

Controllo climatico di serre sperimentali riscaldate con reflui a bassa entalpia da centrali elettriche

F. Groppi, F. Parrini, D. Polenghi, R. Sidri

1. Introduzione

L'ENEL è da tempo impegnato in progetti legati all'utilizzo del calore reflu a bassa entalpia prodotto dai gruppi termoelettrici con l'intento di verificarne la convenienza energetica ed economica per impieghi in processi biologici che operano a temperatura ambiente.

La maggior parte delle centrali costruite in Italia utilizza circuiti di raffreddamento aperti: essi prelevano direttamente l'acqua da fiumi, canali o dal mare. Il fluido viene successivamente reimpresso all'esterno con una temperatura solitamente superiore di $8 \div 10^\circ\text{C}$ rispetto alle condizioni di ingresso. Nel caso invece non fosse possibile costruire un impianto in prossimità di una sorgente in grado di assicurare con la dovuta regolarità il necessario apporto di acqua, risulta necessario utilizzare un sistema a torri di raffreddamento. In tal caso siamo in presenza di un circuito chiuso in cui l'acqua uscente dai condensatori viene completamente (o quasi) riutilizzata dopo essere passata attraverso le torri.

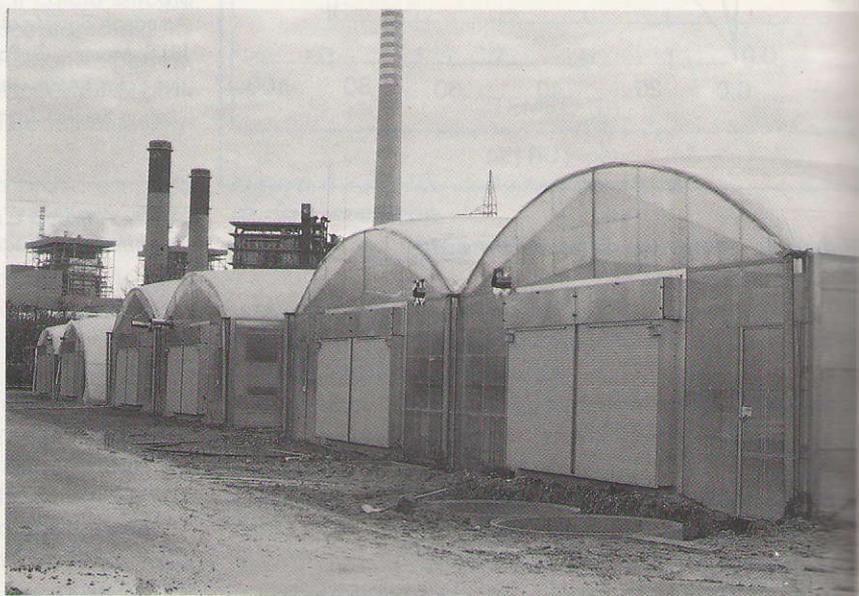
Il calore, così reso disponibile, è utilizzato come fluido termovettore. La temperatura dell'acqua uscente dai condensatori è comunque fortemente dipendente dalle condizioni meteorologiche del sito oltre che dal funzionamento della centrale, da ciò la necessità di ottimizzare i sistemi di utilizzo.

Allo scopo di mettere a punto nuove tecnologie serra e culturali, è stato realizzato un impianto sperimentale nei pressi della centrale termoelettrica di Tavazzano (MI) la quale

utilizza, per i propri circuiti di raffreddamento, l'acqua prelevata dal vicino canale Muzza.

L'impianto, nel suo complesso, risulta costituito da 12 serre di 300 m^2 ciascuna, destinate a valutare cicli biologici e condizioni di accrescimento per vari tipi di colture. In particolare il programma di ricerca è impostato principalmente su coltivazioni idroponiche (orticole e floricole), coltivazioni in vaso (floricole ed ornamentali), vivaistica (radicazione talee, produzione di piantine da seme ortive, specie sempreverdi) e specie da fiore in terreno. In tal modo sarà possibile selezionare quelle più idonee ad essere inserite in attività produttive e per le quali si possa prevedere un maggior ritorno economico rispetto a soluzioni impiantistiche tradizionali.

Al fine di valutare applicazioni facenti uso di differenti reflui termici, le cui caratteristiche dipendono dal tipo di impianto termoelettrico considerato, l'impianto serra



è stato dotato di un circuito di pompe di calore comandato da un sistema computerizzato in grado di simulare le temperature dei circuiti di raffreddamento di centrali termoelettriche con caratteristiche diverse da quelle specifiche dei gruppi di Tavazzano per ciò che riguarda lo smaltimento del calore di condensazione.

Il simulatore, in funzione della tipologia impiantistica prescelta (sistemi di torri a secco e a umido), delle grandezze ambientali misurate al momento e delle curve di carico elettrico prefissate dall'operatore, è in grado, per ogni sperimentazione, di far variare le condizioni al contorno così da permettere al ricercatore di ampliare le possibilità di indagine.

