) presso il Centro Sperimentale Martucci dell'Università degli Studi di Bari "Aldo Moro", con la collaborazione della quale è stata svolta tutta l'attività. L'impianto è stato realizzato da ENEA nell'ambito del programma europeo Adriacold (*Diffusion of cooling and refreshing technologies using the solar energy resource in the Adriatic region*) ed è entrato in funzione nella primavera del 2015.

In particolare, l'impianto alla sua nascita è stato dotato di un sistema di gestione minimale che ha palesato nelle prime prove effettuate diversi problemi, di fatto inficiando la potenzialità dell'impianto stesso: tale sistema, infatti, consente un numero limitato di regolazioni secondo le logiche classiche per tali tipologie di impianti e non particolarmente adatte all'utenza serra. Inoltre il sistema attuale non consente la gestione dell'impianto da remoto ed effettua il monitoraggio solo di alcuni parametri, rendolo non idoneo allo scopo prefissato per l'attività proposta. Si è pertanto resa necessaria la riprogettazione di un sistema di controllo in grado di ottimizzare la producibilità dell'impianto, favorendo

In questa prima annualità, quindi, è stata effettuata una valutazione comparativa sulla potenzialità degli impianti di solar cooling applicati ai sistemi serra, considerando i regimi incentivanti attualmente vigenti; inoltre è stato progettato e realizzato un nuovo sistema di gestione e controllo dell'impianto, totalmente gestibile da remoto, che permetterà di effettuare la prima campagna sperimentale durante la prossima stagione estiva. Tale attività è stata svolta realizzando, a valle dei necessari studi propedeutici, i diagrammi di flusso che sono serviti alla ditta scelta per implementare le logiche di gestione nel controllore a bordo del sistema.

Poiché l'intera attività è svolta in collaborazione con l'Università di Bari, Dipartimento di Scienze Agro-Ambientali e del Territorio (DISAAT), che ha competenze in campo agricolo, ENEA si occuperà di tutti gli aspetti legati alla gestione e ottimizzazione delle prestazioni dell'impianto, mentre le attività dell'Università saranno centrate sulla messa a punto del sistema ottimale di emissione in serra.

7.1 Breve descrizione impianto Solar Cooling

Di seguito sono descritte brevemente le caratteristiche dell'impianto di *solar cooling*, il cui schema è riportato in Figura 33.

CAMPO SOLARE (C SOL): è composto da collettori solari sottovuoto in vetro borosilicato a doppia intercapedine, saldati all'estremità, al cui interno è provocato il vuoto, con intercapedine interna resa selettiva per mezzo di verniciatura metallica speciale multistrato tipo "CERMET" e dotati delle seguenti caratteristiche tecniche :

- Superficie di apertura singolo modulo: 3.81 m² netta e 4.28 m² lorda;
- Superficie di apertura totale campo solare: 57 m²;
- Angolo di inclinazione sull'orizzontale: 30°
- Rendimento (η_0) > 70,00%;
- Coefficiente di perdita termica (a_1) \leq 1,052 W/m²K;
- Coefficiente di perdita termica (a_2) \leq 0,004 W/m²K;
- Pressione massima d'esercizio: 6,0 bar;
- Portata ottimale: 1 l/min m².

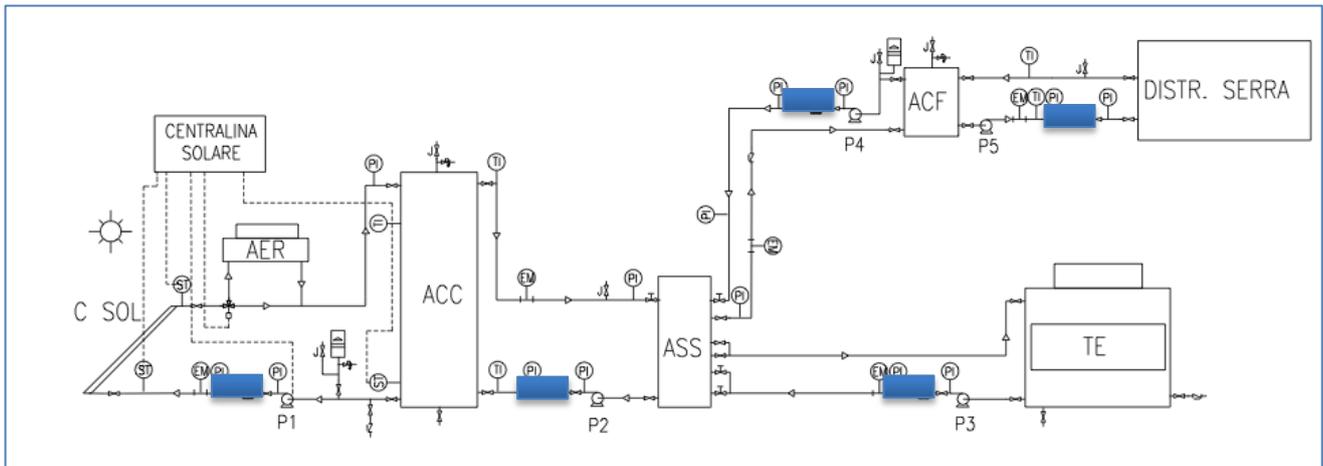


Figura 33 - Schema impianto solar cooling Bari

MACCHINA FRIGORIFERA: macchina monostadio ad assorbimento ad acqua calda di potenza frigorifera pari a circa 23 kW con acqua di alimentazione a 80-90 °C, controllo refrigerazione modulante tramite Inverter, fluido refrigerante/assorbente ad acqua e bromuro di litio.

SISTEMI DI ACCUMULO TERMICO:

- accumulatori di acqua calda (ACC) con volume pari a 2000 litri;
- accumulatore di acqua refrigerata (ACF) con volume pari a 500 litri.

SISTEMI MONITORAGGIO: contabilizzatori di energia (portata, temperatura, potenza, energia), evidenziati con un rettangolo pieno (di colore blu) in Figura 33 e localizzati su:

- circuito produzione energia solare a valle dei collettori solari all'ingresso dell'accumulo "caldo";
- all'uscita dell'accumulo "caldo" all'ingresso dell'assorbitore;
- sul circuito produzione energia frigorifera all'ingresso dell'accumulo "freddo";
- all'uscita dell'accumulo "freddo" verso l'utenza;
- a valle dell'assorbitore verso la torre evaporativa;
- sul circuito di integrazione in ingresso all'accumulo freddo.
- Inoltre l'impianto è dotato di sistema di misurazione del consumo elettrico complessivo del sistema, di sensori di temperatura collocati su:
 - accumulo caldo, n°4 unità;
 - accumulo freddo, n°2 unità;
 - interno serra, n°6 unità.

L'impianto non è dotato di un sistema di integrazione termica, ma è predisposto per essere collegato ad una pompa di calore geotermica, già allocata presso la serra, di cui si valuterà l'integrazione alla fine della messa a punto del funzionamento dell'intero sistema per la climatizzazione estiva.

7.2 SISTEMA DI REGOLAZIONE E CONTROLLO

Nei paragrafi che seguono sono riportati i risultati delle valutazioni che hanno portato a sviluppare i diagrammi di flusso, da cui sono state tratte le logiche implementate nel sistema di gestione e controllo.

7.2.1 Requisiti sistema di regolazione e controllo

Il sistema di regolazione e controllo dell'impianto ha lo scopo di gestire e memorizzare gli input provenienti dalle sonde di lettura, gestire gli organi di attuazione e i circolatori nelle varie configurazioni d'impianto.

Per poter meglio valutare la configurazione ottimale del sistema di gestione e delle logiche di regolazione, è conveniente suddividere l'impianto in tre circuiti differenti (indipendenti tra loro in fatto di logiche di regolazione), come rappresentato in Figura 34 :

- Circuito A: circuito solare e accumulo caldo
- Circuito B: circuito assorbitore e ausiliari
- Circuito C: circuito di distribuzione all'utenza

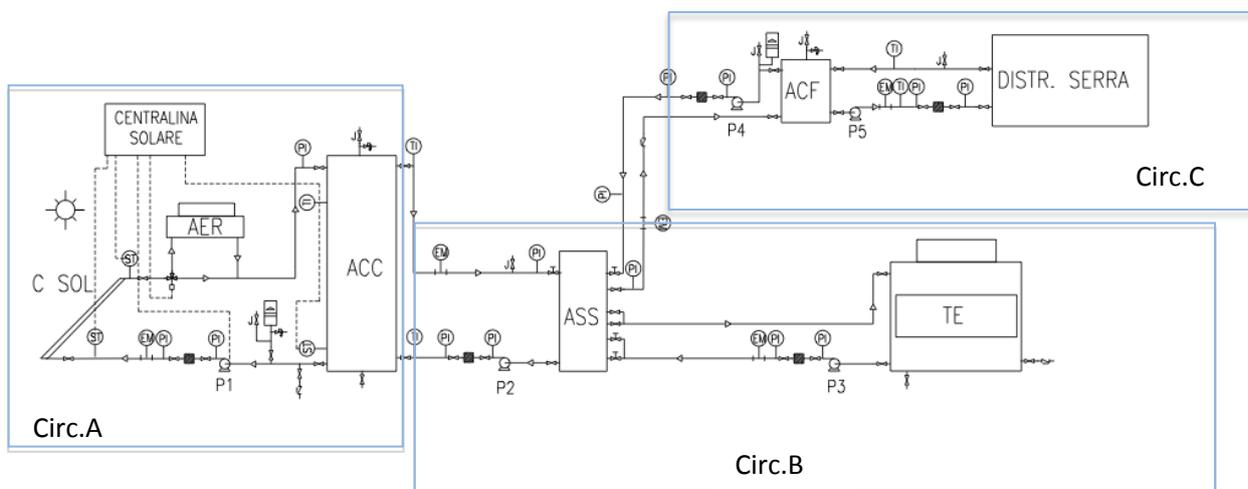


Figura 34 - Divisione dei loop di regolazione per l'impianto in oggetto

La progettazione del sistema è iniziata dall'individuazione dei punti di misura e dei relativi input/output di controllo, di riassunti nella Tabella 7.

Tabella 7 - punti di misura e relativi input/output di controllo

Temperature misurate	Sigla	Output del sistema	Sigla	Input del sistema	Sigla
Temperatura di uscita da batteria collettori solari	T_coll	Start/stop pompa solare o modulazione	P1	Stato/allarme pompa solare	sP1
Temperatura accumulo caldo (parte alta)	T_tank_hot	Start/stop dissipatore	AER	Stato/allarme dissipatore	sAER
Temperatura accumulo	T_tank_c	Contatto pulito per	V1	Stato/allarme valvola	sV1

freddo (parte bassa)	old	valvola tra dissipatore			
Temperatura in serra	T_room	Start/Stop assorbitore	ASS	Stato/allarme assorbitore	sASS
		Start/stop pompa tra accumulo caldo e assorbitore	P2	Stato/allarme pompa P2	sP2
		Start/stop pompa tra assorbitore e torre evaporativa	P3	Stato/allarme pompa P3	sP3
		Start/stop pompa tra accumulo freddo e assorbitore	P4	Stato/allarme pompa P4	sP4
		Start/Stop torre evaporativa	TE	Stato/allarme torre evaporativa	sTE
		Start/Stop pompa utenza	P5	Stato/allarme pompa utenza	sP5

Tutte le impostazioni dei parametri, le letture delle sonde, gli stati e gli eventuali allarmi dovranno essere monitorati da un'interfaccia utente presente in locale sul sistema e duplicata su web in modo da poter gestire l'impianto da remoto.

