

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE ED IL TERRITORIO



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

TESI DI LAUREA  
IN  
GESTIONE DELLE RISORSE ENERGETICHE DEL TERRITORIO

INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO DI UN  
EVAPO-CONDENSATORE PRESSO LO STABILIMENTO

M.B.D.A. Spa ITALIA

RELATORI:

CH.MO PROF. ING. FRANCESCO CALISE

CH.MO PROF. ING. MASSIMO DENTICE D'ACCADIA

CH.MA PROF. ING. ADRIANA GRECO

CANDIDATO

ETTORE MAIORINO

MATR. M67/227

CORRELATORI:

ING. ROBERTO CHIAPPETTA

ING. MARIA VICIDOMINI

## Introduzione

Soddisfare il fabbisogno energetico mondiale attraverso l'utilizzo dei tradizionali combustibili fossili (gas, petrolio, carbone), considerando il loro effetto inquinante sull'atmosfera e la loro scarsa disponibilità nel prossimo futuro, diventa sempre più difficile. Il ricorso alle fonti di energia rinnovabili e l'efficiamento energetico costituiscono un valido strumento per affrontare tali sfide. In particolare il quadro per il clima e l'energia 2030 fissa tre obiettivi principali da conseguire entro l'anno indicato:

- una riduzione almeno del 40% delle emissioni di gas a effetto serra (rispetto ai livelli del 1990)
- una quota almeno del 27 % di energie rinnovabili
- un miglioramento almeno del 27 % dell'efficienza energetica

Tenendo conto di tali elementi, tale lavoro di tesi ha come obiettivo l'efficiamento energetico di un impianto ad evapo-condensazione sito presso lo stabilimento M.B.D.A. di Bacoli (Napoli).

L'M.B.D.A (MatraBAEDynamics Alenia) è una delle aziende leader al mondo per la costruzione di missili e tecnologie per la difesa. E' detenuto congiuntamente da AIRBUS Gruppo (37,5%), BAE Systems (37,5%) e Finmeccanica (25%), e rappresenta l'unico gruppo europeo in grado di progettare e produrre missili e sistemi missilistici per soddisfare l'intera gamma di esigenze attuali e future delle tre forze armate (terra, mare e aria).

## Caso studio: Impianto ad Evapo-condensazione

L'impianto esaminato è localizzato presso l'area galvanica galvanica (figura 1) all'interno della quale si eseguono attività di trattamento superficiale di pezzi e assiemi meccanici di fattura metallica e non metallica. La funzione dell'impianto di concentrazione è quella di concentrare le acque provenienti dalle vasche di lavaggio di tali prodotti, al fine di ridurre i costi di smaltimento (codice CER 161001) soluzioni acquose di scarto contenenti sostanze pericolose 0.35 €/kg). I trattamenti superficiali suddetti sono essenzialmente due, ovvero:

- *trattamenti galvanici dei metalli (linea di cromatizzazione)*, linea costituita da 15 vasche di cui 5 riscaldate, 8 non riscaldate e le restanti in disuso;
- *trattamenti chimici di conversione superficiale*, linea costituita da 31 vasche di cui 12 riscaldate (4 mediante vapore e le restanti con resistenza elettrica) 4 non riscaldate e le restanti in disuso.

Entrambe le linee lavorano 10 ore al giorno dal lunedì al venerdì.

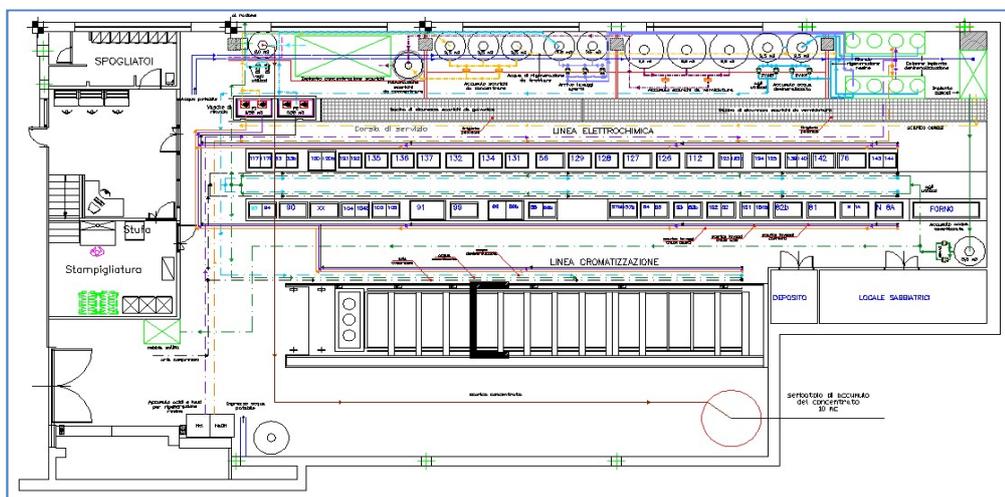


Figura 1 – Planimetria della linea galvanica

L'impianto, oggetto di studio (figura 2), preleva, per depressione, la soluzione da trattare da un serbatoio dedicato. Il liquido, una volta giunto nella camera di ebollizione, viene riscaldato mediante una serpentina attraversata dal gas frigorifero caldo, R407c, del circuito frigorifero dell'impianto.

Il vuoto prodotto nella camera è tale da riuscire a portare all'ebollizione il liquido da evaporare ad una temperatura relativamente bassa, di circa 30 - 35 °C.

Il vapore d'acqua prodotto spostandosi per convezione naturale verso l'alto, giunge nella camera di condensazione dell'impianto (tale zona è denominata camera di condensazione per quanto riguarda la soluzione da trattare ed evaporatore per quanto riguarda il gas frigorifero) dove, mediante l'espansione atmosferica del gas frigorifero attraverso un serpentino dedicato, viene condensato e da qui prelevato e inviato nel serbatoio di accumulo del distillato per essere poi ulteriormente tratto ed infine riutilizzato per usi di stabilimento.

Analogamente, il concentrato viene estratto in automatico, quando si raggiunge una certa densità della soluzione trattata e stoccato in un serbatoio dal volume di 10 m<sup>3</sup> per essere smaltito. In particolare, il grado di addensamento della soluzione per determinarne lo scarico, è monitorato da un densimetro, tarato in maniera tale da far avvenire lo scarico nel momento in cui la soluzione raggiunge una densità di 1,4 mg/l.

L'impianto è, dunque, formato essenzialmente da una sezione di accumulo scarichi da trattare, da una sezione di alimentazione dell'evaporatore, dall'impianto di evaporazione, da una sezione di accumulo del distillato e da una di accumulo del concentrato.

Gli organi principali di tale apparecchiatura sono il circuito del vuoto ed il circuito a pompa di calore, il quale a sua volta è costituito da un compressore, un condensatore primario, un condensatore ventilato, un evaporatore e da una valvola di laminazione.