2. Descrizione dell'impianto

L'impianto serra, schematizzato in figura 2.1, si estende su una superficie di circa 1,5 ha in prossimità della centrale termoelettrica di Tavazzano e risulta costituito come segue:

aree confinate (6452 m²)

- due serre per colture idroponiche (540 m²) con copertura in polimetilmetacrilato (PMMA)
- due serre per colture idroponiche (540 m²) con copertura in doppio film plastico
- quattro serre per colture floricole (1080 m²) con copertura in doppio film plastico
- due serre per vivaismo (540 m²) con copertura in doppio film plastico
- due serre per colture bulbose (600 m²) con copertura in doppio film plastico

Tutti gli ambienti confinati sono dotati di:

- sistema di riscaldamento e raffreddamento

- doppio sistema di ombreggio e coibentazione interno
- sistema di irrigazione
- bancali fissi o mobili riscaldati
- sistema di condizionamento (riscaldamento e/o raffreddamento)
- generatori di soccorso
- ombraio (2500 m²) con riscaldamento del terreno per vivaismo
- avanserra (422 m²) per disbrigo operazioni colturali
- locale tecnico (230 m²) per posizionamento sistemi di produzione calore e trattamento acqua per irrigazione

aree servizi (300 m²)

- uffici (118 m²) con ubicato il sistema centralizzato di controllo e monitoraggio
- laboratorio (36 m²) per controllo e analisi soluzioni, substrato ecc.
- tettoia (74 m²) per stoccaggio terricci, automezzi
- magazzino (72 m²) per stoccaggio materiali, concimi ecc.

L'impianto è inoltre dotato dei necessari sistemi tecnologici per il controllo climatico degli ambienti così da rispondere a esigenze sia legate alla sperimentazione di tipo dimostrativo e al fine di minimizzare il ricorso a fonti energetiche convenzionali. Tali sistemi risultano essere i seguenti:

Sistema di produzione calore (Pompe di calore)

È costituito da quattro pompe di calore acqua/acqua, alimentate dal refluo termico della centrale di Tavazzano, che consentono di produrre un fluido termovettore a temperatura maggiore (max 45°C) impiegato per il riscaldamento delle serre.

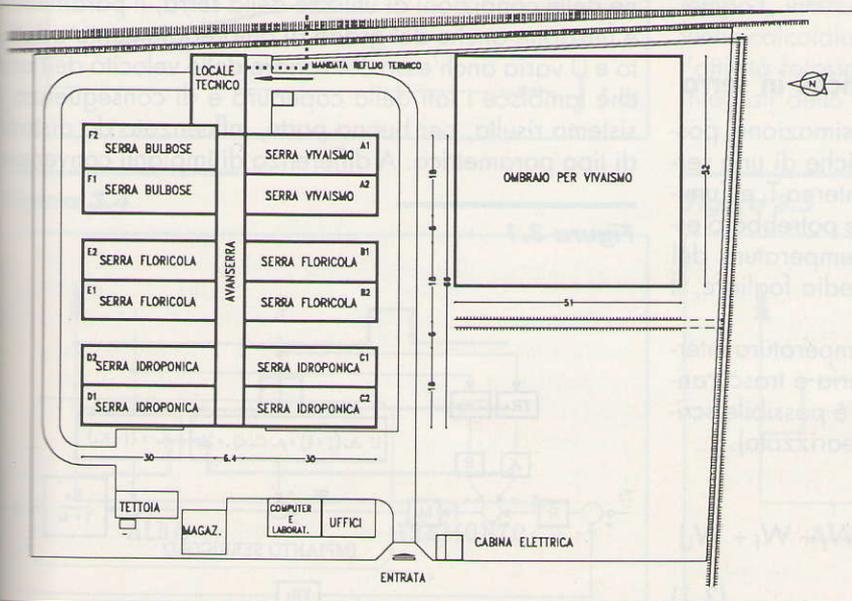
Sistema di controllo della temperatura del fluido termovettore

Per consentire un utilizzo di diverse tipologie di reflui termici l'impianto è stato dotato di un sistema di controllo computerizzato, in grado di regolare la temperatura del fluido termovettore, in base ai dati forniti dal modello di simulazione in tempo reale. In particolare il sistema gestisce, per ogni serra, due circuiti idraulici di distribuzione a temperatura controllata (risc. aereo e risc. substrato).

Sistema di utilizzo calore (riscaldamento ambienti)

Per ogni ambiente sono previsti due sistemi di riscaldamento, uno basale e uno aereo. Il primo permette di riscaldare i substrati di coltivazioni con tubi di plastica corrugati, il secondo è costituito da una macchina, opportunamente dimensionata per

Figura 2.1 - Planimetria impianto



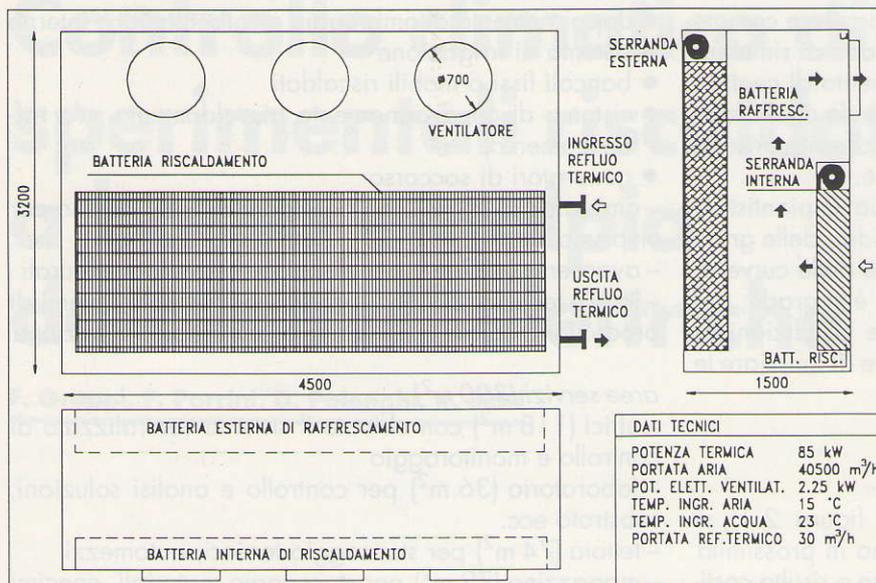


Figura 2.2 - Sistema di condizionamento serre

utilizzare reflui termici a bassa entalpia, che mediante batterie di scambio termico e ventilatori, permette il riscaldamento dell'aria dell'ambiente. Tale macchina è stata inoltre realizzata per permettere anche il raffreddamento adiabatico degli ambienti utilizzando gli stessi ventilatori (fig. 2.2).