Di seguito sono descritte le regolazioni di ciascun circuito.

7.2.2 Regolazione circuito A

Il circuito solare è senza dubbio il circuito più importante in quanto da esso dipende la capacità dell'impianto di approvvigionarsi di energia solare per il proprio funzionamento. Dall'ottimizzazione di tale circuito può derivare una maggior quota di energia solare catturata e quindi l'incremento della producibilità di tutto l'impianto.

Il circuito solare in oggetto non presenta uno scambiatore intermedio tra collettori solari ed accumulo ma il collegamento tra i due elementi è diretto e viene effettuato dal circolatore P1.

La regolazione che classicamente si attua in questo caso [31, 32] è una regolazione differenziale, basata sulla differenza di temperatura tra collettore solare (T_{coll}) e accumulo caldo (T_{tank_hot}). Se, tra i pannelli e il serbatoio, la differenza di temperatura è maggiore della soglia programmata la pompa del circuito solare viene attivata, in caso contrario resta disattivata. È possibile fissare anche una soglia differente (generalmente minore) per lo spegnimento della pompa solare.

La soglia di avvio è compresa tra i 5 e gli 8 °C, simili intervalli sono necessari per tener conto di:

- perdite di calore che si verificano lungo le tubazioni di collegamento (maggiore è la lunghezza delle tubazioni di collegamento, maggiore sarà la soglia);
- differenziale di temperatura adeguato per avere uno scambio termico significativo;
- quantitativo di energia utile superiore a quella consumata dalla pompa di circolazione durante il suo funzionamento.

La soglia di stop è fissata a 3°C.

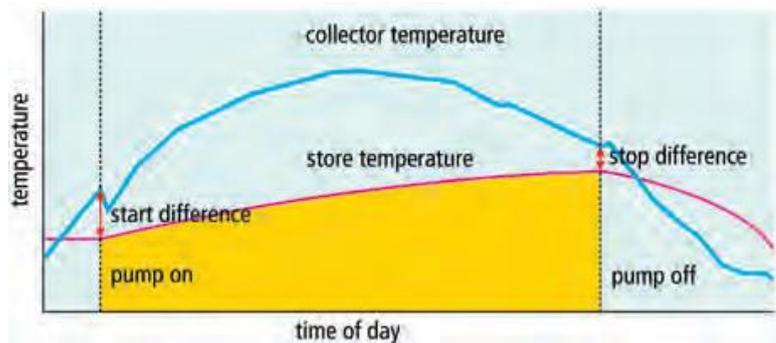


Figura 35 - Dinamica giornaliera del controllo differenziale

La logica di regolazione tramite differenziale di temperatura è espressa dal diagramma di flusso riportato in Figura 36.

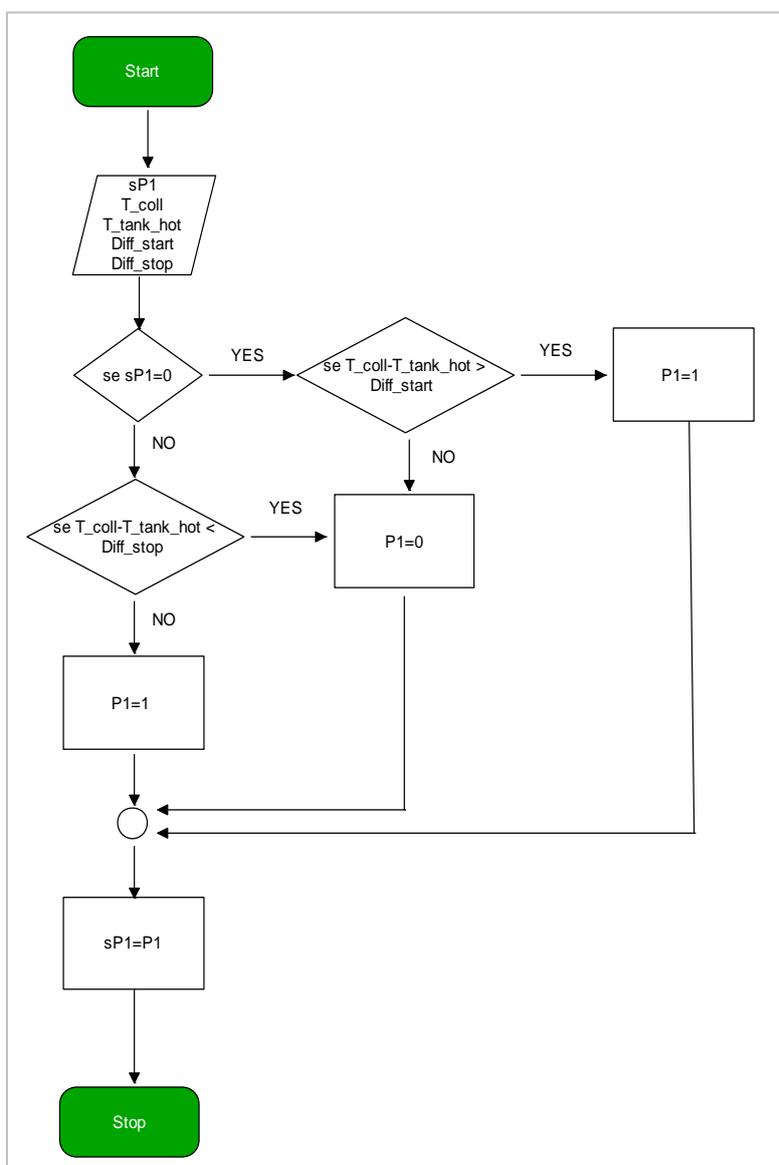
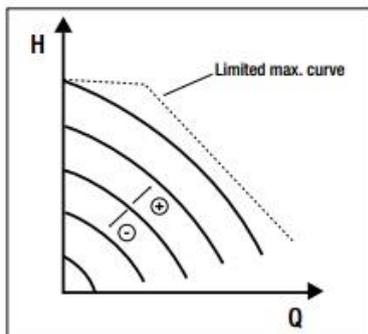


Figura 36 -Diagramma di flusso della logica di regolazione circuito A con differenziale di temperatura

Accanto alla regolazione sopra descritta vengono proposte altre due tipologie di regolazioni utilizzabili con circolatori dotati di inverter con possibilità di controllo di velocità (in 0-10 V o PWM). Come già ampiamente

descritto in lavori precedenti [33] queste tipologie di controllo possono ottimizzare la captazione dell'energia solare diminuendo i consumi elettrici utilizzando i circolatori a velocità massime solo nei momenti di effettiva necessità. Ovviamente sarà da valutare attentamente la minima velocità impostabile derivante dalla minima portata circolante nei collettori solari (informazione presente nelle schede tecniche dei collettori solari). Si riporta di seguito estratto di un catalogo tecnico di un costruttore di circolatori inerente la regolazione tramite inverter [34].

3 - Modalità di regolazione a curva costante



In questa modalità di regolazione il circolatore lavora su curve caratteristiche a velocità costante. La curva di funzionamento viene selezionata impostando la velocità di rotazione attraverso un fattore percentuale. Il valore 100% indica la curva limite massimo. La velocità di rotazione effettiva può dipendere dalle limitazioni di potenza e di pressione differenziale del proprio modello di circolatore. La velocità di rotazione può essere impostata da display o da segnale esterno 0-10V o PWM utilizzando l'apposito modulo multifunzione.

Regolazione indicata per impianti di riscaldamento e condizionamento a portata costante.

Nella prima regolazione ad inverter proposta, il circolatore solare regola la portata d'acqua in modo da ottenere un valore di temperatura fisso all'uscita dei collettori solari (T_{set}). In questo modo anche l'accumulo si attesterà su una temperatura fissa (minore di quella settata in relazione alle perdite del circuito) e tale temperatura può essere fatta coincidere con la temperatura a cui alimentare l'assorbitore per ottenere il massimo COP (si veda paragrafo 7.2.3). La regolazione ha quindi lo scopo di ottimizzare la produzione dell'assorbitore alimentandolo con la temperatura di massimo COP in relazione alle condizioni ambientali rilevate al momento. Il sistema di controllo è infine programmato per fermare il circolatore quando la temperatura di uscita dai collettori solari è minore della temperatura nell'accumulo. Tale strategia di regolazione permette di limitare le perdite di calore del circuito in quanto il serbatoio opera sempre alla minima temperatura richiesta dall'assorbitore e previene surriscaldamenti nel caso di giornate molto soleggiate o con bassi consumi. Tale regolazione è dettagliata nel diagramma di flusso riportato in Figura 37.

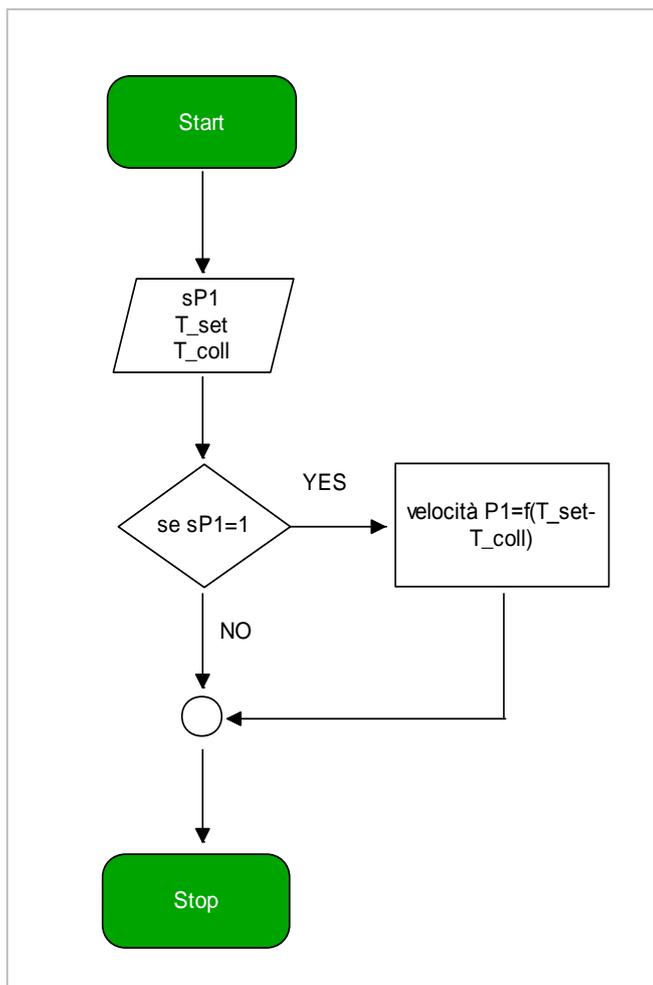


Figura 37 - Diagramma di flusso della logica di regolazione circuito A con inverter, caso 1

La seconda regolazione (Figura 38) prevede che il circolatore vari la sua velocità in funzione del differenziale di temperatura tra collettori ed accumulo. In questo caso quindi la differenza di temperatura tra collettore solare e accumulo caldo che nella regolazione classica fornisce solamente l'avvio al sistema, viene utilizzato in modo continuo anche durante il funzionamento e quanto più grande diventa, tanto maggiore sarà la portata elaborata. In questo modo si ottimizza la producibilità solare elaborando maggior portata solamente nelle condizioni ottimali (massimo irraggiamento o massimo consumo da parte dell'utenza), con conseguente risparmio di energia elettrica consumata dai circolatori.