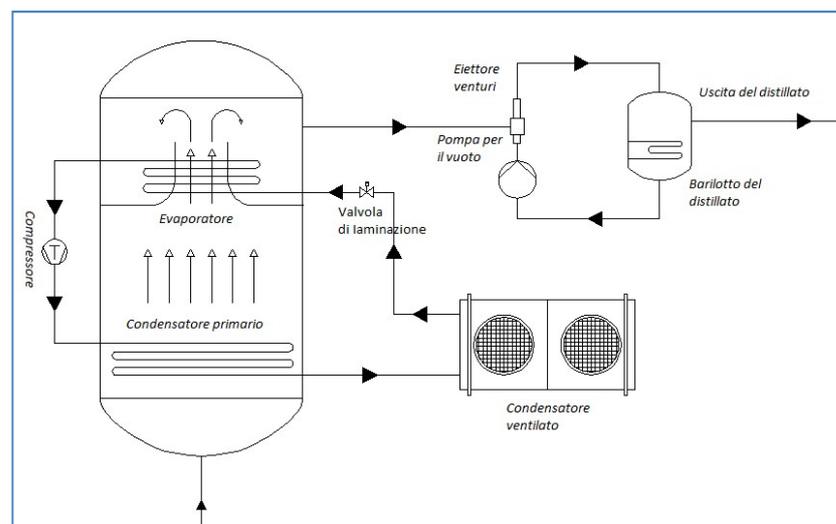


Figura 2 - Circuito a pompa di calore e del vuoto

## Criticità ed obiettivi

L'impianto in questione ha da sempre presentato delle criticità che hanno già portato alla sostituzione della serpentina della camera di ebollizione. Tuttavia, ancora oggi, l'impianto presenta delle anomalie di funzionamento. Difatti, in alcuni transitori, la pressione del gas frigorifero all'ingresso del compressore è eccessivamente bassa con conseguente abbassamento del rendimento energetico e produttivo dell'impianto (figura 3). Si è pensato che tale anomalia si presenti in conseguenza ad una insufficiente produzione di vapore acqueo dalla soluzione da trattare tale da diminuire il calore ceduto al refrigerante nel condensatore. In tal modo il fluido frigorifero non riesce più ad evaporare come dovrebbe e la temperatura e la pressione di ritorno al compressore di quest'ultimo diminuiscono notevolmente.

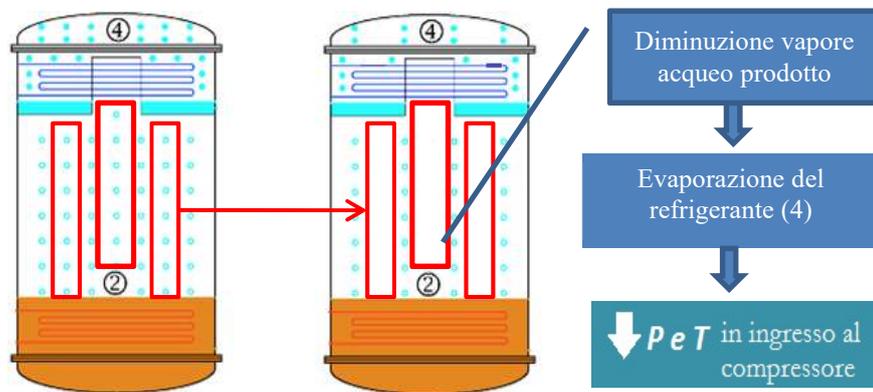


Figura 3 - Criticità impianto ad evapo-concentrazione

L'obiettivo del seguente lavoro di tesi è quello di proporre interventi di efficientamento energetico nell'area galvanica cercando di risolvere il problema precedentemente accennato, essendo attualmente di primaria importanza per l'azienda.

Gli interventi di efficientamento proposti nel seguito e l'analisi dello stato attuale dell'impianto sono finalizzati a fornire un'adeguata conoscenza del profilo di consumo dell'impianto in analisi e individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici. Tali concetti sono alla base dell'audit energetico.

Tale lavoro di tesi è diviso essenzialmente in due parti:

- nella prima parte si procederà alla verifica delle attuali prestazioni energetiche e della resa produttiva dell'impianto (modello di verifica). Inoltre, si proporranno anche delle modifiche dell'attuale configurazione d'impianto volte a minimizzare i consumi energetici (modello di progetto 1) ed a massimizzare la resa produttiva (modello di progetto 2).

Per raggiungere questi obiettivi è stato sviluppato un modello di simulazione in regime stazionario del ciclo di funzionamento dell'impianto in analisi utilizzando il software EES, Engineering Equation Solver.

- nella seconda parte, invece, al fine di abbattere i costi dei consumi energetici, si svilupperanno due scenari che prevedono l'installazione di un impianto fotovoltaico (con e senza sistema di accumulo) atto ad alimentare in prima ipotesi, esclusivamente l'impianto di Evapo-Condensazione e secondariamente l'impianto suddetto e le restanti utenze presenti all'interno dell'Edificio 6.

Il dimensionamento di questo campo fotovoltaico verrà eseguito utilizzando il software TRNSYS.

## Analisi in sito

Nella fase preliminare del presente lavoro di tesi sono state effettuate delle analisi in sito, indispensabili per la costruzione di un modello numerico in regime stazionario che riesca a simulare il funzionamento dell'impianto nelle reali condizioni di esercizio.

In particolare si sono effettuate le seguenti analisi:

- rilevazione del valore di potenza elettrica realmente assorbita dall'impianto attraverso misure non invasive con pinza amperometrica (figura 4)
- rilevazione della portata e della temperatura dell'aria in ingresso ed in uscita dal condensatore ventilato attraverso anemometro a filo caldo
- monitoraggio delle pressioni all'ingresso ed all'uscita del compressore del circuito a pompa di calore dell'impianto attraverso il PLC di controllo.

La rilevazione della potenza elettrica assorbita dall'impianto,  $P_{wcomp;ass}$ , è stata di fondamentale importanza per calcolare la portata di refrigerante in circolo all'interno del circuito a pompa di calore,  $\dot{m}_F$ :

$$m_f = \frac{P_{w_{comp;ass}}}{h_3 - h_2}$$

Infatti, conoscendo l'entalpia posseduta dal fluido refrigerante all'ingresso e all'uscita del compressore ( $h_2$  e  $h_3$ ) e la sua potenza elettrica assorbita è possibile ricavare la portata suddetta. La portata di fluido refrigerante, a sua volta, sarà utile per il calcolo delle potenze termiche nei bilanci di energia.



Figura 4 - Pinza amperometrica utilizzata sulla sinistra - Fasi di alimentazione del compressore sulla destra

Al fine di accertarsi della correttezza del dato sono state effettuate diverse misurazioni, in particolare è stata effettuata una misurazione ogni 30 minuti per un ciclo di lavoro dell'impianto di 4 ore. I risultati delle misurazioni sono visibili nel grafico in figura 5, ove sono mostrati anche gli andamenti delle pressioni all'ingresso e all'uscita del compressore in corrispondenza dei valori di corrente assorbita dalle tre fasi componenti la linea di alimentazione dell'impianto.

Il dato finale di corrente elettrica assorbita di cui si è tenuto conto è di 90 A (I, valore medio ottenuto dalle diverse misurazioni fatte). Si precisa che in corrispondenza di tale valore di corrente si è registrata una pressione in uscita dal compressore di 20 bar ed una in ingresso di 5 bar.