Sistema di controllo degli schermi di ombreggio e coibentazione

Ogni ambiente è dotato di due schermi utilizzati per l'ombreggiamento nelle giornate soleggiate e per la coibentazione nella fase di riscaldamento notturno. Entrambi gli schermi sono controllati da un sistema computerizzato che provvede all'apertura o alla chiusura degli schermi in funzione di opportune logiche implementate su computer.

3. Controllo delle condizioni climatiche in serra

Le variabili di stato, che, in prima approssimazione, possono caratterizzare le condizioni climatiche di una serra, sono la temperatura media dell'aria interna T_i e l'umidità relativa interna U_i . Altre variabili che potrebbero essere prese in considerazione sono la temperatura del terreno e dei bancali, la temperatura media fogliare, il tasso di CO_2 e l'irraggiamento solare.

Facendo l'ipotesi semplificativa che la temperatura interna T_i sia uniforme per tutta la massa d'aria e trascurando gli scambi termici tra aria e bancali, è possibile scrivere la seguente equazione di stato (linearizzata).

$$T_i = \frac{1}{V \cdot \rho_a \cdot C_a} \cdot (W_c + W_i + W_a + W_r + W_t + W_f + W_L) \quad (3.1)$$

$W_c = U \cdot A_c \cdot (T_e - T_i)$ Scambi attraverso la copertura

$W_i = A_p \cdot \tau \cdot I$ Irraggiamento solare (piccola λ)

$W_a = \rho_a \cdot C_a \cdot Q_a \cdot (T_e - T_i)$ Scambi per ricambi e infiltrazioni

$W_t = \xi \cdot W_c$ Scambi col terreno

$W_f \cong -K_f \cdot A_p \cdot \tau \cdot I$ Evapotraspirazione delle colture

$W_L = -K_L \cdot T_i$ Reirraggiamento (grande λ)

U = Coefficiente globale di scambio per conduzione sulla copertura

A_c, A_p = Aree della copertura e di pianta

τ = Trasparenza copertura

ρ_a, C_a, Q_a = Densità, calore specifico e portata d'aria ricambi e infiltrazioni

ξ = Valore empirico per il calcolo delle dispersioni attraverso il terreno ($\cong 0,15 \div 0,20$)

K_f, K_L = Coefficienti globali da determinarsi sperimentalmente.

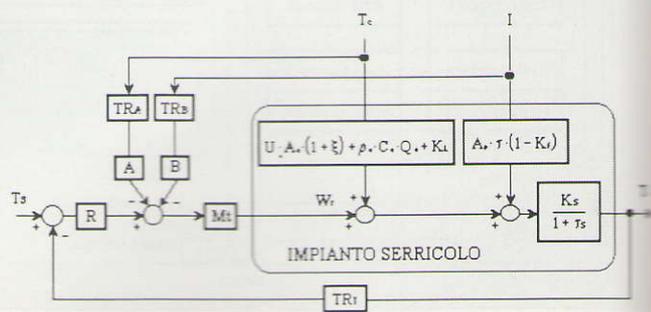
Un possibile sistema di regolazione della temperatura interna di una serra è quindi schematizzabile come in figura 3.1, in cui K_s e τ_s sono espressi dalle seguenti:

$$K_s = \frac{1}{U \cdot A_c \cdot (1 + \xi) + \rho_a \cdot C_a \cdot Q_a + K_L}$$

$$\tau_s = \frac{V \cdot \rho_a \cdot C_a}{U \cdot A_c \cdot (1 + \xi) + \rho_a \cdot C_a \cdot Q_a + K_L}$$

D'altronde i parametri K_a e K_f possono variare in funzione delle condizioni di utilizzo della serra, il parametro τ è funzione anche del grado di ombreggiamento adottato e U varia anch'esso col variare delle velocità dell'aria che lambisce i lati della copertura e di conseguenza il sistema risulta, per buona parte, influenzato da disturbi di tipo parametrico. A differenza di impianti di tipo parametrico.

Figura 3.1



nali bisognerà inoltre considerare un altro parametro costituito dalla temperatura del refluo termico disponibile, che influisce sui livelli termici ottenibili in serra.

A monte dei regolatori, il sistema di controllo delle serre deve effettuare tutte quelle azioni che consentano di ottimizzare, ai fini di un risparmio energetico ed economico, la conduzione dell'impianto e il rispetto degli specifici programmi colturali. Frequentemente utilizzati risultano essere i sottoriportati criteri gestionali e di ottimizzazione.

Riscaldamento diurno

Per alcuni tipi di colture è consigliabile che la temperatura diurna sia tale da consentire la massima attività fotosintetica, la quale richiede condizioni di temperatura più elevate quanto maggiore è l'irraggiamento solare istantaneo (fig. 3.2).