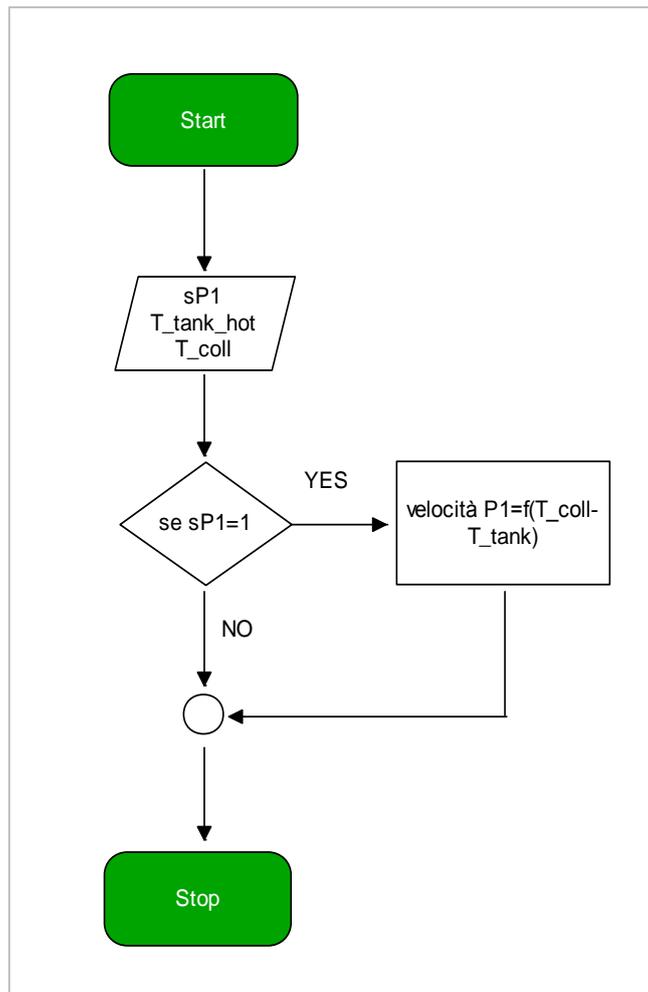


Figura 38 - Diagramma di flusso della logica di regolazione circuito A con inverter, caso 2

Nel circuito solare è presente anche un sistema di dissipazione a dry cooler di sicurezza. Tale dissipatore interviene quando la temperatura dei collettori supera la soglia di sicurezza per evitare l'apertura degli organi di sicurezza e la salvaguardia dei circuiti. Negli impianti dotati di fluido antigelo la dissipazione evita che il glicole degradi al raggiungimento di alte temperature [35], in quelli con solo acqua evita l'evaporazione dell'acqua che può indurre gli organi di attuazione a generare vibrazioni dannose.

La presenza della fase vapore è in ogni caso da evitare in quanto falsa le misure degli strumenti di monitoraggio.

Il controllo di sicurezza prevede che raggiunta la temperatura massima (T_{coll_max}) venga attivato il dry cooler (avvio ventilatori) e venga movimentata la valvola V1 (Figura 39).

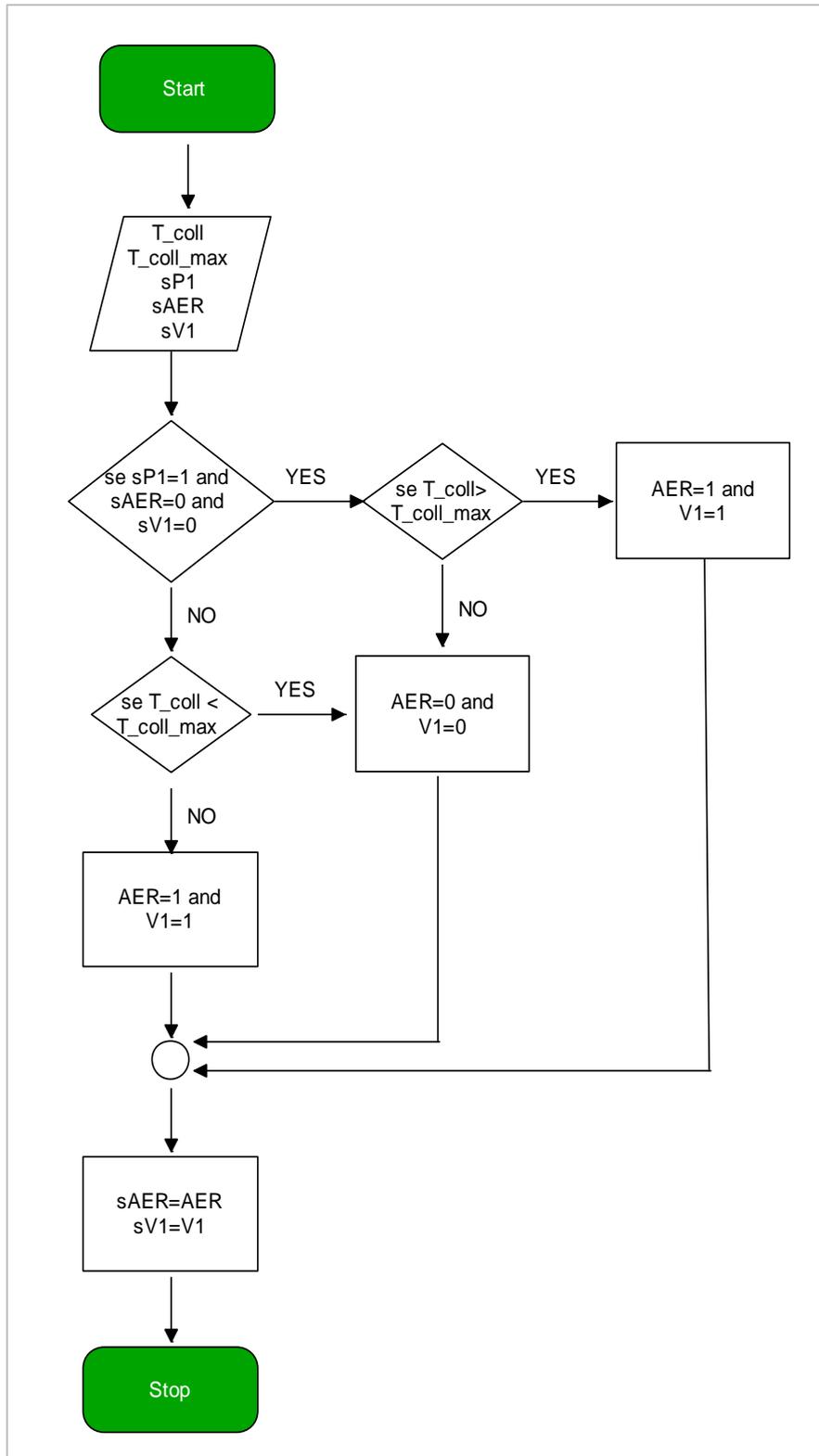


Figura 39 - Diagramma di flusso della logica di regolazione circuito A, sistema di dissipazione

7.2.3 Regolazione circuito B

Il circuito B è costituito dalla macchina frigorifera ad assorbimento con relativa torre evaporativa e organi di collegamento.

Tutti gli organi del circuito sono posti sotto il consenso dell'assorbitore in modo che esso stesso regoli, indipendentemente, gli organi collegati. L'assorbitore in oggetto lavora in ON/OFF e non è presente modulazione. L'attivazione dell'assorbitore è legata al raggiungimento dell'accumulo caldo di un livello termico pari al valore di riferimento scelto, funzione delle caratteristiche della macchina ad assorbimento; contestualmente all'avvio di questi, si attivano i circolatori P2, P3, P4, la torre evaporativa TE ed il controllo anti congelamento nell'accumulo freddo (Figura 33). Tale controllo induce lo spegnimento dell'assorbitore quando la temperatura dell'accumulo freddo scende sotto la T_{min_cold} ($4^{\circ}C$).

La temperatura minima per l'accensione dell'assorbitore (T_{min_ass}) è un parametro che dovrà essere impostabile dall'esterno e potrà essere valutato in base alle condizioni ambientali specifiche o in base a logiche che massimizzino il COP. A questo proposito si riporta, nel grafico sottostante, la variazione del COP al variare della temperatura di alimentazione per un assorbitore modello WF SC 30 nel caso di temperatura di condensazione a $24^{\circ}C$ [37].

Tali logiche non sono impostabili a priori, ma saranno valutate a valle della prima campagna di prove.

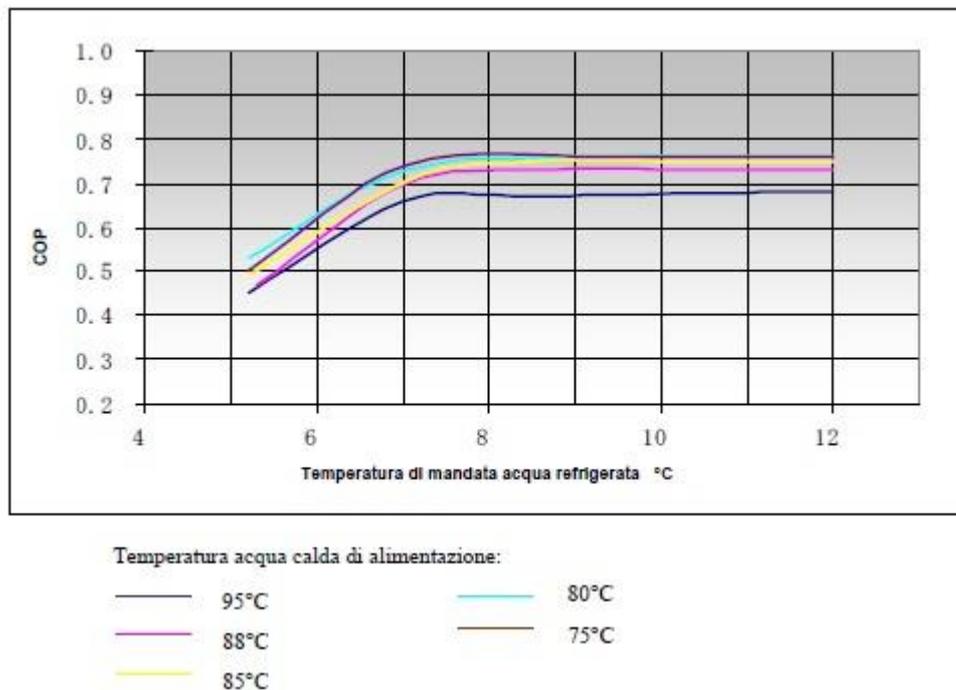


Figura 40 - Variazioni del COP al variare della temperatura dell'acqua calda di alimentazione

Un ulteriore approfondimento va fatto circa la possibilità di parzializzare il funzionamento dell'assorbitore operando sulla variazione della portata di alimentazione. Questo è utile nel caso in cui il funzionamento dell'assorbitore sia caratterizzato da innumerevoli cicli di accensione-spegnimento e di conseguenza numerosi regimi di transitorio a basso COP che penalizzano molto il funzionamento dell'unità. Le modalità per operare la variazione di portata sono due:

- variazione del numero di giri del circolatore di alimento (P2);
- miscelazione con la portata d'acqua di ritorno dall'assorbitore con valvola a tre vie modulante.