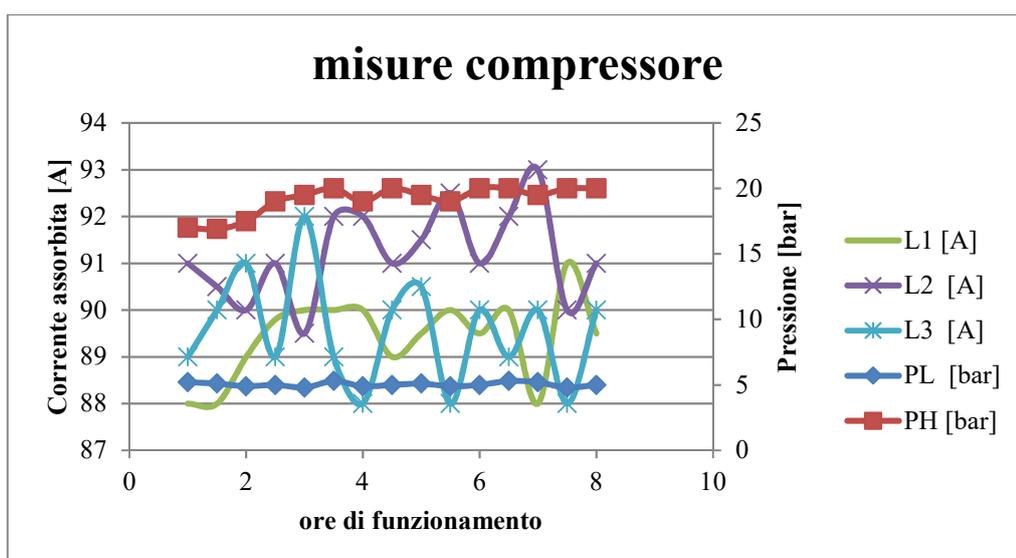


Figura 5 - Corrente assorbita e pressioni all'ingresso ed all'uscita del compressore in funzione delle ore di funzionamento dell'impianto di Evapo-Condensazione

Infine, per calcolare il dato di potenza assorbita (kW), nota la tensione di alimentazione della linea elettrica (400 V), si è tenuto conto di un  $\cos\phi$  (angolo di sfasamento tra la corrente e la tensione in un sistema elettrico in corrente alternata, pari al rapporto tra la potenza reale e quella apparente) pari a 0.85.

La potenza elettrica assorbita da un sistema trifase è data dalla seguente relazione:

$$Potenza\ attiva = \frac{V \cdot I \cdot \cos\phi \cdot \sqrt{3}}{1000} = 53 [kW]$$

La misurazione sperimentale della potenza termica scambiata al condensatore ventilato è stata di primaria importanza per la determinazione della potenza termica scambiata al condensatore primario. Infatti, tale misura ha permesso di determinare l'entalpia posseduta dal fluido in corrispondenza dello stato 5,  $h_5$ , e quindi la potenza termica scambiata al condensatore primario  $Q_{cond1}$ , come è possibile notare della seguente espressione:

$$Q_{cond1} = \dot{m}_f \cdot (h_3 - h_5)$$

dove  $\dot{m}$  ed  $h_3$  risultano noti.

Nello specifico con tali misurazioni di portata e temperatura effettuate al condensatore ventilato è stato possibile calcolare la potenza termica scambiata tra l'aria ed il fluido termovettore in circolo all'interno della serpentina lamellare del condensatore in questione.

Le misurazioni, sono state effettuate in corrispondenza della bocca d'entrata e di uscita del condensatore in diversi punti così da ottenere dei valori mediati sull'intera superficie di ingresso e di uscita del condensatore.

. Tale analisi ha portato ai seguenti risultati:

- $T_{in} = 25.5 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{out} = 29.0 \text{ }^\circ\text{C}$
- $V_{in} = 3.30 \text{ m/s}$
- $V_{out} = 11.0 \text{ m/s}$

inoltre, conoscendo le caratteristiche tecniche del condensatore in questione (KCE 82b2 Luvata):

- Diametro bocca d'uscita aria: 800 mm
- Superficie di ingresso aria (L x l): 1225 x 1242 mm
- Portata aria nominale: 40320 m<sup>3</sup>/h
- Numero di motoventilatori: 2

è stato possibile ricavare la portata di aria media,  $F_{mean}$  e la potenza termica scambiata,  $Q$ :

$$F_{in} = L \cdot l \cdot V_{in} \cdot 2 = 39800 \text{ m}^3/h$$

$$F_{out} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V_{out} \cdot 2 = 36150 \text{ m}^3/h$$

$$F_{mean} = \frac{F_{in} + F_{out}}{2} = 38000 \text{ m}^3/h$$

conoscendo la densità dell'aria si ottiene facilmente la porta massica:

$$\dot{m} = F_{mean} \cdot \rho_{aria} = 12.4 \text{ kg/s}$$

calcolando inoltre, il  $c_p$  dell'aria ad una temperatura media (tra ingresso ed uscita) di 27 °C si ha:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) = 44 \text{ kW}$$

I valori di pressione in questione sono stati fondamentali nel calcolo delle proprietà termodinamiche del fluido nel condensatore primario e nell'evaporatore come è possibile osservare nel capitolo successivo.

I dati in questione sono stati ottenuti facilmente dalla semplice lettura del PLC di controllo dell'impianto di evaporazione. Infatti tale dispositivo offre istante per istante i valori di pressione suddetti ed anche il grado di vuoto presente all'interno della caldaia.

## Analisi in regime stazionario

### - Modello di verifica

In tale analisi si è proceduto al calcolo delle proprietà termodinamiche del fluido refrigerante nel circuito a pompa di calore.

In tale modello stazionario, inoltre, sono state determinate le potenze termiche scambiate nei diversi scambiatori, così da poter verificare le condizioni di funzionamento dell'impianto e proporre interventi che consentano un sensibile miglioramento dell'efficienza energetica e produttiva dell'impianto.

Per poter costruire un modello che ci consenta di verificare le prestazioni reali dell'impianto è necessario ricostruire il ciclo termodinamico del circuito a pompa di calore così da poter determinare in seguito tutte le potenze termiche scambiate nei diversi punti dell'impianto e calcolare nuovamente le aree di scambio degli scambiatori di calore (per poi confrontarle con quelle presenti nell'impianto). Nel seguito è possibile osservare una schematizzazione del modello elaborato su EES:

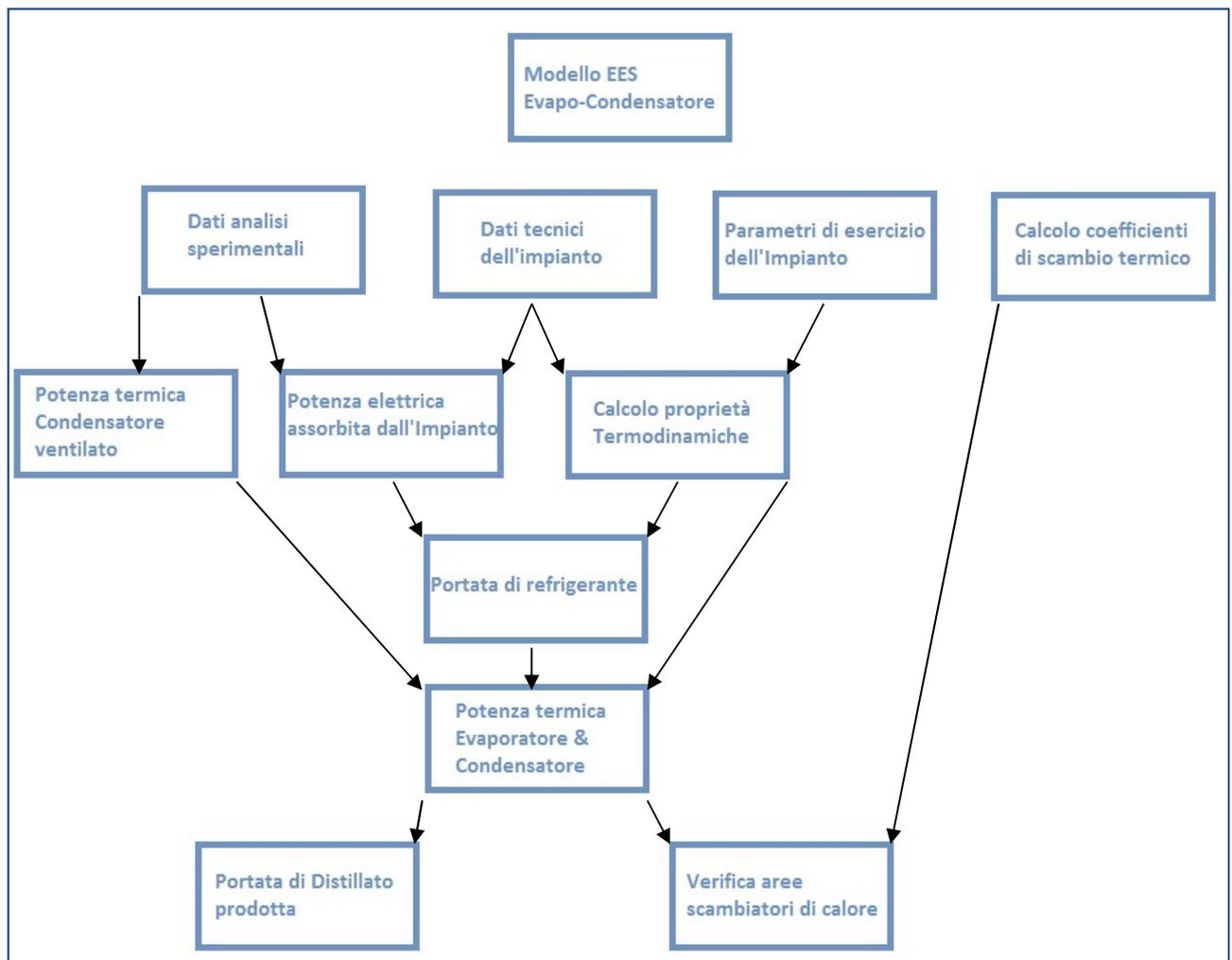


Figura 6 - Flow chart modello in regime stazionario in EES

A partire dai dati di input e dai dati ricavati dalle misure sperimentali utilizzando delle funzioni implementate all'interno della libreria del software EES è stato possibile ricavare le proprietà termodinamiche del fluido in ogni punto del ciclo termodinamico del circuito a pompa di calore.

Infine, utilizzando i dati precedentemente ottenuti si ricavano le potenze termiche scambiate al condensatore (serpentina inferiore) ed all'evaporatore (serpentina superiore) utilizzando il seguente bilancio energetico:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot \Delta h$$

Nello specifico, la potenza termica scambiata all'evaporatore, rappresentata dall'energia termica ceduta dal vapore d'acqua al liquido refrigerante, è data dalla somma di due aliquote:

$$Q_{eva,tot} = Q_{eva} + Q_{surr}$$

$$Q_{eva} = \dot{m}_f \cdot (h_1 - h_8) Q_{surr} = \dot{m}_f \cdot (h_2 - h_1)$$

mentre la potenza termica scambiata al condensatore, costituita dall'energia termica ceduta dal refrigerante alla soluzione da concentrare, è data dalla seguente relazione:

$$Q_{cond1} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_5)$$

I valori delle potenze termiche ottenuti risultano essere indispensabili per il calcolo delle aree di scambio termico necessarie per trasmettere tali potenze.

Per il dimensionamento degli scambiatori di calore, dato che la differenza di temperatura tra i due fluidi, caldo e freddo, varia lungo lo scambiatore di calore, è opportuno utilizzare, come già detto in precedenza, un  $\Delta T$  medio logaritmico cosicché la potenza scambiata sia pari a:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

Come appare evidente dalla precedente relazione per il calcolo dell'area di scambio termico, nota la potenza termica, è necessario conoscere anche il coefficiente di scambio termico globale [W/m<sup>2</sup>K]. Tali coefficienti sono stati ricavati sia al condensatore che all'evaporatore con specifiche correlazioni empiriche.

### Risultati modello di verifica

Le proprietà termodinamiche ricavate e riportate in tabella 1 hanno permesso di ricostruire il ciclo termodinamico rappresentativo delle reali condizioni di funzionamento del circuito a pompa di calore dell'impianto in esame. Tale ciclo è riportato nel piano T-s in figura 7.

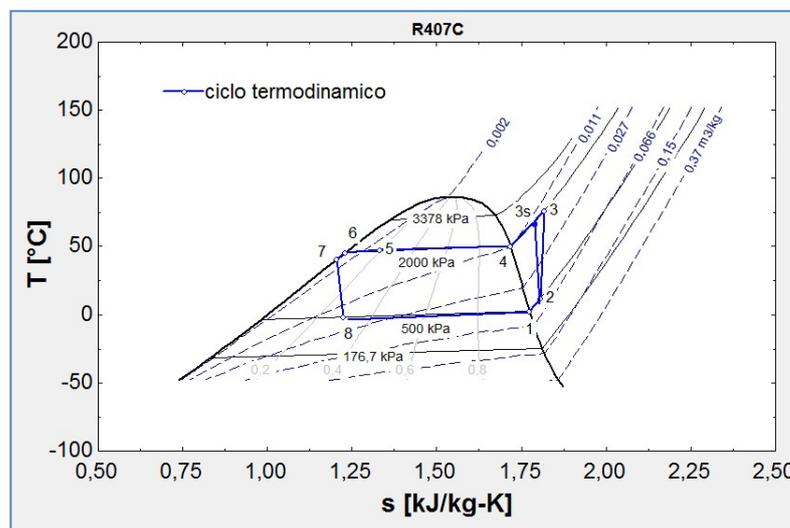


Figura *Errore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato.* - Diagramma temperatura-entropia ottenuto tramite EES

Inoltre, dai dati precedentemente ricavati è stato possibile determinare che  $Q_{eva,tot}$  è pari a 213.9 kW mentre  $Q_{cond,1}$  è pari a 211.4 kW.

Infine, dalle analisi fatte è risultato che il valore di  $A_{cond1,c}$  di 21.6 m<sup>2</sup> è congruo con l'area dello scambiatore installato all'interno della caldaia dell'impianto, che è invece pari a 20.9 m<sup>2</sup>, e che anche l'area di scambio dell'evaporatore è correttamente dimensionata. Infatti, dai calcoli si ottiene che l'evaporatore dovrebbe avere una superficie pari a 2.06 m<sup>2</sup>, mentre l'area di scambio realmente installata è di 1.70 m<sup>2</sup>.