Figura 3.2

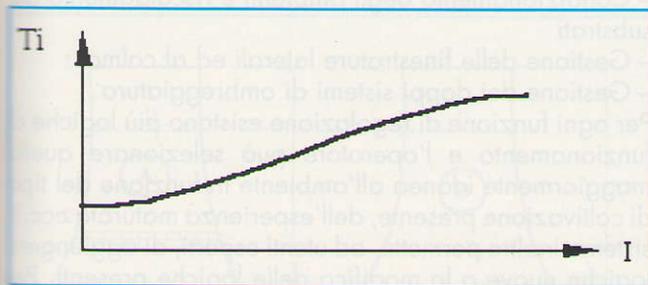


Figura 3.3

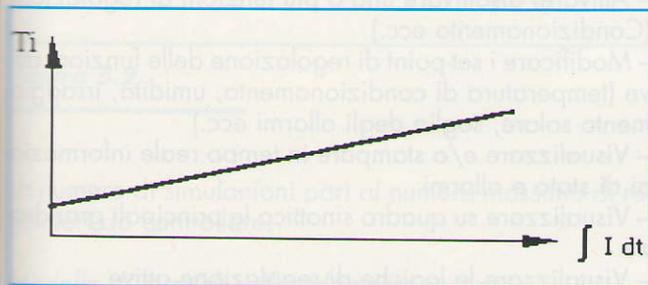
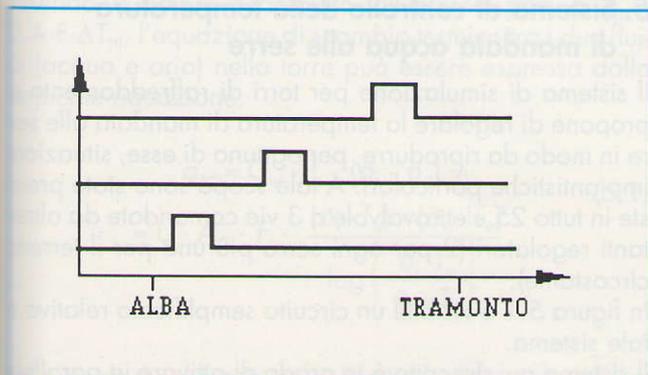


Figura 3.4



Riscaldamento notturno

La temperatura ottimale deve consentire la massima metabolizzazione degli zuccheri prodotti e ciò avviene prefissando una temperatura tanto maggiore quanto maggiore è stata l'energia solare nel suo complesso irraggiata durante il giorno precedente (fig. 3.3).

Ombreggio

Tale regolazione, agendo sui teli ombreggianti esterni evita che l'irraggiamento solare possa superare il valore massimo consentito. Nelle ore più fredde del giorno (alba), l'apertura dei teli deve essere effettuata non troppo velocemente al fine di evitare l'istantaneo miscelamento delle masse d'aria sottostanti con l'aria esterna che causerebbe una repentina diminuzione della temperatura interna della serra.

Illuminazione artificiale

Tale funzione, utilizzata per particolari colture di pregio e in determinati livelli di crescita, viene espletata in modo da soddisfare due diverse esigenze: l'illuminamento notturno attuato ciclicamente (fig. 3.4) e il prolungamento della fase diurna (fig. 3.5).

Irrigazione a goccia

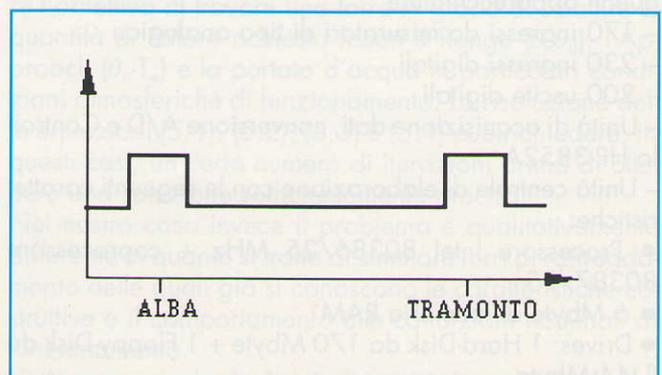
L'irrigazione a goccia viene effettuata attivando l'impianto a intervalli ciclici. Il tempo t_g intercorrente tra un intervallo e l'altro viene calcolato mediante la 3.2 che tiene conto della attività fotosintetica complessiva:

$$t_g = t_{g0} \cdot (1 - \alpha \cdot \int_0^{t_{off}} I \cdot dt) \quad (3.2)$$

Nebulizzazione

Anche la nebulizzazione, come l'irrigazione a goccia, viene effettuata attivando l'impianto a intervalli ciclici. Il tempo t_n intercorrente tra un'attivazione e la successiva viene calcolato adottando la 3.3 che oltre a considerare l'attività fotosintetica complessiva tiene conto in termini integrali dello scarto tra l'umidità relativa istantanea e