In generale le prestazioni di una macchina frigorifera ad assorbimento migliorano ai carichi parziali in quanto gli scambiatori presenti nell'unità si trovano a funzionare con una minor portata di fluido e con una conseguente efficienza di scambio più elevata. Si riporta Figura 41 la correlazione tra variazione di portata e variazione di potenza erogata per l'assorbitore presente nell'impianto.

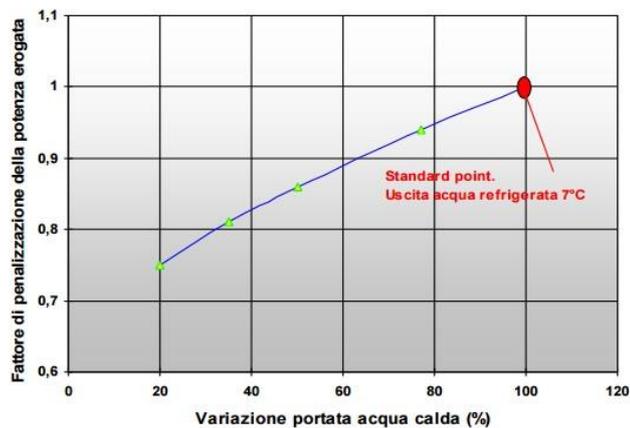


Figura 41 - Variazione della potenza erogata in funzione della variazione di portata d'acqua per l'assorbitore WFC-SC 5

Tuttavia nell'impianto in esame non si ritiene necessaria una regolazione della portata di alimentazione all'assorbitore in quanto sono presenti idonei accumuli d'acqua che hanno la funzione di limitare i cicli on/off dell'assorbitore. Inoltre, data la natura dell'utenza servita (serra per colture), il carico frigorifero sarò naturalmente in fase al carico solare e dunque ci si aspetta che l'assorbitore abbia un funzionamento giornaliero.

Il diagramma di flusso della regolazione del circuito B è riportato in Figura 42.

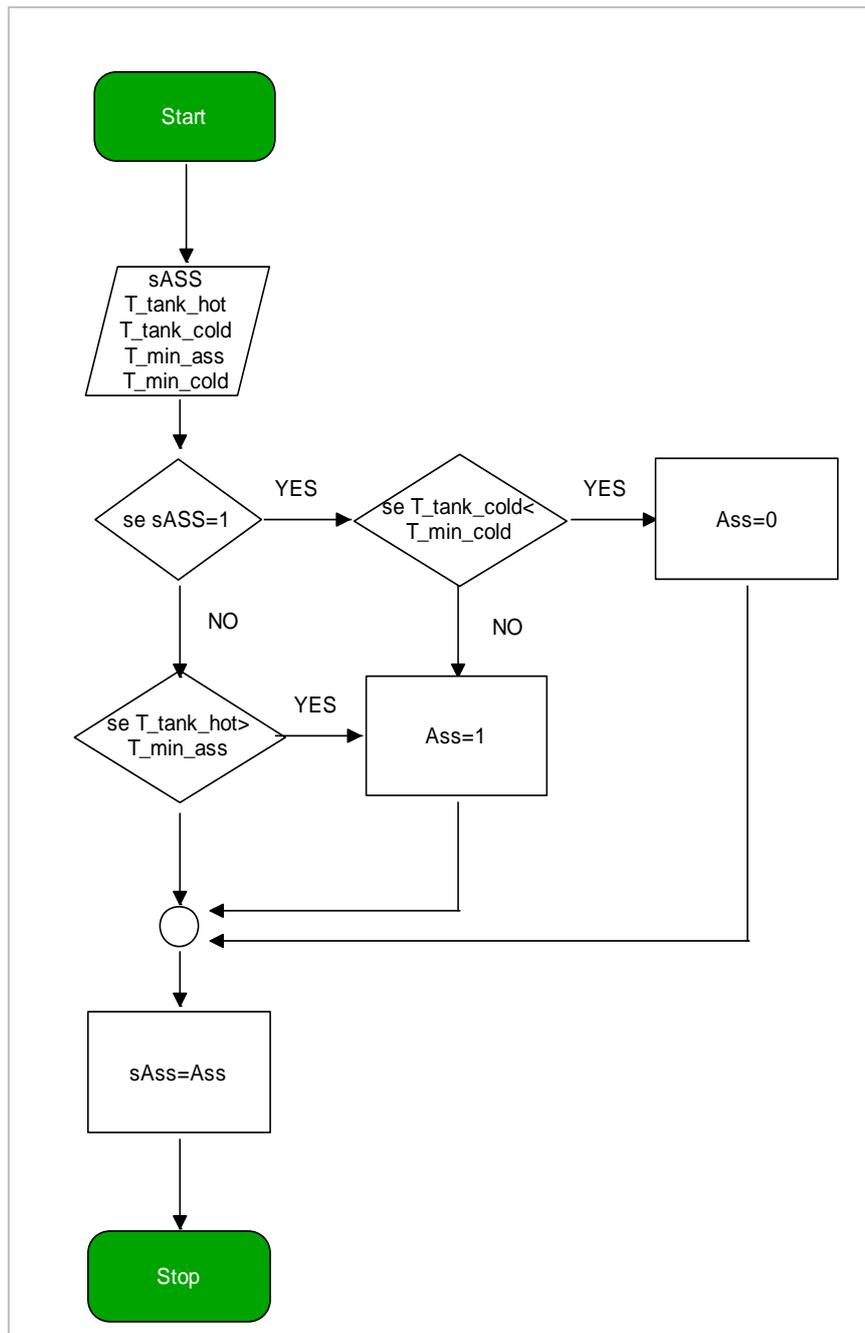


Figura 42 - Diagramma di flusso della logica di regolazione circuito B- assorbitore e funzione anti-congelamento

7.2.4 Regolazione circuito C

Il circuito C rappresenta il circuito di alimentazione verso l'utenza. La pompa P5 verrà attivata quando l'accumulo freddo raggiunge una temperatura tale da poter operare il raffrescamento all'interno della serra ($T_{\text{tank_cold}} > T_{\text{room}}$). La temperatura T_{room} deve essere modificabile e impostabile da configuratore esterno. Tale valore di temperatura sarà scelto in funzione della tipologia di coltura presente in serra [38] e del sistema di emissione in ambiente. Dato che all'interno della serra saranno presenti sensori di temperatura ambiente posti in vari punti è possibile correlare la media delle misurazioni con la definizione della T_{room} per azionare l'alimentazione all'utenza, come rappresentato nel grafico di Figura 43. In Figura 44 è riportato il diagramma di flusso della regolazione del circuito utenza.

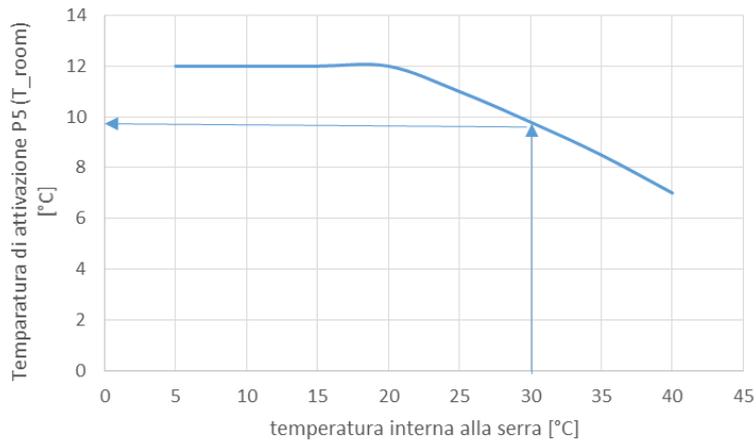


Figura 43 - Grafico di correlazione tra la temperatura misurata all'interno della serra e la temperatura di azionamento P5

