



## Introduzione

Soddisfare il fabbisogno energetico mondiale attraverso l'utilizzo dei tradizionali combustibili fossili (gas, petrolio, carbone) diventa sempre più difficile, considerando il loro effetto inquinante sull'atmosfera e la loro scarsa disponibilità nel prossimo futuro. La sfida di tutti i paesi del mondo è creare condizioni per un sistema energetico più sicuro, più efficiente, a più basso contenuto di carbonio derivante dalle fonti fossili, con la conseguente riduzione delle emissioni, senza rallentare lo sviluppo economico e sociale e indirizzando il sistema energetico mondiale verso un percorso più sostenibile. Per questo motivo bisogna porre attenzione al corretto utilizzo dell'energia, cercando di ottimizzare dal punto di vista energetico ogni singola attività svolta dall'essere umano. Questo è stato il punto di partenza del seguente lavoro di tesi, con il quale sono stati studiati e modellati diversi layout di impianto mirati all'efficientamento energetico del sistema edificio-impianto. MBDA (Matra BAE Dynamics 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).

L'edificio esaminato è l'area galvanica (Figura 1) dello stabilimento MBDA di Bacoli (Napoli), tale area è dotata di un impianto di riscaldamento caratterizzato da 9 aerotermi (SABIANA), il cui vettore caldo è il vapore prodotto dal cogeneratore generale di sito. Ogni singolo aerotermo è caratterizzato da una potenza installata di 11,9 kW per un totale di circa 107 kW. Nello specifico il fluido termovettore, oltre ad alimentare gli attuali aerotermi, è utilizzato per il riscaldamento delle vasche di trattamento, ivi presenti. Tali vasche eseguono un'attività di trattamento superficiale di pezzi e assiemi meccanici di fattura metallica e non metallica. I processi applicati sono:

- *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, in più tale area è provvista di un impianto di illuminazione e 2-3 operai che vi lavorano dalle 07:00 alle 17:00 dal lunedì al venerdì.

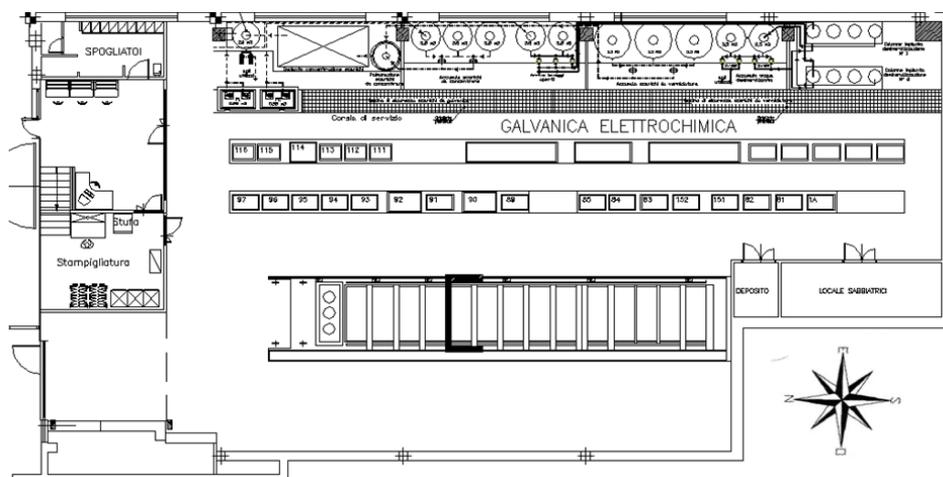


Figura 1 – Planimetria della linea galvanica

Il locale galvanica presenta da sempre delle criticità riepilogate nel seguito, che hanno indotto a intraprendere lo studio presentato nella tesi:

- utilizzo di fluidi termo vettori, quali acqua calda e vapore non di pertinenza diretta MBDA;
- elevati consumi di energia termica dovuti al riscaldamento dell'ambiente e al ricambio d'aria;

Al fine di risolvere le precedenti criticità e ottenere un risparmio sia energetico che economico, rispetto all'attuale impianto termico, nell'ambito della tesi sono stati ipotizzati degli interventi di efficientamento energetico, per i quali sono stati sviluppati e poi applicati dei modelli di simulazione dinamica in ambiente TRNSYS.