[i] Stato termodinamico	h[i] [kJ/kg]	P[i] [kPa]	s[i] [kJ/kg K]	T[i] [°C]	v[i] [m <sup>3</sup> /kg]	x[i]
[1]	410.6	500	1.77	2.38	0.047	1
[2]	420.1	500	1.81	12.38	0.050	
[3]	459.4	2000	1.82	76.26	0.013	
[3s]	455.8	2000	1.81	73.16	0.013	
[4]	426.1	2000	1.72	50.30	0.011	1
[5]	301.9	2000	1.33	47.30	0.003	0.19
[6]	265.5	2000	1.23	45.60	0.00096	0
[7]	261.2	2000	1.20	40.60	0.00094	
[8]	261.2	500	1.23	-1.93	0.015	0.30

Tabella - 1- Tabella riassuntiva proprietà termodinamiche

### - Modello di progetto 1

Nel primo modello di progetto, si propone un innalzamento della pressione del fluido refrigerante in circolo nell'evaporatore ( $P_1$ ) del sistema a pompa di calore da 500 a 800 kPa. Tale intervento ha lo scopo di ridurre notevolmente i consumi energetici ed economici associati al funzionamento dell'impianto in questione. Con un innalzamento della pressione  $P_1$  il ciclo termodinamico si restringe ed il lavoro svolto dal compressore si abbassa. Tuttavia, se si vuole mantenere pressoché inalterata la potenza termica che il liquido refrigerante riesce ad assorbire dal vapore acqueo in condensazione, è necessario sostituire la serpentina di evaporazione con una di superficie maggiore, pari a circa 4 m<sup>2</sup>.

### Risultati modello di progetto 1

Dalle analisi effettuate risulta che operando tali modifiche il COP del sistema aumenta da 3.2 a 5 ed anche il rendimento isoentropico di compressione si innalza leggermente (figura 8)

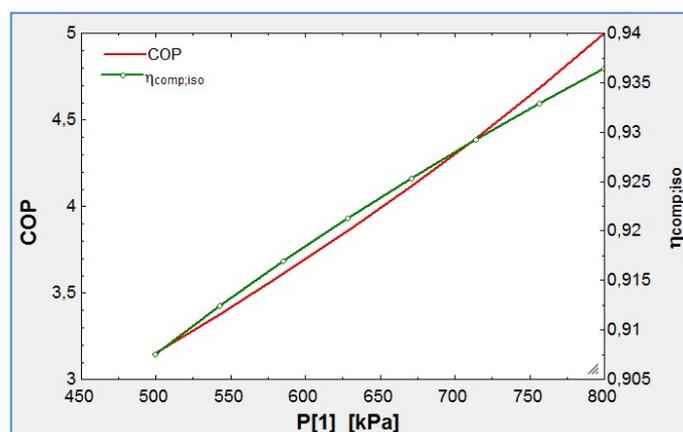


Figura 8 - COP e rendimento isoentropico di compressione al varia di  $P_1$

Il grafico in figura 9 (a sinistra) mostra che il costo dell'investimento aumenta linearmente all'aumentare dell'area (in verde), mentre il guadagno percepito annuo ha un andamento esponenziale (in blu) ed arriva a più di 4000€ all'anno.

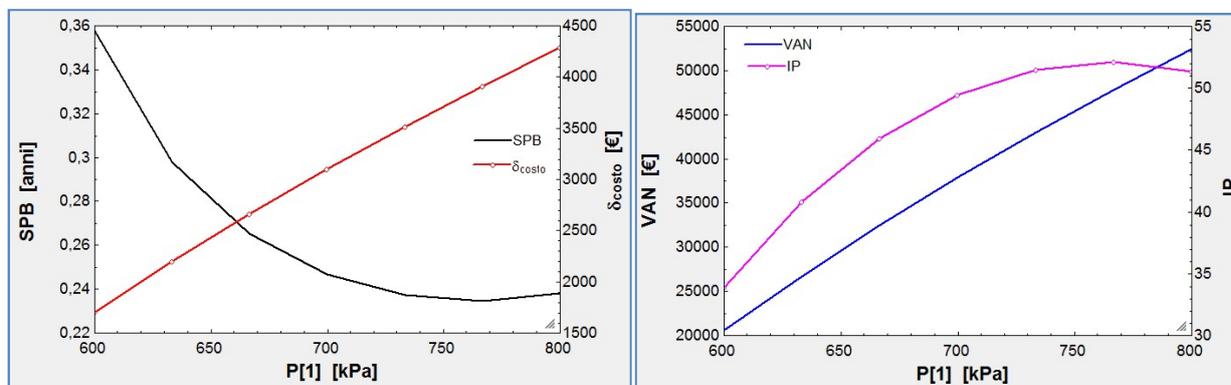


Figura **Errore**. Nel documento non esiste testo dello stile specificato. - Tempo di ritorno dell'investimento e guadagno annuo, rispettivamente SPB e  $\delta_{\text{costo}}$ , al variare di  $P_1$  (a sinistra). Guadagno finale e indice di profitto, rispettivamente VAN e IP, al variare di  $P_1$  (a destra).

Al contempo, dal grafico in figura 9 (a destra), si evince che l'investimento ha un tempo di ritorno, SPB (Simple PayBack) molto basso, che va dai 4-5 mesi fino a 3 (con  $P_1 = 800$  kPa) mesi a seconda del livello di pressione del gas stabilito all'ingresso del compressore.

Inoltre, supponendo una vita utile dell'investimento di circa 20 anni ed un tasso di attualizzazione di 0.05 si potrà ottenere un guadagno, al termine di tale vita utile, di 52000 € e quindi un indice di profitto pari a 51.

## - Modello di progetto 2

L'obiettivo alla base della formulazione del secondo modello è quello di aumentare la produzione di distillato dell'evaporatore a concentrazione sottovuoto in esame. In questo scenario, si vede come la portata di distillato aumenti all'aumentare della potenza termica scambiata nel condensatore a parità di area di scambio e di differenza di temperatura tra il fluido caldo e quello freddo. L'incremento della portata di distillato,  $\dot{F}_{VP}$ , nel rispetto delle precedenti ipotesi, può avvenire esclusivamente aumentando il coefficiente di scambio termico nel condensatore.

## Risultati modello di progetto 2

Utilizzando una serpentina costituita da una tubazione avente diametro minore rispetto a quello della serpentina attualmente presente (3.5 cm), lo scambio termico è notevolmente favorito, infatti, passando da un diametro di 3.5 cm ad uno di 1 cm, si ha che il coefficiente di scambio termico aumenta da 400 a 1300 W/m<sup>2</sup> K. L'aumento di  $U$  comporta un notevole aumento della potenza termica ceduta alla soluzione da concentrare, che, difatti, passa da un valore di circa 200 kW ad uno di 700 kW, con una variazione del diametro da 3.5 cm ad 1 cm.

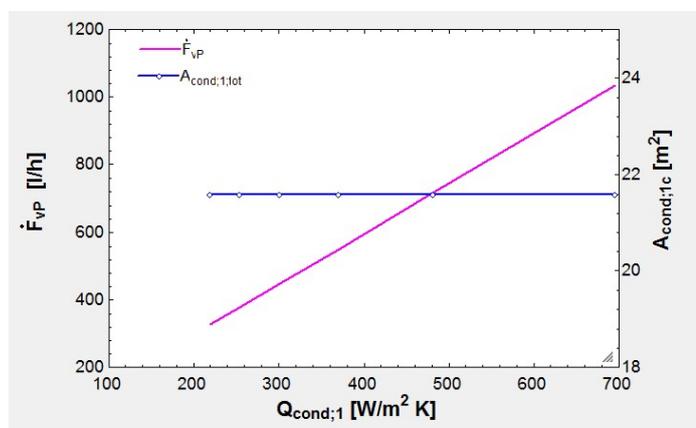


Figura - 10 - Distillato prodotto all'aumentare della potenza termica mantenendo l'area di scambio costante

Il grafico mette in evidenza che, in corrispondenza di tale aumento di  $Q_{\text{cond},1}$ , si ha un notevole incremento della produzione di distillato, che può arrivare sino a circa 1000 l/h (figura 10).