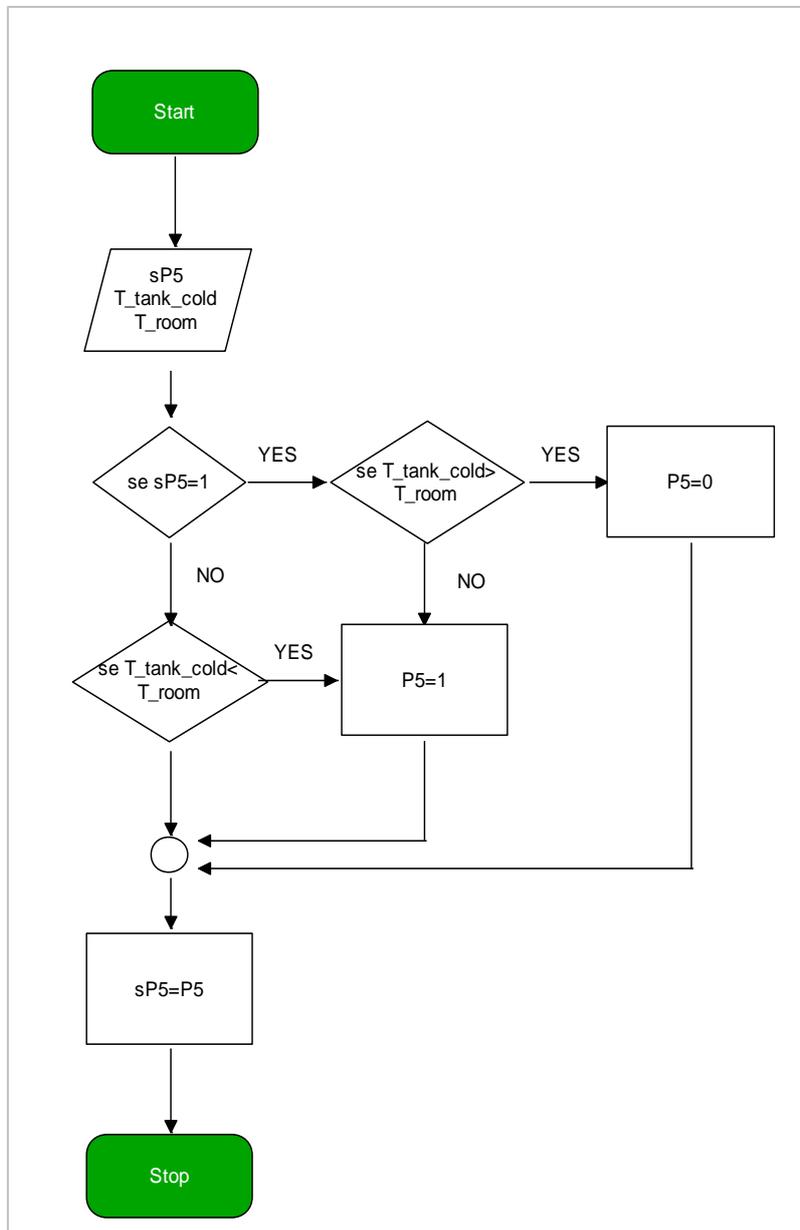


Figura 44 - Diagramma di flusso della logica di regolazione circuito C- utenza

7.2.5 Interfaccia di controllo e regolazione

La complessità degli impianti, la loro distribuzione sul territorio e la necessità di personale qualificato per il loro controllo impongono l'utilizzo e l'adozione di strumenti adeguati per una gestione efficace e sicura. L'elemento che può fare la differenza in impianti tecnologicamente avanzati è la possibilità di disporre sempre e dovunque delle informazioni necessarie alle decisioni da assumere. Ciò significa acquisire in tempo reale i dati dal campo, elaborare le informazioni per renderle più facilmente interpretabili e distribuire i dati a chi, sulla base degli stessi, deve prendere le decisioni, intervenire in caso di anomalia, pianificare operazioni di manutenzione o aggiornamento. Proprio per questo il telecontrollo, la possibilità cioè di monitorare e controllare un impianto da remoto, diventa una funzionalità necessaria e fondamentale per una gestione corretta e sicura di un'installazione. In quest'ottica considerando la rara diffusione dei sistemi di Solar Cooling nelle configurazioni impiantistiche tradizionali e considerato il minimo grado di standardizzazione di tali tipologie impiantistiche, per supportare la diffusione di tale tecnologia, è importante divulgare informazioni sui benefici e sull'efficienza dei sistemi installati. In questo senso il monitoraggio ha un ruolo cruciale nel dimostrare il potenziale della tecnologia del raffrescamento solare, testimoniandone il contributo al risparmio di energia primaria e diffondendo informazioni utili al corretto funzionamento dei sistemi.

Il sistema di telecontrollo e telegestione dell'impianto in oggetto deve prevedere la possibilità di lettura di tutti i parametri monitorati, degli eventuali allarmi e la gestione delle seguenti variabili:

<i>Nome variabile</i>	<i>Significato</i>	<i>Tipo variabile</i>	<i>R/W</i>	<i>Range</i>
T_coll	Temperatura in uscita dai collettori solari	Analogica	R	0-200 °C
T_tank_hot (x6)	Temperatura sonda su serbatoio caldo (x6)	Analogica	R	0-100 °C
Diff_start	Differenziale di attivazione pompa solare	Analogica	R/W	0-20 °C
Diff_stop	Differenziale di disattivazione pompa solare	Analogica	R/W	0-20 °C
P1	Consenso per attivazione circolatore P1	Digitale	R/W	0-1
sP1	Stato di funzionamento circolatore P1	Digitale	R	0-1
T_set	Temperatura per regolazione inverter circolatore P1	Analogica	R/W	0-200 °C
T_coll_max	Temperatura massima per avvio dissipazione	Analogica	R/W	0-200 °C
AER	Consenso per attivazione dry cooler	Digitale	R/W	0-1
sAER	Stato di funzionamento dry cooler	Digitale	R	0-1
V1	Consenso per valvola deviatrice dissipazione	Digitale	R/W	0-1
sV1	Stato di funzionamento valvola dissipazione	Digitale	R	0-1
ASS	Consenso per avvio assorbitore	Digitale	R/W	0-1
sASS	Stato di funzionamento assorbitore	Digitale	R	0-1
sP2	Stato di funzionamento circolatore P2	Digitale	R	0-1
sP3	Stato di funzionamento circolatore P3	Digitale	R	0-1
sP4	Stato di funzionamento circolatore P4	Digitale	R	0-1
sTE	Stato di funzionamento torre evaporativa	Digitale	R	0-1
T_tank_cold (x2)	Temperatura sonda su serbatoio freddo (x2)	Analogica	R	0-100 °C
T_min_ass	Temperatura minima per avvio assorbitore	Analogica	R/W	0-100 °C
T_min_cold	Temperatura minima per anti	Analogica	R/W	0-100 °C

	congelamento			
P5	Consenso per attivazione circolatore P5	Digitale	R/W	0-1
sP5	Stato di funzionamento circolatore P5	Digitale	R	0-1
T_room	Temperatura per attivazione utenza	Analogica	R/W	0-100 °C
T_serra (x10)	Temperatura interna alla serra (x10)	Analogica	R	0-100 °C

7.3 Valutazione del potenziale degli impianti di Solar Cooling

Una prima attività svolta ha riguardato la valutazione del potenziale economico degli impianti di solar cooling per la climatizzazione dei sistemi serra rispetto ai sistemi normalmente usati, considerando come riferimento i parametri tecnico-economiche dell'impianto esistente.

Per generalizzare i risultati, la comparazione è stata effettuata non su una serra di dimensioni pari a quella a cui è asservito l'impianto in quanto non rappresentativa dei sistemi serra comunemente utilizzati, ma è stata considerata una serra di un ettaro. Le prestazioni dell'impianto di solar cooling sono state determinate mediante il simulatore dinamico ENEA, estrapolandole dalle caratteristiche del sistema serra di Valenzano.

La valutazione economica è stato effettuata mediante il calcolo del VAN, confrontando l'impianto di solar cooling con i sistemi più comuni utilizzati per la climatizzazione delle serre: ventilatori, fanpad e pompe di calore; anche se le prime due soluzioni non costituiscono impianti di climatizzazione ma solo di ventilazione sono stati inseriti perché comunemente utilizzati per contenere le temperature interne delle serre.

Nella valutazione è stato incluso l'incentivo del Nuovo Conto Termico per gli impianti solari in configurazione di solar cooling.

Le principali grandezze utilizzate per effettuare il confronto economico sono riportate nella Tabella 8.

Tabella 8 - Analisi comparativa VAN serra

ANALISI VAN PER SERRA DA 1 ETTARO (STIMA ANNUALE)			
SISTEMI DI CLIMATIZZAZIONE	ventilazione	fanpad	pdC
Energia elettrica raffrescamento (kWh)	100'000	175'000	414'000
spesa annua totale energia elettrica	29'000	50'750	120'060
SOLAR COOLING			
Superficie solare lorda installata (m2)	1'500	1'500	1'500
Potenza nominale frigorifera kW	630	630	630
rapporto m2 /kW	2.4	2.4	2.4
costo investimento (€/m2)	500.00	500.00	500.00
costo totale campo solare (€)	750'000	750'000	750'000
RISPARMI SOLAR COOLING			
costo energia elettrica (€/kWh)	0.29	0.29	0.29
risparmio annuale (€)	29'000	50'750	120'060
Tempo di payback (anni)	8.5	4.9	2.1
INCENTIVO SOLAR COOLING			
incentivo per solar cooling (€/m2)	67	67	67
durata incentivo (anni)	5	5	5
Incentivo totale annuo (€)	100'546	100'546	100'546
Incentivo totale (€)	502'728	502'728	502'728
incidenza (%) incentivo su investimento	67%	67%	67%

Il grafico di Figura 45 riporta l'andamento del VAN a 15 anni in cui si evidenzia come gli impianti di solar cooling, nella configurazione proposta che sarà messa a punto nell'attività delle prossime annualità, evidenziano una convenienza economica anche rispetto al semplice sistema di ventilazione.

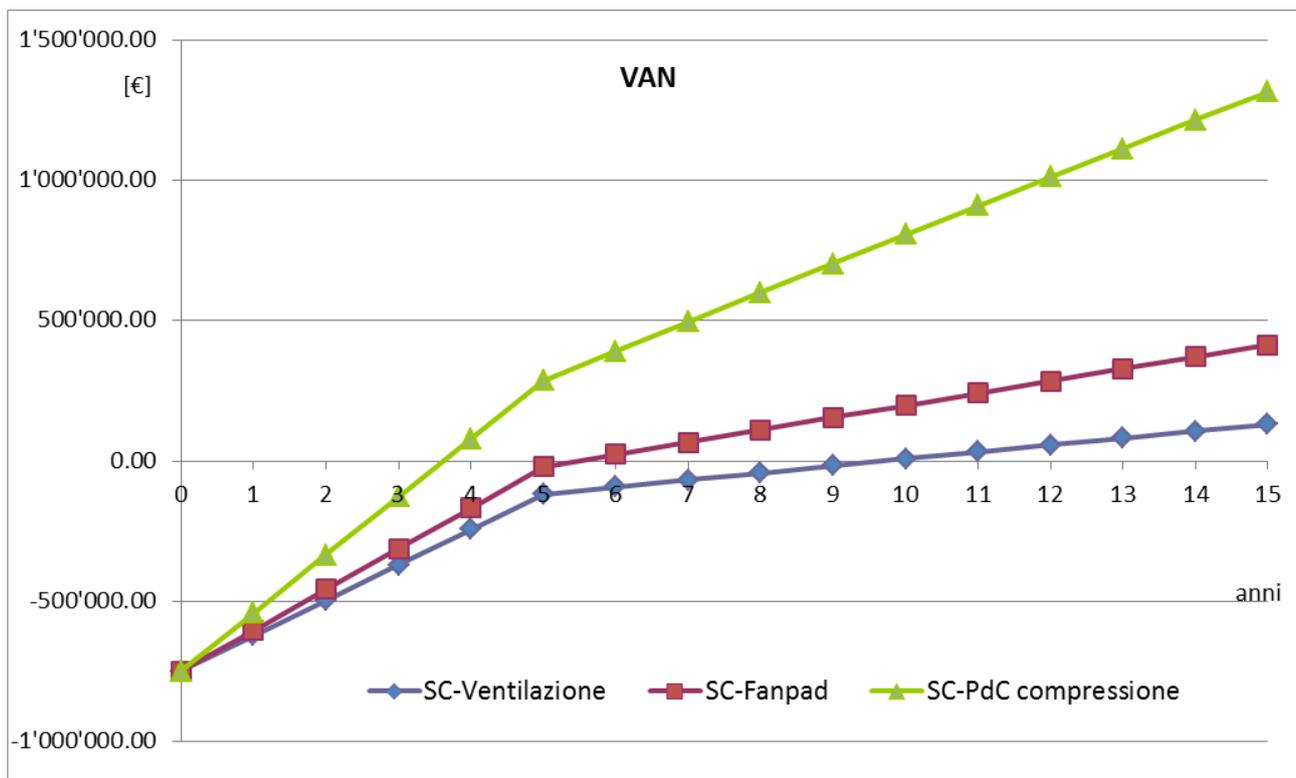


Figura 45 – andamento del VAN

8 Conclusioni

Le coperture verdi, nell'accezione generale di Green Roof (Tetti Verdi), Green Walls (Pareti Verdi) oppure Living Walls (Pareti verdi integrate nella facciata), rappresentano un sistema vegetale integrato nell'edificio. In particolare, consentono la schermatura della radiazione solare incidente e, mediante il fenomeno della evapotraspirazione (evaporazione dal substrato di coltivazione e traspirazione di acqua dalla pianta), favoriscono un aumento dell'umidità dell'aria che circonda l'edificio. La realizzazione di un sistema vegetale sulle superfici orizzontali e/o verticali degli edifici favorisce il risparmio energetico soprattutto nei periodi stagionali estivi o comunque caratterizzati da caldo intenso. Infatti, la copertura verde oltre a schermare l'edificio, migliora le performance dei sistemi di condizionamento, tecnicamente caratterizzati da condensatori raffreddati ad aria, poiché con l'evapotraspirazione si diminuisce la temperatura dell'aria esterna e conseguentemente la temperatura di condensazione del refrigerante, con una maggiore efficienza del sistema di condizionamento dell'aria e quindi una diminuzione degli impatti ambientale relativo all'emissione di CO₂.