Figura 3.5



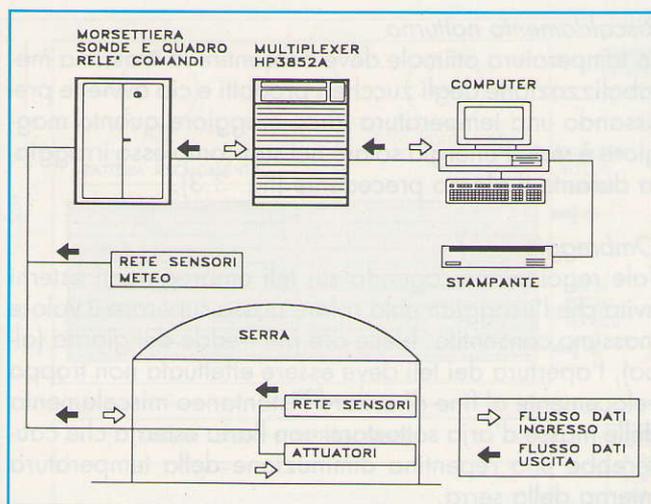


Figura 4.1

quella giudicata ottimale per la particolare coltura considerata:

$$t_n = t_{n0} \cdot \left(1 - \beta \cdot \int_0^{t_{corr}} dt + \gamma \cdot \int_0^{t_{corr}} (U_r - U_{r0}) \cdot dt \right) \quad (3.3)$$

Mediante il processo di nebulizzazione è quindi possibile, almeno entro certi limiti, tenere sotto controllo l'umidità relativa interna.

4. Descrizione generale del sistema di monitoraggio e controllo

Il sistema di monitoraggio e controllo (SADAT) realizzato dall'ENEL-CRTN di Milano, è in grado di acquisire i principali parametri ambientali (temperatura aria e terreno, radiazione solare, umidità relativa, velocità e direzione del vento) ed impiantistici (temperatura e portata refluo, stato di funzionamento delle macchine ecc.). In fig. 4.1 sono visibili i componenti principali del sistema: computer grafico e Data Logger, installati nella palazzina uffici, e verso cui confluiscono dal campo circa 600 punti di I/O.

Il sistema nel suo complesso risulta composto dalle seguenti apparecchiature:

- 170 ingressi da misuratori di tipo analogico
- 230 ingressi digitali
- 200 uscite digitali
- Unità di acquisizione dati, conversione A/D e Controllo HP-3852A
- Unità centrale di elaborazione con le seguenti caratteristiche:
 - Processore Intel 80386/25 MHz + coprocessore 80387/25
 - 6 Mbyte di memoria RAM
 - Drives: 1 Hard-Disk da 170 Mbyte + 1 Floppy-Disk da 1.44 Mbyte

- Porte: 2 seriali RS-232/C + 1 parallela + 1 IEE-488
- Monitor a colori VGA da 14"

Per assicurare maggiore affidabilità alle misure effettuate, i valori delle grandezze vengono ottenuti per campionamento statistico con intervallo di tempo prefissabile. Dalle prove fatte sembra che un valore di 20 secondi possa essere considerato idoneo.

Il numero massimo di canali acquisibili è per ora limitato a 1000.

Come sistema operativo è stato adottato il D.R. Concurrent DOS (MS-DOS compatibile ma multitasking) mentre il software è stato sviluppato in Fortran e C. Per le future implementazioni si prevede la migrazione di tutto il pacchetto sotto MS-Windows 3.1.

Per ciascun ambiente confinato (12 serre, avanserra, locale tecnico) è possibile definire le funzioni di regolazione degli impianti installati per il controllo dei parametri climatici consentendo una gestione completamente automatizzata del sistema. Le funzioni di regolazione implementate nel sistema SADAT sono di 3 tipi:

- Condizionamento degli ambienti e riscaldamento dei substrati

- Gestione delle finestre laterali ed al colmo
- Gestione dei doppi sistemi di ombreggiatura.

Per ogni funzione di regolazione esistono più logiche di funzionamento e l'operatore può selezionare quella maggiormente idonea all'ambiente in funzione del tipo di coltivazione presente, dell'esperienza maturata ecc. Il sistema inoltre permette, ad utenti esperti, di aggiungere logiche nuove o la modifica delle logiche presenti. Per ciascun ambiente confinato, il sistema SADAT, su richiesta dell'operatore, ha la possibilità di:

- Attivare/disattivare una o più funzioni di regolazione (Condizionamento ecc.)
- Modificare i set-point di regolazione delle funzioni attive (temperatura di condizionamento, umidità, irraggiamento solare, soglia degli allarmi ecc.)
- Visualizzare e/o stampare in tempo reale informazioni di stato e allarmi
- Visualizzare su quadro sinottico le principali grandezze
- Visualizzare le logiche di regolazione attive
- Visualizzare grafici e andamenti.

5. Sistema di controllo della temperatura di mandata acqua alle serre

Il sistema di simulazione per torri di raffreddamento si propone di regolare la temperatura di mandata alle serre in modo da riprodurre, per ognuna di esse, situazioni impiantistiche particolari. A tale scopo sono state previste in tutto 25 elettrovalvole a 3 vie comandate da altrettanti regolatori (2 per ogni serra più una per il terreno circostante).

In figura 5.1 è visibile un circuito semplificato relativo a tale sistema.