## Modello in regime dinamico

Nella seconda parte di tale lavoro di tesi, al fine di abbattere i costi dei consumi energetici, si propone di installare un impianto fotovoltaico atto ad alimentare in prima ipotesi, esclusivamente l'impianto di Evapo-Condensazione (utilizzando anche un sistema di accumulo elettrico) e secondariamente l'impianto suddetto e le restanti utenze presenti all'interno dell'edificio 6.

Il dimensionamento di questo campo fotovoltaico verrà eseguito utilizzando il software TRNSYS.

TRNSYS (Transient System Simulation Program) è un software di simulazione completo ed estensibile pensato per l'analisi e la simulazione delle prestazioni transitorie di sistemi energetici il cui comportamento sia variabile nel tempo. Esso, dunque, consente di effettuare simulazione in dinamico utilizzando dei parametri di input e modelli matematici già implementati all'interno della libreria del programma.

I modelli creati sono costituiti dai seguenti componenti (figura 11):

- Un type che legge i dati meteo da un file di input e li invia al pannello fotovoltaico;
- Un type che modella le performance elettriche di un campo fotovoltaico;
- Un sistema di accumulo elettrico costituito da batteria una batteria al piombo acido;
- Un inverter che funge anche da sistema di controllo avente il compito di eseguire diversi check, sullo stato di carica della batteria (nel caso in cui essa sia presente), sulla potenza, sulla corrente e sulla tensione inviate all'utenza;
- Un type che legge come input la richiesta di energia da parte dell'utenza;

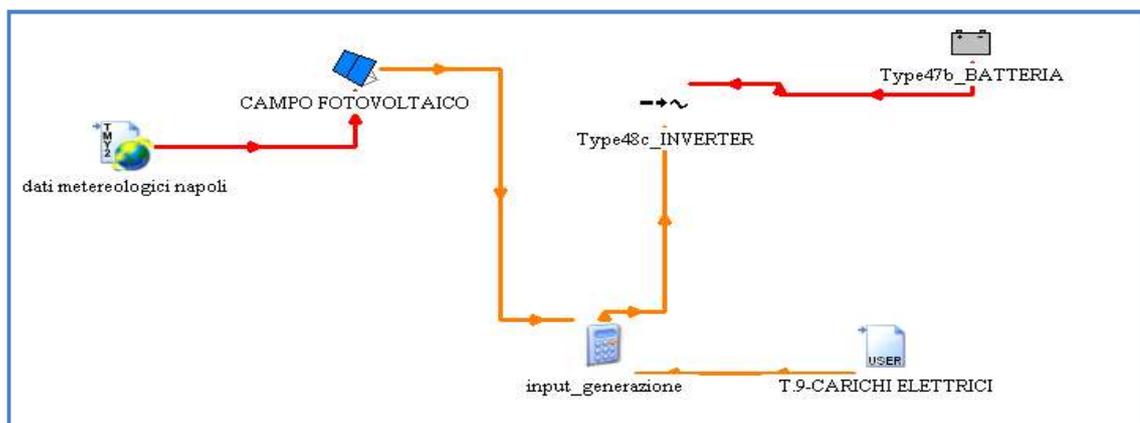


Figura 11 - Componenti utilizzati nel modello di simulazione dinamica in TRNSYS

Il campo fotovoltaico è costituito da moduli con potenza di picco nominale pari a 260 W e superficie di 1,609 m<sup>2</sup>. Ogni modulo è composto da 60 celle poste in serie. Il numero di moduli posti in serie, per determinare una tensione di 24V, è pari ad uno; tale scelta progettuale è dettata dallo scenario in cui è presente il sistema di accumulo, dove, per l'appunto le batterie (che presentano la stessa tensione di 24 V) sono alimentate dal campo fotovoltaico. Il numero di moduli posti in parallelo varia in relazione all'utenza, in quanto esso determina la potenza raggiunta dal fotovoltaico. L'inclinazione dei moduli è di 30° gradi con esposizione a sud-est. La vita utile dell'impianto fotovoltaico è di 20 anni. Il costo dell'impianto è stato valutato attraverso un costo specifico su unità di potenza pari a 1000€/kW, il costo annuo di manutenzione è pari all'2% dell'investimento totale.

### - Descrizione dei principali componenti utilizzati

Nel seguito sono riepilogate le caratteristiche dei principali componenti:

- Type 94: campo fotovoltaico

Questo componente del TRNSYS modella le performance elettriche di un campo fotovoltaico. Esso può essere usato in simulazioni che includono sistemi di accumulo elettrico con batterie, accoppiamento diretto al carico, e in connessioni alla rete elettrica. Esso, in tale caso specifico, avendo scelto di utilizzare dei moduli policristallini, impiega le equazioni per un modello di circuito equivalente empirico a quattro parametri per

prevedere le caratteristiche tensione corrente di un singolo modulo. Questo circuito è costituito da una sorgente di corrente continua, un diodo, e uno o due resistenze (figura 12).

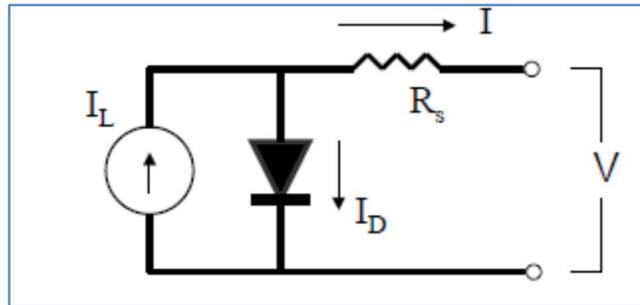


Figura 12 - Circuito equivalente a 4 parametri

I parametri utilizzati per tale componente sono riepilogati nella tabella 2. Il numero di celle non è esplicitato direttamente nei parametri del type ma è inserito nelle “control card” per poter far variare la dimensione del fotovoltaico durante le analisi parametriche.