Il presente report contiene uno *State of the Art* di carattere generale sui flussi energetici delle coperture verdi, nelle tipologie di tetto verde e di parete verde, in relazione alle precedenti ricerche sviluppate con il programma RDS. Si è ritenuto di inserire anche una breve analisi degli effetti della copertura vegetale rispetto alla diminuzione dei valori quantitativi e qualitativi della radiazione solare incidente sull'edificio con particolare attenzione all'influenza del LAI sulla riduzione della radiazione solare incidente sull'edificio.

Sulla base delle precedenti ricerche si è arrivati quindi alla realizzazione di una struttura prototipo di parete verde, in corso di installazione presso il Centro ENEA Casaccia, di cui il report riporta il lay-out e parte dettagli tecnici. A supporto di questa realizzazione si è provveduto a sviluppare un prototipo di *design* di monitoraggio dati al fine di valutare i flussi energetici che si vengono a stabilire tra la copertura verde posta in verticale e le pareti dell'edificio. Ai fini di una maggiore comprensione dei fenomeni che regolano i

processi di condizionamento dell'aria è stata sviluppata una analisi dei parametri psicrometrici e inoltre è stata sviluppata una fattibilità tecnica per valutare le prestazioni energetiche dei sistemi di condizionamento dell'aria al diminuire della temperatura dell'aria esterna che viene assorbita dalla macchina di condizionamento. Infatti, le indagini sulla influenza dei sistemi vegetali rispetto al miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici e, più in generale nei confronti della diminuzione dei consumi di energia e delle emissioni di CO₂ nelle aree urbane, rappresentano una delle priorità scientifiche.

Per quanto riguarda il prototipo di solar cooling, in questa prima annualità è stata effettuata una valutazione comparativa sulla potenzialità di tali impianti quando applicati ai sistemi serra, ed inoltre è stato progettato e realizzato un nuovo sistema di gestione e controllo dell'impianto, totalmente gestibile da remoto, che permetterà di effettuare la prima campagna sperimentale durante la prossima stagione estiva. Tale attività è stata svolta realizzando, a valle dei necessari studi propedeutici, i diagrammi di flusso che sono serviti alla ditta scelta per implementare le logiche di gestione nel controllore a bordo del sistema. Poiché l'intera attività è svolta in collaborazione con l'Università di Bari, Dipartimento di Scienze Agro-Ambientali e del Territorio (DISAAT), che ha competenze in campo agrario, l'ENEA si occuperà di tutti gli aspetti legati alla gestione e ottimizzazione delle prestazioni dell'impianto, mentre le attività dell'Università saranno centrate sulla messa a punto del sistema ottimale di emissione in serra.

9 Riferimenti bibliografici

1. ENEA-RAEE, 2016.
2. 2020 – 2030 – 2050 Common Vision for the Renewable Heating & Cooling sector in Europe European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling RHC, 2011. ISBN 978-92-79-19056-8 doi:10.2788/20474 © European Union, 2011.
3. COM(2016) 51 final. Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni. Una strategia dell'UE in materia di riscaldamento e raffreddamento. {SWD(2016) 24 final}.
4. Campiotti C., Morosinotto G., Puglisi G., Schettini E., Vox G.. Performance evaluation of a solar cooling plant applied for greenhouse thermal control. 2016. Agriculture and Agricultural Science Procedia 8 (2016) 664 – 669.
5. Wong NH, Kwang Tan AY, Chen Y, Sekar K, Tan PY, Chan D, Chiang K, Wong NC (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. Build.Environ., 45: 663-672.
6. Mazzali U, Peron F, Romagnoni P, Pulselli RM, Bastianoni S (2013). Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate. Build.Environ., 64: 57-66.
7. Cheng CY, Cheung KKS, Chu LM (2010). Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. Build.Environ., 45: 1779-1787.
8. Jim CY and He H (2011). Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem. Ecol.Eng., 37: 1112-1122.
9. Sheweka S and Magdy AN (2011). The Living walls as an Approach for a Healthy Urban Environment. Energy Procedia, 6: 592-599.
10. Perini K, Ottelè M, Fraaij ALA, Haas EM, Raiteri R (2011). Vertical greening systems and the effect on airflow and temperature on the building envelope. 46: 2287.
11. Perini K and Rosasco P (2013). Cost e benefit analysis for green façades and living wall systems. Building and Environment, 70: 110.
12. R. M. Pulselli, F. Saladini, E. Neri & S. Bastianoni. 2014. A comprehensive lifecycle evaluation of vertical greenery systems based on systemic indicators. WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol 191, www.witpress.com, ISSN 1743-3541 (on-line) ©2014 WIT Press, doi:10.2495/SC140862
13. Schettini E., G. Vox, G. Scarascia Mugnozza, I. Blanco. 2014. Modello energetico del microclima all'interno di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo. Linee

- guida per l'incremento dell'efficienza energetica di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo. Report RdS/2013/160.
14. Campiotti C., R. Di Bonito, G. Giagnacovo, R. Colletta, M. Scocciati, C. Viola. 2014. Eco-Sistemi Vegetali per l'Efficienza Energetica e il Risparmio di Energia negli Edifici Urbani. Report RdS/2013/276.
 15. Ariaudo F., G.V. Fracastoro, S. Corgnati. "Cooling Load reduction by green walls". 2008. Politecnico di Torino. Dipartimento di Energetica. Seminario in ppt, Barge, 08.09.2008.
 16. UNI 11235:2007. Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e la manutenzione di coperture a verde.
 17. Samar Mohamed Sheweka, Nourhan Magdy Mohamed. Green Facades as a New Sustainable Approach Towards Climate Change. Energy Procedia 18 (2012) 507 – 520.
 18. OKE T.R. Boundary layer climates. Methuen, London, new York, 1978.
 19. David Tilley, Jeff Price, Serena Matt, Brodie Marrow. 2012. Vegetated Walls: Thermal and Growth Properties of Structured Green Facades. (UM-09040836).
 20. Campiotti C., Alonzo G., Balducchi R., Dondi F. 2008. Le tecnologie colturali "senza suolo" per i sistemi serra. RT/2008/9/BAS.
 21. Wang F. and Yoshida H. 2012. Improving air-conditioners'energy efficiency using green roof plants. www.interchopen.com.
 22. Tibbits. T.W. and Kozlowski. T.T. (eds) Controlled Environment Guidelines for Plant Research. New York: Academic Press, 1979. ISBN 0-12-690950-4.
 23. Fornasieri E., Corradi M., Cecchinato L., Seasonal energy efficiency (ESEER) of different installation solutions of chillers using screw compressors for R134a. Centro Studi Galileo.
 24. Pizzetti C., Condizionamento dell'aria e refrigerazione voll. 1 e 2. Ed. Ambrosiana, 2012.
 25. Rossi N., Manuale del termotecnico. Ed. Hoepli, 2009.
 26. Golino G., Liparotti G.F., Impianti termotecnici. Ed. Hoepli, 2008.
 27. Vio M., Impianti di climatizzazione. Ed. Delfino, 2008.
 28. Zemansky M. W., Calore e termodinamica . Ed. Zanichelli.
 29. Parolini G., Del Monaco A., Fontana D.M., Fondamenti di Fisica Tecnica. Ed. Utet, 1983.
 30. Molinari G., Diagrammi di stato per la termodinamica tecnica dell'acqua. Ed. ESA .
 31. Caleffi-idraulica 29- Gli Impianti a pannelli solari, tecniche e schemi di realizzazione- dicembre 2005
 32. Planning and Installing Solar Thermal System, A guide for installers, architects and engineers, Second edition, Earthscan, 2010;
 33. Puglisi G., Morosinotto G., Study and comparison of control and regulation systems for solar thermal plants, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Istanbul, Turkey, 2-4 December 2015;
 34. Catalogo tecnico circolatori DAB;
 35. G. Morosinotto, Tesi di Laurea Magistrale: Analisi sperimentale e ottimizzazione del funzionamento tramite modelli di simulazione dinamica dell'impianto di Solar Cooling a servizio dell'edificio F-51 del centro di ricerca ENEA Casaccia Relatore prof. Michele De Carli, Ing. Giuseppe Emmi, Ing. Giovanni Puglisi, 2013;
 36. Manuale operativo Yazaky
 37. Colaiemma M. Approfondimenti sul ciclo termodinamico adottato dagli assorbitori alimentati ad acqua calda;
 38. Campiotti C.A., Morosinotto G., Puglisi G., Schettini E., Vox G., Performance evaluation of a solar cooling plant applied for greenhouse thermal control, presentato al "Sustainability of Well-Being International Forum" Firenze, 4-6 giugno 2015.

10 Abbreviazioni ed acronimi

CBR	indice che esprime il rapporto tra i costi (energia e materiali) ed i benefici ambientali (risparmio energetico).
EED	Energy Efficiency Directive.
ETTV	Energy Thermal Transfer Value.
GR	Green Roof (Tetti verdi).
GW	Green Walls (Pareti verdi).
IRR	Internal Rate of Return.
LAI	Leaf Area Index.
NPV	Net Present Value.
PBP	PayBack Period.
SCOP	Seasonal Coefficient Of Performance, cioè coefficiente di prestazione.
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio, cioè indicatore dell'efficienza energetica.

11 Appendice

CENNI DI PSICROMETRIA

La psicrometria studia le proprietà dei miscugli di aria e vapore. Nella pratica tecnica, per lo studio dei problemi relativi al condizionamento si ricorre ai diagrammi psicrometrici che permettono una risoluzione grafica del problema stesso. I diagrammi normalmente si riferiscono alla pressione normale di 760 mmHg ed un kg di aria secca contenente una quantità variabile di vapore d'acqua. Attraverso questi diagrammi, note due grandezze del miscuglio aria-vapore in esame, è possibile identificare le altre grandezze del miscuglio [26].

11.1 Caratteristiche dell'Aria secca

Atmosfera standard: indica le condizioni dell'aria al livello del mare (0 m):

temperatura standard: $T = 288 \text{ K}$; ($T = 15 \text{ °C}$)

pressione barometrica standard: $p = 101,325 \text{ kPa}$; ($p = 760 \text{ mmHg}$)

Temperatura a bulbo secco [t]: e' la temperatura misurata attraverso un comune termometro.

Nel S.I. e' espressa in [K], anche se e' di uso comune esprimerla in [°C].