Il sistema qui descritto è in grado di attivare in parallelo

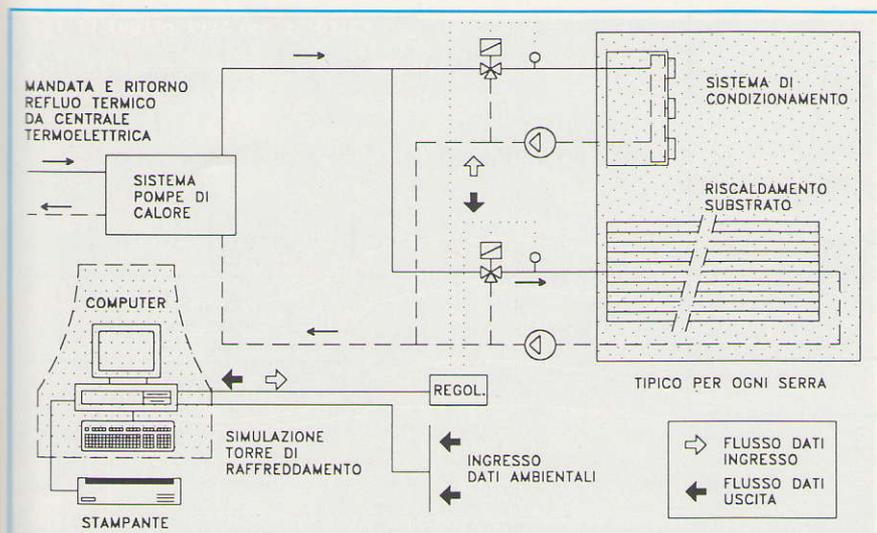


Figura 5.1

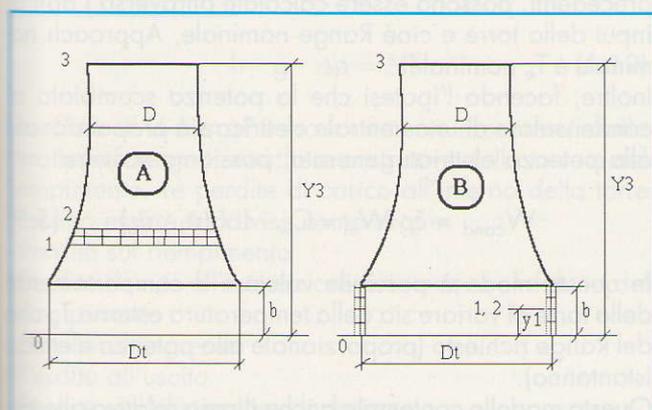


Figura 5.2

un numero di simulazioni pari al numero massimo di regolatori da controllare.

Modello di torre di raffreddamento a secco

In genere, una torre di raffreddamento a secco può essere schematizzata come in figura 5.2 (tipo A o tipo B). Essendo il calore scambiato all'interno pari a $q_{sc} = U \cdot A_c \cdot F \cdot \Delta T_m$, l'equazione di scambio termico tra i due fluidi (acqua e aria) nella torre può essere espressa dalla seguente equazione:

$$q_{sc} = C_w \cdot L \cdot (\vartheta_i - \vartheta_u) = U \cdot A_c \cdot F \cdot \frac{(\vartheta_i - T_u) - (\vartheta_u - T_e)}{\log \left| \frac{\vartheta_i - T_u}{\vartheta_u - T_e} \right|} \quad (5.1)$$

la quale il salto termico dell'aria risulta essere pari a:

$$\alpha = \frac{C_w \cdot L}{C_a \cdot G} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_u) \quad (5.2)$$

Nel caso di torre a tiraggio naturale è possibile determinare la portata d'aria facendo uso della seguente:

$$G = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \alpha \cdot g \cdot \rho_o^2}{T_e [^\circ K]}} \cdot \sqrt[3]{\frac{(Y_3 - Y_1) \cdot A_1^2}{C_d + (A_1/A_3)^2}} \quad (5.3)$$

dove α è data dalla (5.2) e C_d ha la seguente espressione empirica:

$$C_d = \frac{A_a}{A_l} \cdot \left(\frac{A_1}{A_l}\right)^2 \cdot f + \begin{cases} 0.167 \cdot \left(\frac{D_t}{b}\right)^2 & \text{Per torri di tipo A} \\ \sigma \cdot \left(\frac{4 \cdot b}{D_t}\right)^2 & \text{Per torri di tipo B} \end{cases} \quad (5.4)$$

- θ_i, θ_u = Temperature di ingresso e uscita acqua
- T_e = Temperatura dell'aria esterna
- L = Portata dell'acqua
- G = Portata dell'aria
- ρ_o, C_a = Densità e calore specifico dell'aria esterna
- C_w = Calore specifico dell'acqua
- U = Conducibilità totale per m^2 tra acqua e aria
- A_a = Area superficiale dello scambiatore
- A_l = Area trasversale di passaggio per l'aria nello scambiatore
- F, σ = Fattori di correzione ricavabili da tabelle in letteratura; [1] e [3]

$$f = \eta \cdot St = \frac{\eta \cdot h}{\rho \cdot V \cdot C_a} \quad (\text{Fattore di attrito}) \quad (5.5)$$

In fase di progetto si desidera, generalmente, perseguire l'obiettivo di trovare una torre in grado di smaltire la quantità di calore richiesta fissati il Range ($\theta_i - \theta_u$), l'Approach ($\theta_u - T_e$) e la portata d'acqua in particolari condizioni atmosferiche di funzionamento. La risoluzione delle equazioni (5.1), (5.2), (5.3) e (5.4) può richiedere, in questi casi, un certo numero di iterazioni prima di ottenere una soluzione sufficientemente precisa.

Nel nostro caso invece il problema è qualitativamente differente in quanto si tratta di simulare torri di raffreddamento delle quali già si conoscono le caratteristiche costruttive e il comportamento alle condizioni nominali di funzionamento.