	Nome	Valore	Unità di misura
1	Corrente di corto circuito del modulo alle condizioni di riferimento	8.94	A
2	Tensione di circuito aperto del modulo alle condizioni di riferimento	37.3	V
3	Temperatura di riferimento	298	K
4	Irradiazione di riferimento	1000	W/m <sup>2</sup>
5	Tensione del modulo alla massima potenza e alle condizioni di riferimento	30.1	V
6	Corrente del modulo alla massima potenza e alle condizioni di riferimento	8.64	A
7	Coefficiente di temperatura dell'ISC alle condizioni di riferimento	0.0004	
8	Coefficiente di temperatura dell'VOC alle condizioni di riferimento	-0.003	
9	Numero di celle cablate in serie	60	
10	Numero di moduli in serie	Smodule	
11	Numero di moduli in parallelo	Pmodule	
12	Temperatura del modulo all'NOCT	319	
13	Tempera ambiente all'NOCT	293	
14	Irradiazione all'NOCT	800	W/m <sup>2</sup>
15	Area del modulo	1.609	m <sup>2</sup>
16	Prodotto $\tau - \alpha$	0.95	
17	Energia di gap del semiconduttore	1.12	
18	Pendenza della curva del quarto quadrante all'ISC	0	
19	Resistenza dei moduli in serie	-1	

Tabella 2 - parametri utilizzati nel type 94-campo fotovoltaico

- Type 47: sistema di accumulo elettrico a batterie:

Questo modello rappresenta un sistema di accumulo a batterie piombo-acido che opera in combinazione con un campo fotovoltaico e componenti di regolazione di potenza. Esso specifica come lo stato di carica della batteria varia nel tempo, generando negli output il tasso di scarica/carica. Le equazioni utilizzate in questa applicazione sono quelle di Shepherd.

Il Type 47 prevede un unico parametro in input alla batteria: la potenza in ingresso o in uscita dalla batteria. I restanti parametri preimpostati nel type sono indicati nella tabella 4 (il numero di celle in parallelo è impostato nella control card).

	Nome	Valore	Unità di misura
1	Modalità di funzionamento	2	
2	Capacità della cella	16.7	Ah
3	Celle in parallelo	N_celle	
4	Celle in serie	24	
5	Efficienza di carico	0.9	
6	Corrente di carica massima di ogni cella	3.33	A
7	Corrente di scarica massima di ogni cella	-3.33	
8	Tensione di carica massima di ogni cella	2.5	V

Tabella 4 - parametri utilizzati nel type 47 - sistema di accumulo elettrico a batterie

- Type 48: Regolatori e inverter

Molto spesso in un impianto fotovoltaico c'è la necessità di 2 dispositivi, il primo il sistema di regolazione che distribuisce energia elettrica prodotta dal fotovoltaico dalla cella alla batteria (o più in generale al sistema di accumulo dell'energia elettrica), ed un secondo componente che è rappresentato da un inverter, il quale converte l'energia elettrica continua (DC) in energia elettrica alternata (AC) per poi inviarla all'utenza. Il modello Type 48 funge sia da regolatore che da inverter.

I parametri utilizzati per tale componente sono riepilogati nella tabella 3. Si precisa che la potenza massima erogabile dall'inverter è specificata nella control card.

	Nome	Valore	Unità di misura
1	Modalità di funzionamento	2	
2	Efficienza di regolazione	0.95	Ah
3	Efficienza dell'inverter	0.96	
4	Rapporto di carica massimo	0.9	
5	Rapporto di carica minimo	0.4	
6	Potenza di picco in uscita	Pot picco	kW

Tabella 3 - parametri utilizzati nel type 48 - regolatore-inverter

### - Scenario senza sistema di accumulo elettrico

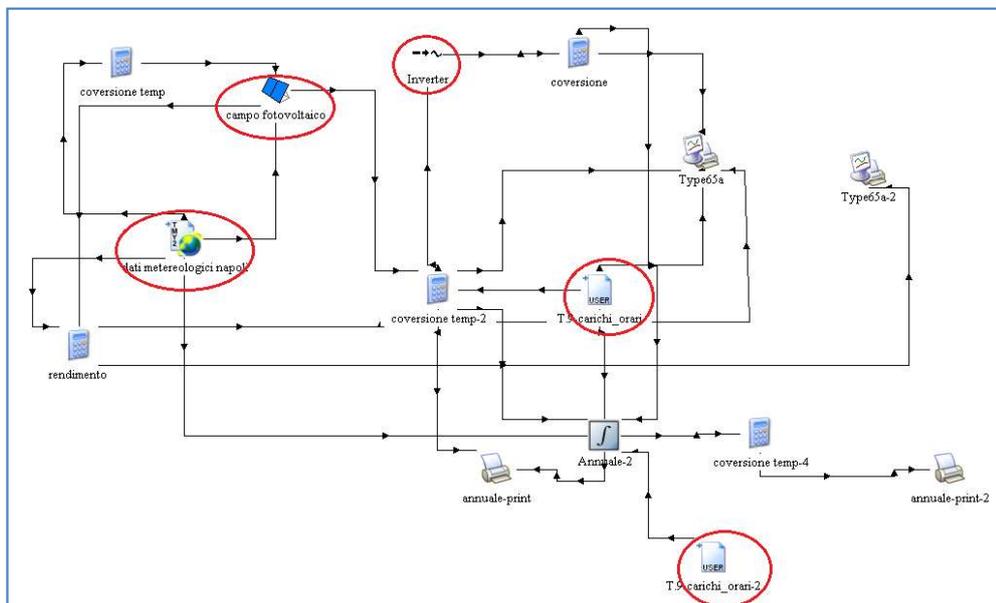


Figura 13 - Layout del modello d'impianto senza batteria

In questo scenario (figura 13), come anche nel successivo, è stato ipotizzato il funzionamento dell'impianto ad evaporazione per 4 ore al giorno, dalle 10 alle 14, per ogni giorno della settimana. Questa scelta è stata dettata dalla circostanza che l'energia prodotta dal campo fotovoltaico è massima in questo lasso temporale: la potenza generata in queste ore, difatti, sarà quella massima. In questo modo, tale utenza è resa quanto più indipendente

possibile dalla rete. Inoltre, con un funzionamento dell'impianto di concentrazione per 4 ore al giorno, si riescono a trattare completamente tutti gli scarichi prodotti nell'arco di una settimana.

Tutta l'energia in eccesso prodotta, sia nelle ore di funzionamento dell'evaporatore che nelle restanti, sarà disponibile per le altre utenze presenti nell'Edificio 6.

Dalle analisi svolte risulta che l'installazione di un campo fotovoltaico, costituito da un numero di pannelli inferiore a 200 comporta un ritorno economico dell'investimento, SPB, dopo almeno 10 anni ed un guadagno alla fine della vita utile dell'investimento, VAN, di appena 3500 €, con un conseguente indice di profitto, IP molto basso (figura 12).

Allo stesso tempo, aumentando il numero di pannelli da 200 a 350, si riscontra una repentina riduzione del SPB fino ad un minimo di 7 anni ed un VAN di ca. 84000 €, con un indice di profitto finale di 0.78 ipotizzando un consumo totale dell'energia prodotta (figura 14).