Volume specifico dell' aria secca [V_a]: per l'aria secca e' possibile applicare l'equazione di stato dei gas perfetti che seguono la legge:

$$p_a V_a = RT$$

da cui segue:

$$V_a = R_a T / p_a$$

- V_a = volume specifico dell'aria secca [m³/kg];
- R_a = Costante dei gas, per l'aria secca vale 287,055 [J/(Kg K)];
- T= temperatura assoluta [K];

- p_a = pressione dell'aria [Pa]

Ad una temperatura di 273 K (0 °C) ed alla pressione atmosferica standard si ha:

$$V_a = 0,774 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Calore specifico dell'aria secca [c_{pa}]: alla pressione atmosferica standard, il calore specifico dell'aria secca varia tra:

$$T = 233 \text{ K} ; c_{pa} = 0,996 \text{ kJ/kg K} ; (T = -40 \text{ °C} \quad c_{pa} = 0,238 \text{ kcal/kg °C})$$

$$T = 333 \text{ K} ; c_{pa} = 1,022 \text{ kJ/kg K} ; (T = +60 \text{ °C} \quad c_{pa} = 0,244 \text{ kcal/kg °C})$$

Nei calcoli usuali il calore specifico dell'aria secca può assumersi pari a:

$$c_{pa} = 1,005 \text{ [kJ/kg K]} ; c_{pa} = 0,24 \text{ [kcal/kg °C]}$$

Entalpia dell'aria secca [J_a]: alla pressione atmosferica standard e riferendosi ad 1 kg di aria secca, l'entalpia a $T = 273 \text{ K}$ ($T = 0 \text{ °C}$) si assume arbitrariamente uguale a zero. Pertanto l'entalpia di 1 kg di aria secca per una generica temperatura t è espressa da:

$$J_a = c_{pa} \cdot t$$

da cui:

$$J_a [\text{kJ/kg}] = 1,005 \cdot t ; J_a [\text{kcal/kg}] = 0,24 \cdot t$$

J_a = entalpia dell'aria secca [kJ/kg];

t = temperatura a bulbo asciutto [K].

11.2 Caratteristiche dell'aria umida

L'aria umida rappresenta una miscela gassosa di aria secca e vapore d'acqua che si trova nelle condizioni di vapore surriscaldato; pertanto l'aria umida la si può considerare come una miscela di gas perfetti, tranne il caso in cui il vapore d'acqua, in determinate condizioni, passa in fase liquida o solida ed esce così dalla miscela gassosa [27]. Per tale ragione la quantità di vapore d'acqua nella miscela non può essere arbitraria. È possibile stimare le proprietà dell'aria umida a diverse altitudini (z) con le seguenti relazioni:

$$p_{bar} = 101,325 (1 - 2,25577 \times 10^{-5}z)^{5,2559}$$

$$T = 15 - 0,0065 z$$

- p_{bar} = pressione barometrica, kPa;
- T = temperatura, °C;
- z = altitudine, m

In accordo con la legge di Dalton e considerando che generalmente la pressione d'aria umida coincide con la pressione barometrica, si ha:

$$p_{bar} = p_{aria} + p_{vap}$$

- p_{bar} ; pressione barometrica

- p_{aria} : pressione aria secca;
- p_{vap} : pressione vapore d'acqua

Aria umida non satura: si intende una miscela di aria secca e vapore surriscaldato. La pressione di vapore, p_{vap} è minore della pressione di saturazione, p_s , (punto A del diagramma p-v)

$$P_{vap} < p_s$$

Aria umida satura: aumentando il contenuto di vapore d'acqua nell'aria a temperatura costante, la pressione parziale aumenta raggiungendo il valore della pressione di saturazione p_s mentre il vapore diventa saturo secco: pertanto una miscela di aria secca e di vapore saturo secco si chiama aria umida satura. La pressione di vapore p_{vap} è uguale alla pressione di saturazione p_s

$$P_{vap} = p_s$$

A dette condizioni, contenuti maggiori di vapore d'acqua nell'aria, danno luogo alla precipitazione dell'acqua sotto forma di goccioline.

Temperatura di rugiada o punto di rugiada [t_r]: rappresenta la temperatura cui si deve raffreddare l'aria perché il vapore in essa contenuto raggiunga la saturazione per una quantità fissa di vapore acqueo. Il processo di saturazione può avvenire sia attraverso un aumento della quantità di vapor d'acqua, sia attraverso un raffreddamento a pressione parziale costante, p_{vap} del vapore. La particolare temperatura per cui la pressione di vapore p_{vap} diventa uguale alla pressione di saturazione p_s , si chiama temperatura di rugiada o punto di rugiada.

Temperatura a bulbo umido [t_{bu}]: e' la temperatura minima che l'acqua può raggiungere per evaporazione nell'ambiente circostante. Il raffreddamento avviene a seguito dell'assorbimento di calore necessario perché vi sia l'evaporazione dell'acqua a temperatura costante. Detta temperatura viene misurata attraverso un comune termometro il cui bulbo viene avvolto in una garza imbevuta d'acqua. La temperatura a bulbo umido viene usata per calcolare l'umidità relativa. Nel S.I. e' espressa in [K], anche se e' di uso comune esprimerla in [°C]. La Figura 14 mostra la struttura di uno psicrometro.

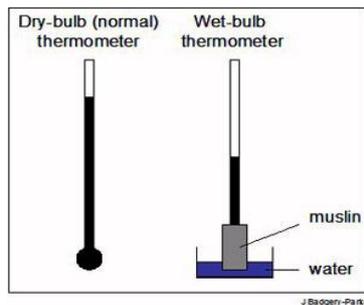


Figura 14. Caratteristiche di uno psicrometro

La temperatura a bulbo umido possiamo calcolarla attraverso la seguente relazione:

$$T_{bu} = - \frac{J \cdot \Delta t}{\Delta t \cdot R_v \cdot \ln \phi - J}$$

dove:

- R_v – costante dei gas per il vapor d'acqua; 461,520 J/kg K
- J – Entalpia di vaporizzazione dell'acqua;
- ϕ – Umidità relativa

- Δt - rappresenta il salto di temperatura, $(t_2 - t_1)$ con $t_1 = 273,15$ K, a bulbo asciutto della miscela espressa in K.

Volume specifico del vapor d'acqua [V_v]: anche per il vapor d'acqua e' possibile applicare l'equazione di stato dei gas perfetti che seguono la legge:

$$p_{vap} V_v = RT$$

da cui segue:

$$V_v = R_v T / p_v$$

- V_v - volume specifico del vapor d'acqua; m^3/kg ;
- R_v - Costante dei gas, per il vapor d'acqua; $461,520$ J/Kg K;
- T - temperatura assoluta; K;
- p_{vap} - pressione del vapor d'acqua; Pa

Calore specifico del vapor d'acqua [c_{pv}]: alla pressione atmosferica standard, nel campo del condizionamento il calore specifico del vapor d'acqua si assume costante e vale:

$$c_{pv} = 1,926 \text{ [kJ/kg}\cdot\text{K]} \quad ; \quad c_{pv} = 0,46 \text{ [kcal/kg}\cdot\text{°C]}$$

Tenore di massa di acqua o Umidità specifica [x]: è il rapporto tra la quantità di vapore d'acqua (espressa in grammi a chilogrammi) contenuta in un kg di aria secca

$$x = G_{vap} / G_{aria}$$

L'equazione di Clapeyron per una mole di aria secca è espressa da:

$$p_a \cdot V = n \cdot R_a \cdot T$$

ove V è il volume occupato da una mole di aria secca. Se allora il tenore di acqua molare è pari ad x , che occupa lo stesso volume V , l'equazione di Clapeyron per le x moli di vapor d'acqua si scrive:

$$p_{vap} \cdot V = x \cdot n \cdot R_v \cdot T$$

dalle due precedenti si ottiene:

$$x = \frac{R_v}{R_a} \cdot \frac{p_{vap}}{p_a}$$

dunque:

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_{vap}}{p_a}$$

applicando la legge di Dalton, si ottiene:

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_{vap}}{p_{bar} - p_{vap}}$$

Si deve sottolineare che le relazioni sopra scritte sono valide soltanto nel caso in cui l'acqua presente nell'aria umida si trovi allo stato di vapore, poiché soltanto in questo caso può essere applicata l'equazione di Clapeyron per un gas perfetto. Il tenore di vapore massimo possibile per una data temperatura dell'aria umida è dato da:

$$x_s = 0,622 \frac{p_s}{p_{bar} - p_s}$$

Si osservi che il tenore di vapore massimo dipende dalla pressione barometrica e dalla temperatura dell'aria umida. Dal momento che la pressione di saturazione del vapore cresce con la temperatura ne segue che quanto più è alta la temperatura dell'aria tanto più è elevato il suo tenore di vapore massimo.

Umidità assoluta; si intende il valore della pressione parziale p_{vap} del vapore d'acqua contenuto nell'aria umida, espresso in mm Hg.

Umidità relativa [Ur]; è il rapporto tra la pressione parziale del vapor d'acqua p_{vap} contenuto nell'aria umida ad una data temperatura e la corrispondente pressione di saturazione del vapore d'acqua, ovvero la massima pressione parziale del vapore d'acqua alla temperatura data, da cui:

$$\varphi = \frac{p_{vap}}{p_s} \cdot 100$$

Il valore φ è espresso in percentuale, da cui se $0 \leq p_{vap} \leq p_s$ allora si ha che $0 \leq \varphi \leq 100\%$. Ad esempio avere il 50% di umidità relativa alla temperatura t , significa che la pressione parziale di vapore d'acqua p_{vap} corrisponde al 50% della pressione di saturazione del vapore d'acqua alla temperatura t . Pertanto dalla precedente, in riferimento alla temperatura t , si ottiene:

$$p_{vap} = p_{sat} \cdot \frac{\varphi}{100}$$

Entalpia dell'aria umida [J_v]; si riferisce al kg di aria secca ossia ad $(1+x)$ kg di aria umida ed è pari alla somma dell'entalpie del kg di aria secca e di x kg di vapore d'acqua in essa contenuto. Considerando il vapor d'acqua come un gas perfetto e tenendo conto che il calore specifico e l'entalpia dei gas perfetti sono indipendenti dalla pressione ed infine che il calore specifico del vapor d'acqua c_{pv} allo stato gassoso perfetto può ritenersi costante in relazione al piccolo intervallo di temperature utilizzate nel condizionamento, l'entalpia del vapore d'acqua alla temperatura t ed alla pressione p può essere espressa:

$$J_v = r(0^\circ\text{C}) + c_{pv}$$

dove $r(0^\circ\text{C})$ è il calore di vaporizzazione a 0°C e vale 2501 [kJ/kg], ovvero 597,3 [kcal/kg].

Pertanto alla temperatura t , nel caso in cui l'entalpia sia misurata in [kJ/kg], ovvero in [kcal/kg] si ha:

$$J_v[\text{kJ/kg}] = 2501 + 1,926 \cdot \Delta t \quad ; \quad J_v[\text{kcal/kg}] = 597,3 + 0,46 \cdot \Delta t$$

L'entalpia di un *miscuglio aria-vapore* alla temperatura t , è pari alla somma dell'entalpia dell'aria secca e dell'entalpia del vapor d'acqua, pertanto si ha:

$$J = 0,24 \cdot \Delta t + 597,3 \cdot x + 0,46 \cdot \Delta t \cdot x$$

dove:

J – entalpia della miscela espressa in kcal/kg aria secca

Δt – rappresenta il salto di temperatura, ($t_2 - t_1$) con $t_1 = 0$ °C, a bulbo asciutto della miscela espressa in °C

x – umidità specifica della miscela espressa in kg vapor d'acqua/ kg aria secca

Il diagramma di Ramzin ($I-d$) (Figura 16) semplifica notevolmente i calcoli inerenti l'aria umida: sull'asse delle ordinate sono riportati i valori dell'entalpia dell'aria umida in kJ/kg di aria secca, sull'asse delle ascisse è riportato il tenore d'acqua in g/kg di aria secca [28]. Poiché l'asse delle ascisse è diretto sotto un angolo di 135° rispetto all'asse orizzontale delle ordinate, le curve ad entalpia costante risultano inclinate di 45° rispetto all'orizzontale.