## Analisi in sito

Lo studio svolto si è basato sull'attuale normativa riguardante "l'audit energetico", D.Lgs 102/2014, ed è stato caratterizzato da una fase preliminare in cui sono state effettuate delle analisi in sito. Ciò è stato fatto al fine di ottenere con maggior precisione i risultati riguardanti la prestazione energetica del sistema edificio-impianto. In particolare si sono effettuate le seguenti analisi:

- 1) *analisi dell'involucro*, determinando la stratigrafia delle strutture opache e trasparenti presenti in loco;
- 2) *analisi dell'impianto di aspirazione*, determinando, con l'utilizzo di anemometro a filo caldo, la portata totale di aspirazione delle vasche;
- 3) *stima delle temperature di superficie*, mediante l'utilizzo di termocamera, per l'individuazione di eventuali punti critici per la dispersione termica e dei ponti termici e per ogni altra criticità rilevabile (infiltrazioni di acqua, condensa superficiale, ecc.).
- 4) *analisi dei carichi interni*, definendo i contributi di calore sensibile e latente, generati all'interno dell'ambiente, da parte di persone, illuminazione, apparecchiature/macchine presenti;

Le dimensioni e la stratigrafia degli elementi opachi e trasparenti, sono state desunte da informazioni acquisite in loco. Successivamente, mediante MC-Impianto (software che consente la determinazione dei carichi termici, di un locale, in regime stazionario), si sono calcolati i rispettivi valori di trasmittanza termica. A titolo di esempio, nella seguente tabella vengono riportate le caratteristiche tecniche delle mura perimetrali ovest dell'area galvanica.

Componente	Immagine	Descrizione dello strato	Spessore (cm)	Conducibilità termica (W/m K)	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Resistenza termica (m <sup>2</sup> K/W)	Spessore totale (cm)	Trasmittanza (W/m <sup>2</sup> K)
Pareti perimetrali nord, est, ovest		Strato liminare esterno	-	-	-	0,04	33	3,008
		Intonaco calce e cemento	4	0,9	1800	0,044		
		Muratura in tufo	25	3,4	2300	0,074		
		Intonaco calce e cemento	4	0,9	1800	0,044		
		Strato liminare interno	-	-	-	0,13		

Tabella 1- Caratteristiche tecniche stratigrafia mura perimetrali

Nel locale galvanica è presente un impianto di ventilazione tangenziale su tutte le vasche attiva 24 ore al giorno per 7 giorni settimanali. Tale impianto ha lo scopo di aspirare e trattare l'aria esausta da inquinanti emessa dalle vasche, a causa dei processi chimici, e successivamente di immetterla in atmosfera, ed è

costituito da 7 sistemi di aspirazione, ai quali afferiscono le ventilazioni sulle singole vasche, denominati emissioni 15, 16, 18, 19, 22, 23 e 25.

Le emissioni 18, 19, 22 sono realizzate attraverso macchine denominate, "colasit", costituite da una cappa con aspirazione laterale su uno solo dei lati. Le canalizzazioni di aspirazioni dedicate a ciascun colasit sono instradate a soffitto e convogliano esternamente l'aria esausta di inquinanti.

Le emissioni 15, 16, 23 e 25 sono invece realizzate mediante una rete di canalizzazioni instradate sotto pavimento tecnico e connesse a dei ventilatori centrifughi installati in copertura. Sempre in copertura sono previsti dei filtri per l'abbattimento degli inquinanti prima dell'espulsione in ambiente.



**Figura 2 – Anemometro a filo caldo utilizzato per eseguire la misura della velocità di aspirazione, nei fori situati alla base delle condotte di aspirazione, delle emissioni 15, 16, 23 e 25**

Il funzionamento del sistema di ventilazione rappresenta una delle maggiori criticità seguite studiate nel lavoro di tesi. Infatti, la maggior dispersione termica presente all'interno dell'area galvanica viene causata proprio dalla presenza di tale portata di aspirazione, ragion per cui si è deciso di misurarla, mediante l'utilizzo di anemometro a filo caldo. La misura della velocità di aspirazione delle emissioni 15, 16, 23, e 25 è stata effettuata introducendo la sonda dell'anemometro in un foro posto alla base delle canalizzazioni, situate in copertura (Figura 2). La misura della velocità di aspirazione delle emissioni 18, 19, 22, invece, è stata effettuata ponendo la sonda dell'anemometro in corrispondenza delle feritoie poste ai bordi delle relative vasche. In definitiva la portata totale misurata, dell'impianto di ventilazione delle vasche, è di circa  $38000 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Successivamente si è proceduto con l'analisi termografica, essenziale per individuare ponti termici, problemi di condensa superficiale, umidità di risalita, infiltrazioni meteoriche, punti caldi negli impianti e nei relativi accumuli, ecc. Tale analisi è stata effettuata con una termo camera, dispositivo che visualizza l'energia infrarossa (campo termico) non a contatto e la converte in segnale elettrico. Questo segnale è poi processato per produrre un'immagine su un monitor per ottenere una misura di temperatura. In pratica la termo camera è dotata di un filtro che fa passare le radiazioni comprese in un certo intervallo di lunghezza d'onda. Si riporta in Figura 3 lo strumento utilizzato, con il quale è stato possibile rilevare valori di temperatura su diverse superfici presenti nell'area galvanica, e un esempio di analisi.