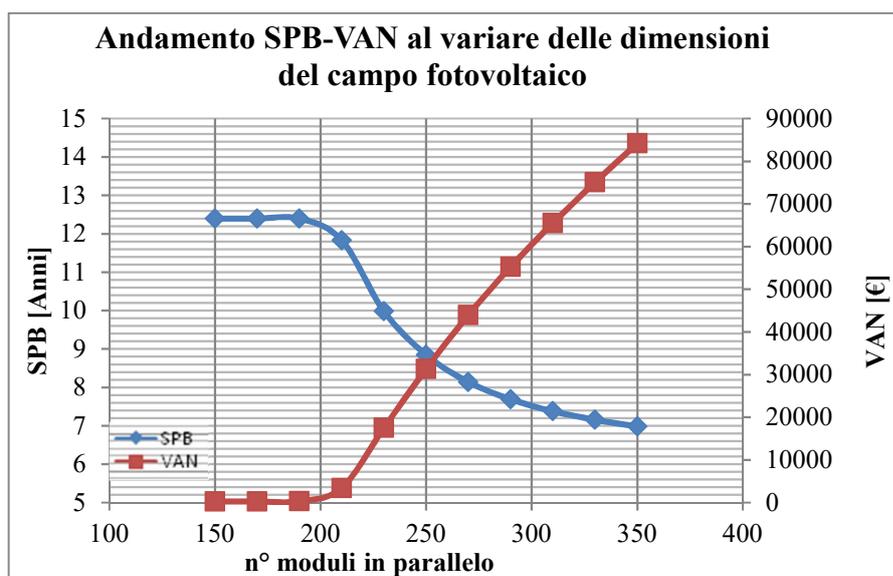


Figura - 14 - Ritorno economico dell'investimento e guadagno utile al variare della dimensione del campo fotovoltaico

Si decide, in conclusione, di installare un numero di pannelli pari a 350 verificando, nelle analisi successive, l'effettivo consumo dell'energia in eccesso prodotta dal campo fotovoltaico da parte delle altre utenze presenti all'interno dell'Edificio 6.

Successivamente, avendo calcolato che l'effettivo consumo di tutta l'energia fotovoltaica prodotta ammonta al 96 % di quella complessiva, si può concludere che installando un campo fotovoltaico, costituito da 350 moduli con potenza di picco pari a 87 kW, si avrà un SPB di circa 7 anni, un guadagno alla fine della vita utile dell'investimento di circa 76000 €, con un indice di profitto pari a 0,69 e con un guadagno annuo di 14.500€.

### - Scenario con batteria

In tale scenario (figura 15), tutta l'energia prodotta dall'impianto solare fotovoltaico è destinata all'alimentazione dell'impianto ad evaporazione e per tale motivo si rende necessaria la presenza di un sistema di accumulo con batterie, avente una capacità pari al doppio della potenza di picco erogabile dal campo fotovoltaico associato. L'analisi economica e dimensionale, fatta nel precedente modello, perde totalmente di significato in questo nuovo scenario; difatti, con un campo fotovoltaico costituito da 350 pannelli, pur avendo un sistema di accumulo proporzionale, non si riuscirà ad avere un buon rendimento economico dell'investimento.

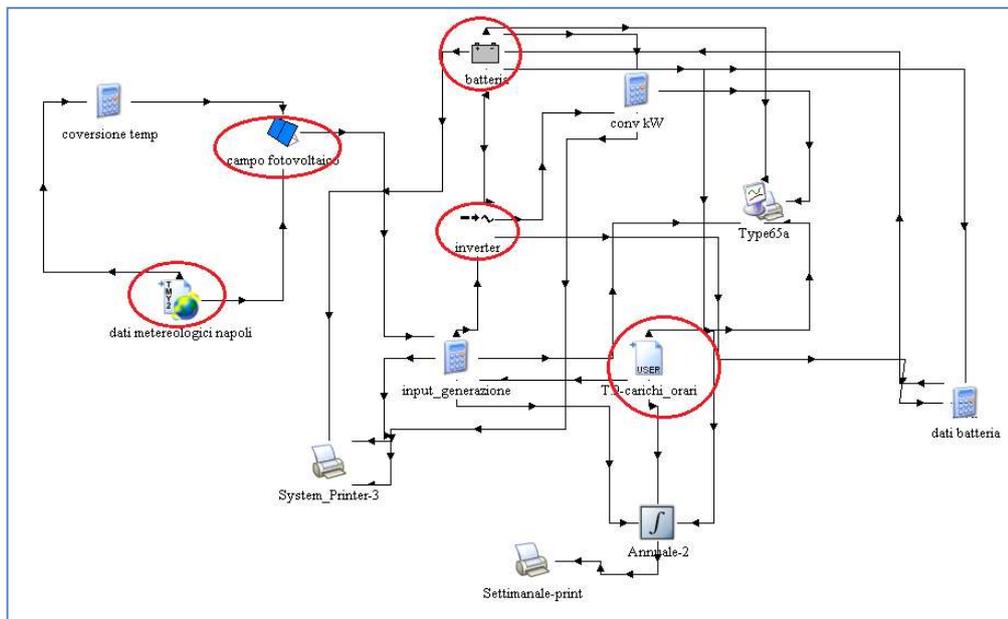


Figura 15 Layout del modello d'impianto con batteria

Dalle analisi è emerso che lo scenario con sistema di accumulo è maggiormente conveniente.

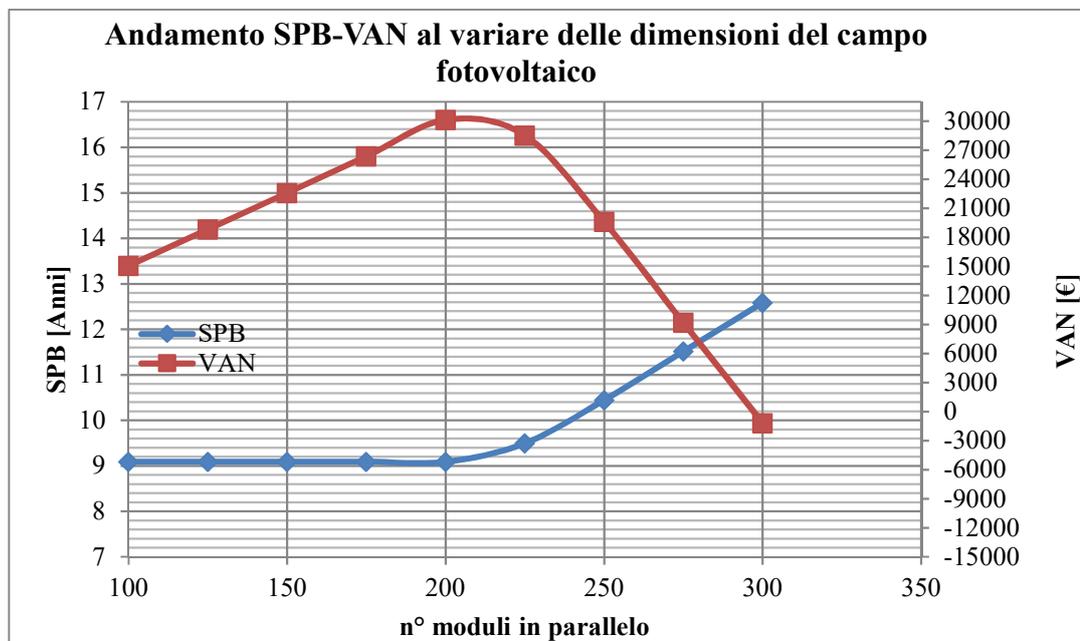


Figura 16 - SPB e VAN in funzione del numero di pannelli fotovoltaici disposti in parallelo, batteria con capacità paria al doppio della potenza di picco del campo solare

Dall'analisi è emerso che il numero di pannelli, per il quale si ha un'inversione di tendenza dei due indici economici, è pari a 200 (figura 16). In particolare, in corrispondenza di questo punto, si ha un ritorno dell'investimento in 9 anni ed un guadagno monetario al termine della vita tecnica del campo solare maggiore di 30.000 €.

Per quanto riguarda l'indice di profitto, rilevabile dal precedente grafico, esso ha un andamento costante fin quando il numero di pannelli installati è inferiore a 200 ed assume un valore massimo pari a 0,37.