L'interesse principale è quindi incentrato sul calcolo del

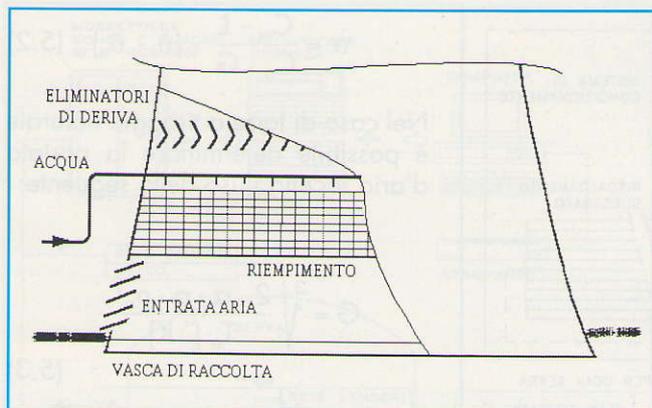


Figura 5.3

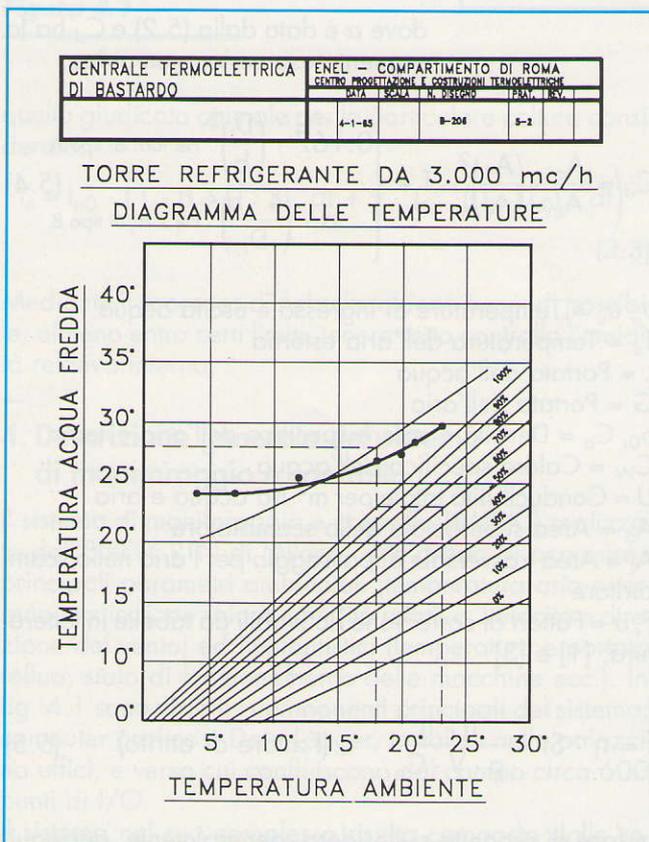


Figura 5.4

comportamento termico al variare delle condizioni al contorno.

Facendo l'ipotesi semplificativa che F e C_d possano essere ritenute costanti e definendo le costanti P_1 e P_2 come segue:

$$P_1 = U \cdot A_a \cdot F \quad (5.6)$$

$$P_2 = \sqrt[3]{2 \cdot g \cdot \frac{(Y_3 - Y_1) \cdot A_1^2}{C_d + (A_1/A_3)^2}} \quad (5.7)$$

dalle equazioni (5.1), (5.2) e (5.3) otteniamo:

$$\vartheta_i - \vartheta_u = \frac{P_1}{C_w \cdot L} \cdot \frac{\left(1 - \frac{C_w \cdot L}{C_a \cdot G}\right) \cdot (\vartheta_i - \vartheta_u)}{\log \frac{\vartheta_i - T_e - \frac{C_w \cdot L}{C_a \cdot G} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_u)}{\vartheta_u - T_e}} \quad (5.8)$$

$$G = P_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{C_w \cdot L}{C_a} \cdot \rho_0^2 \cdot \frac{\vartheta_i - \vartheta_u}{T_e}}$$

Le costanti P_1 e P_2 , una volta esplicitate nelle equazioni precedenti, possono essere calcolate attraverso i dati di input della torre e cioè Range nominale, Approach nominale e T_e nominale.

Inoltre, facendo l'ipotesi che la potenza scambiata al condensatore di una centrale elettrica sia proporzionale alla potenza elettrica generata, possiamo scrivere:

$$W_{cond} = \xi \cdot W_{el} = C_w \cdot L \cdot (\vartheta_i - \vartheta_u) \quad (5.9)$$

In questo modo è possibile valutare il comportamento della torre al variare sia della temperatura esterna T_e che del Range richiesto (proporzionale alla potenza elettrica istantanea).

Questo modello contempla anche il caso relativo alle torri di raffreddamento a ventilazione forzata: in questo caso risulta sempre $G = G_{nominale}$ e, di conseguenza, le equazioni (5.3) e (5.4) non vengono calcolate.

Torre di raffreddamento a umido

Nel caso di torri a umido o evaporative, lo scambio termico avviene principalmente per evaporazione di una parte dell'acqua di raffreddamento (qualche % della portata nominale), in tal modo viene sfruttato l'elevato calore latente di evaporazione (600 kcal/kg) di questo fluido.

In figura 5.3 è visibile la struttura tipica di una torre di raffreddamento a umido.