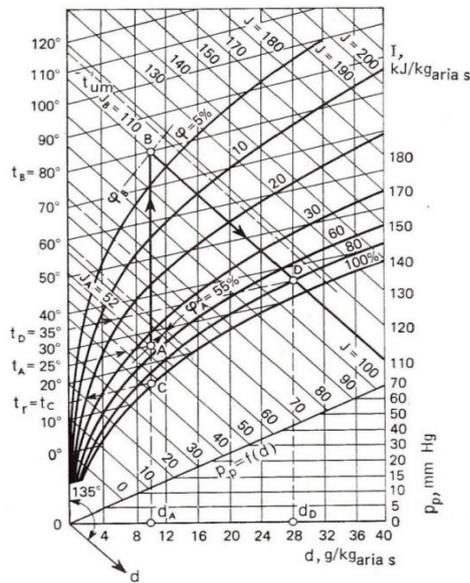


Figura 16. Diagramma I-D aria umida di Ramzin

11.3 Ciclo frigorifero

Quando un sistema compie una trasformazione si ha una variazione di entropia. Se si calcola la variazione di entropia del sistema e si aggiunge la variazione di ciò che lo circonda localmente, si ottiene quella che si chiama *variazione di entropia dell'universo*.

Trasformazione reversibile: è una trasformazione tale che sia il sistema, sia ciò che lo circonda localmente, possono essere riportati nei rispettivi stati iniziali, senza produrre alcun cambiamento nel resto dell'universo, ove per universo si intende ciò che circonda localmente il sistema rappresentato da quella parte degli oggetti che possono interagire direttamente con il sistema stesso. Una trasformazione che non soddisfa questi requisiti si dice *irreversibile*. Per chiarire questo concetto definiamo dapprima il concetto di lavoro. L'esecuzione di un lavoro L può essere sempre definito come un sollevamento o abbassamento di un peso, pertanto si ha un aumento o diminuzione dell'energia potenziale di un sistema meccanico. Ciò posto, immaginiamo che un sistema S passi da uno stato iniziale S_1 ad uno stato finale S_2 ; corrispondentemente un peso sospeso si abbassi ad un'altezza corrispondente all'esecuzione di una quantità L di lavoro ed infine una quantità Q di calore fluisce dal sistema ai serbatoi. La trasformazione si dice *reversibile* se il sistema, il peso ed i serbatoi possono essere riportati allo stato iniziale S_1 , senza che ciò

implichi alcun cambiamento in un altro sistema meccanico o serbatoio dell'universo che possa interagire con il sistema S.

Irreversibilità termica: consideriamo due trasformazioni che implicano un passaggio di calore fra un sistema ed un serbatoio in virtù di una differenza finita di temperatura:

T_1 – Conduzione o radiazione di calore da un sistema ad un serbatoio più freddo,

T_2 – Conduzione o radiazione di calore attraverso un sistema, il cui stato non cambia, da un serbatoio caldo ad uno freddo.

Per riportare il sistema e ciò che lo circonda ai rispettivi stati iniziali, si dovrebbe trasmettere calore da un corpo più freddo ad uno più caldo; questo viola il secondo principio della termodinamica, pertanto tutte le trasformazioni di questo tipo sono irreversibili. Per trasformazioni *reversibili* la variazione di entropia è espressa dalla relazione:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

Per trasformazioni *irreversibili*

$$dS \geq \frac{dQ}{T}$$

Nel S.I. l'entropia si misura in J/K

Applicazione del principio dell'entropia: si vuole abbassare la temperatura di un corpo di massa M dal valore T_1 dell'ambiente circostante al valore T_2 .

Si utilizza un frigorifero che lavora su un ciclo fra un serbatoio a temperatura T_1 ed il corpo stesso, che deve essere portato a temperatura T_2 . Dopo un numero finito di cicli al corpo viene sottratta un quantità di calore Q , il frigorifero compie un lavoro W , ed al serbatoio viene ceduta una quantità di calore $Q+L$.

Le variazioni di entropia sono:

$$\Delta S \text{ del corpo} = S_2 - S_1$$

$$\Delta S \text{ del refrigerante} = 0$$

$$\Delta S \text{ del serbatoio} = \frac{Q+L}{T_1}$$

Applicando il principio dell'entropia, si ottiene:

$$S_2 - S_1 + \frac{Q + L}{T_1} \geq 0$$

Moltiplicando per T_1 si ottiene:

$$T_1(S_2 - S_1) + Q + L \geq 0$$

Da cui:

$$L \geq T_1(S_2 - S_1) - Q$$

Ne consegue che il valore minimo di L_{\min} è:

$$L_{min} = T_1(S_2 - S_1) - Q$$

Avendo a disposizione le tavole delle proprietà termodinamiche del materiale è possibile definire il costo minimo di esercizio dell'impianto frigorifero. In accordo con il secondo principio della termodinamica, per poter trasmettere il calore da un corpo meno caldo ad uno più caldo è necessario un processo supplementare di compensazione con apporto di energia dall'esterno in quanto tale processo non avviene in modo spontaneo. Il ciclo frigorifero più efficiente è il *ciclo inverso di Carnot* (Figura 17) che, però non è realizzabile, parliamo allora di *impianti frigoriferi a compressione di vapore saturo* che meglio si avvicinano, in termini di efficienza, al ciclo di Carnot [29].

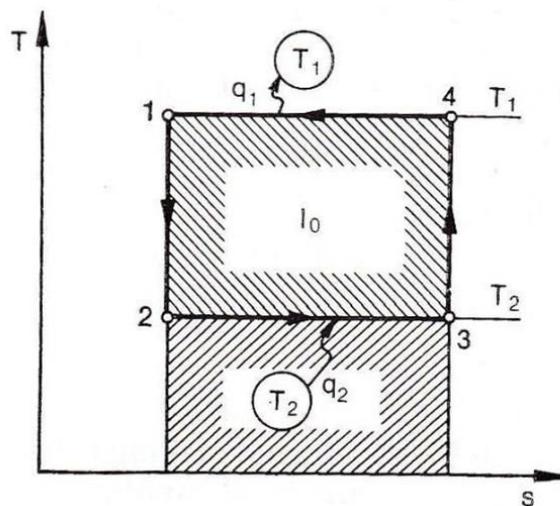


Figura 17. Ciclo ideale inverso di Carnot - piano T-S

Il ciclo di Carnot inverso viene percorso in senso antiorario, dove il fluido refrigerante viene dapprima compresso lungo l'adiabatica 3-4, con innalzamento della temperatura da T_2 a T_1 , poi lungo la isoterma 4-1 viene ceduto alla sorgente calda il calore Q_1 . Successivamente il fluido si dilata lungo l'adiabatica 1-2 con l'abbassamento della temperatura da T_1 a T_2 ed infine lungo la isoterma 2-3 viene assorbito calore dalla sorgente fredda. Il lavoro che viene speso per sottrarre calore dalla sorgente calda e cederlo alla sorgente fredda è equivalente all'area 3412. L'efficienza del ciclo frigorifero di Carnot è espressa dal *coefficiente di effetto frigorifero* ε ed è definito dal rapporto tra il calore sottratto alla sorgente fredda Q_2 ed il lavoro speso L , ovvero dal rapporto tra la temperatura T_2 della sorgente fredda e la differenza di temperatura tra le due sorgenti $T_1 - T_2$ (Figura 18):

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{AL} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

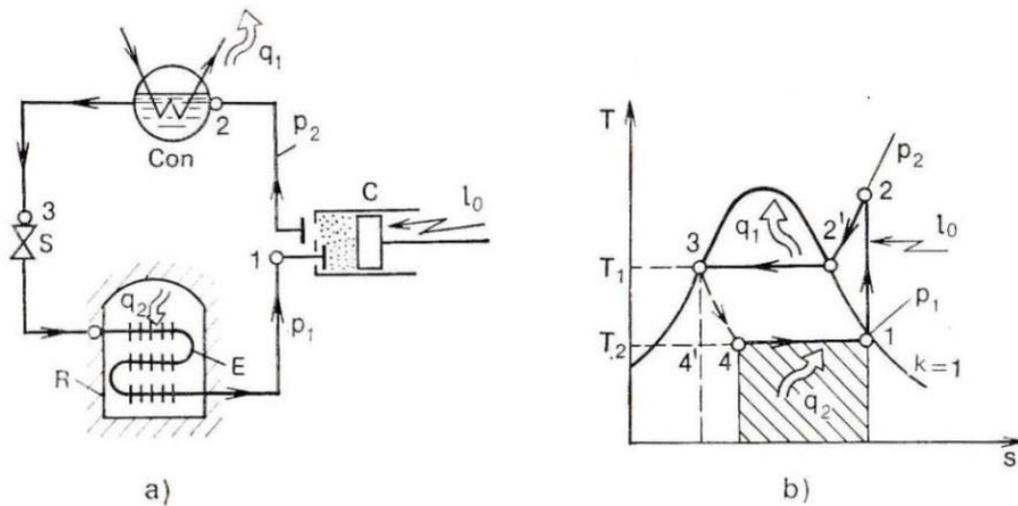


Figura 18. Schema e diagramma T-S impianto frigorifero a compressione di vapore

Analogamente a quanto descritto per il ciclo inverso di Carnot si può esprimere il *coefficiente di effetto frigorifero E.E.R. (Energy Efficiency Ratio)* per un ciclo di un impianto frigorifero come:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{L} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

Dalla precedente relazione si evince che quanto più è grande il valore di ε tanto più è efficace il ciclo frigorifero, ovvero tanto più è piccolo il lavoro speso per sottrarre calore alla sorgente fredda. Tale valore nelle normali macchine frigorifere supera l'unità. Riferendoci ad un determinato intervallo di tempo, il coefficiente di effetto frigorifero è espresso dal rapporto tra una portata di calore, cioè dal flusso termico totale asportato dall'ambiente da refrigerare e la potenza. Se l'intervallo è 1 ora la potenza sarà espressa in kcal/h, da cui si ottiene:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{P \cdot 860}$$

Normalmente viene usato l'effetto frigorifero specifico ξ definito come il rapporto tra il calore sottratto nell'evaporatore all'ambiente da mantenere a bassa temperatura in 1 ora, cioè la portata in kcal/h e la potenza espressa in kW, da cui:

$$\xi = \frac{Q_2}{P} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right]$$

In un ciclo inverso il calore Q_1 che viene trasmesso alla sorgente calda è pari alla somma del calore Q_2 sottratto alla sorgente fredda e del calore equivalente al lavoro compiuto per la realizzazione del ciclo, L.

$$Q_1 = Q_2 + L$$

Il condizionamento estivo dell'aria generalmente avviene attraverso una centrale frigorifera del tipo a compressione di vapore saturo. Una delle caratteristiche principali delle macchine frigorifere è la *potenza frigorifera*, ossia la quantità di calore sottratta alla sorgente fredda nell'unità di tempo.