Le equazioni che governano il comportamento di una torre evaporativa risultano essere, con riferimento al diagramma Temperatura-Entalpia, le seguenti [2]:

$$\frac{U \cdot A}{W \cdot C_a} = C_w \cdot \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \frac{d\vartheta}{I_s - 1} \quad (5.10)$$

$$I = I_1 + \frac{W}{Q} \cdot C_w \cdot (\vartheta - \vartheta_1) \quad (5.11)$$

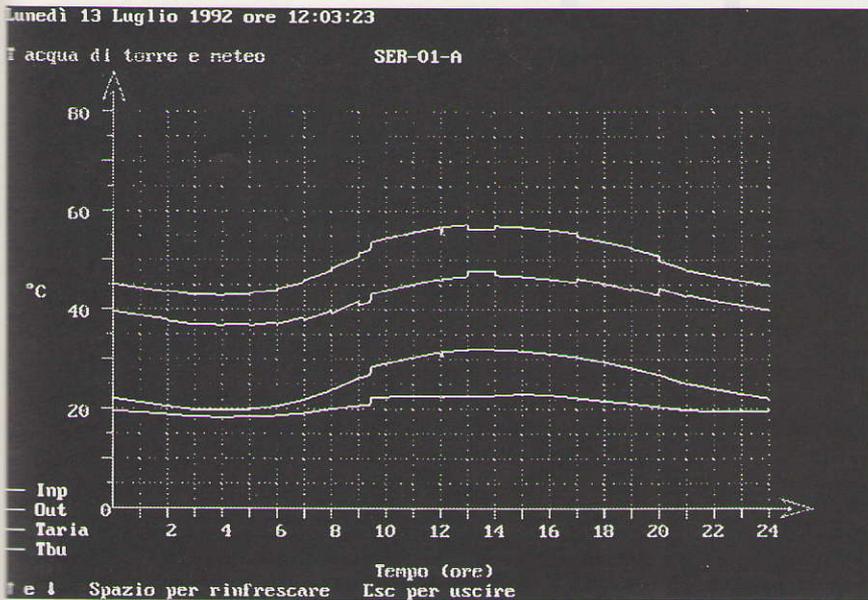


Figura 5.5

$$h \cdot g \cdot \Delta p = \Delta P \quad (5.12)$$

I coefficienti $U \cdot A$ e ΔP sono fortemente dipendenti dalle caratteristiche geometriche e costruttive della torre e del riempimento. Le perdite di carico all'interno della torre possono essere suddivise come segue:

- Perdite sul riempimento
- Perdite dovute all'interazione aria-acqua al di fuori del riempimento
- Perdite all'ingresso
- Perdite all'uscita
- Perdite sull'eliminatore di deriva
- Perdite sugli elementi costruttivi della torre

Per ciò che riguarda il termine $U \cdot A$, rappresentante lo scambio termico, si è visto che quest'ultimo avviene sia nel riempimento, dalle cui caratteristiche costruttive risulta fortemente influenzato sia, in misura minore, al di sotto di esso. Un altro possibile approccio è dato dall'utilizzo di dati sperimentali ricavati dal monitoraggio di impianti esistenti. In questo caso è allora possibile fare uso delle seguenti:

$$\vartheta_u = T_{bu} + \text{Approach}(T_{bu}) \quad (5.13)$$

$$\vartheta_i = \vartheta_u + \text{Range}_{\text{Nom}} \cdot \frac{W_{el}}{W_{el\text{Nom}}} \quad (5.14)$$

La funzione $\text{Approach}(T_{bu})$ dipende, come si è visto, da molti fattori.

In figura 5.4 è riportato un esempio di tale funzione, relativo alla centrale ENEL di Bastardo (PG), per due diverse modalità di utilizzo delle torri evaporative. Tale impianto, infatti, composto da 2 gruppi di 60 MW elettrici ciascuno, dispone di 5 torri a umido, ognuna delle

quali è costituita da 2 sezioni separate con possibilità di esclusione, per ciascuna di esse, del sistema di ventilazione forzata.

Codice di calcolo per simulazione

Il programma per la simulazione di torri di raffreddamento, denominato TOWER, è stato sviluppato da ENEL-CRTN in linguaggio C su PC con sistema operativo DOS. Le principali funzioni svolte dal programma sono le seguenti:

- Gestione del collegamento con il sistema di acquisizione dati e controllo per l'acquisizione in continuo di T_e e U_r rilevate dalla stazione meteo
- Interfaccia operatore a tutto schermo per modifiche, assegnamenti, visualizzazione valori, grafici, messaggi di stato e di errore

- Lancio, a intervalli prefissati e per ogni sperimentazione, dei modelli matematici torri di raffreddamento
- Gestione del collegamento col sistema di controllo delle elettrovalvole a 3 vie per la regolazione della temperatura di mandata dell'acqua alle colture
- Gestione dei messaggi relativi alle variazioni di stato del sistema e alle condizioni di errore eventualmente verificatesi
- Help in linea per tutte le operazioni.

A titolo di esempio in figura 5.5 è riportata una pagina grafica in cui, per una torre a secco, sono tracciate (dal basso verso l'alto) Temperatura di bulbo umido, Temperatura di bulbo secco, Temperatura di uscita torre, Temperatura di ingresso torre.

Bibliografia

- [1] Cavanna E. Folli: Le torri di raffreddamento a secco, CISE 1973.
- [2] Cavanna E. Folli: Le torri di raffreddamento a evaporazione, CISE 1973.
- [3] P. Holman: Heat Transfer, Mc Graw Hill 1989.
- [4] A. Okuya, T. Okuya: The transpiration of greenhouse tomato plants in rockwool culture and its relationship to climatic factors, Acta Horticulturae May 1988.
- [5] Mancini A., Castrignò: Analisi energetica di una serra in ambiente meridionale, C.P. 1984.

Ringraziamenti

Si ringrazia la direzione della centrale di Bastardo (PG) per il materiale prestatoci riguardante le performances delle torri a umido.

F. Groppi, F. Parrini, D. Polenghi, R. Sidri, ENEL - Centro di Ricerca Termica e Nucleare di Milano