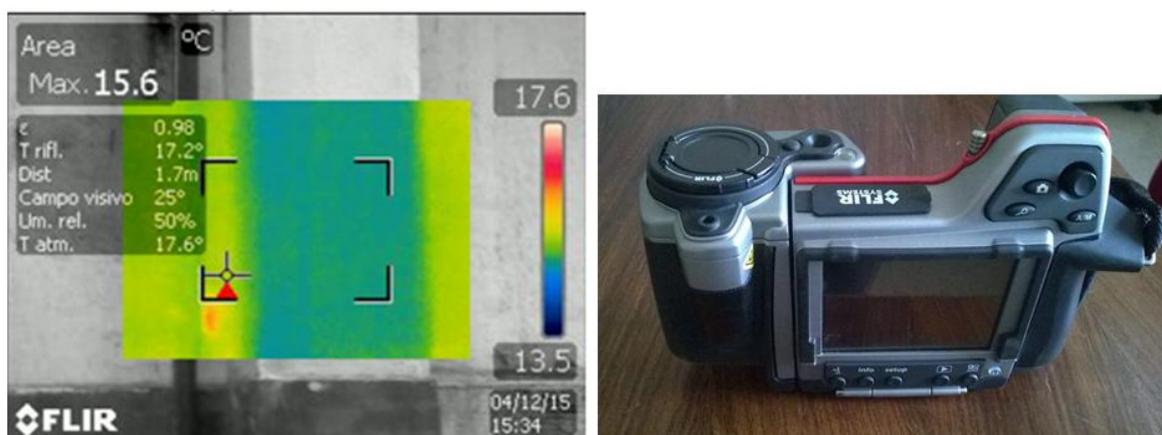


Figura 3 – Termocamera utilizzata e pilastro appartenente al muro perimetrale ovest soggetto a tale analisi

L'analisi dei carichi interni, invece, consiste nel determinare quei contributi d'energia termica che non derivano dall'impianto di riscaldamento, ma che provengono da sorgenti interne come persone, illuminazione, macchinari, dato che questi fattori influenzano l'andamento delle temperature di un ambiente e quindi i flussi termici. A titolo di esempio si riporta il calcolo dei contributi termici offerti dalle vasche nel periodo estivo e invernale. In particolare per poter calcolare la potenza termica trasmessa da quest'ultime con il locale galvanica, è stata determinata la stratigrafia e successivamente il relativo valore di trasmittanza (U).

Le vasche della linea di cromatizzazione sono costituite in acciaio, rivestite internamente da lana di roccia per uno spessore pari a quello della vasca, ovvero  $s = 0,07$  m. Si riportano nella Tabella 2 i valori di conduttività, resistenza e trasmittanza termica.

Spessore S [m]	Conduttività $\lambda$ [W/mK]	Coefficiente adduzione interna $\alpha_i$ [W/m <sup>2</sup> K]	Coefficiente adduzione esterna $\alpha_e$ [W/m <sup>2</sup> K]	Resistenza termica globale $R_G$ [m <sup>2</sup> K/W]	Trasmittanza termica U [W/m <sup>2</sup> K]
0,07	0,042	8	8	1,91	0,52

Tabella 2 – Valori di conduttività, resistenza e trasmittanza termica relativi alle vasche della linea di cromatizzazione

Si osserva che nel calcolo della resistenza termica,  $R_G$ , si è tenuto conto solo del contributo dato dallo spessore della lana di roccia, in quanto ha un peso maggiore rispetto allo strato di acciaio (avendo una conduttività elevata e uno spessore di pochi millimetri). Mentre le vasche della linea elettrolitica sono costituite dalla seguente stratigrafia (dall'interno verso l'esterno): PVC – aria – vetro resina.

Si riportano in Tabella 3 i valori di conduttività, resistenza e trasmittanza termica.

Materiale	Spessore S [m]	Conduttività $\lambda$ [W/mK]	Coefficiente adduzione interna $\alpha_i$ [W/m <sup>2</sup> K]	Coefficiente adduzione esterna $\alpha_e$ [W/m <sup>2</sup> K]	Resistenza termica globale $R_G$ [m <sup>2</sup> K/W]	Trasmittanza termica U [W/m <sup>2</sup> K]
PVC	0,002	0,16	8	8	0,313	3,19
Aria	0,001	0,026				
Vetro-resina	0,005	0,4				

Tabella 3 – Valori di conduttività, resistenza e trasmittanza termica relativi alle vasche della linea elettrolitica

Le vasche della linea di cromatizzazione sono tutte a forma di parallelepipedo, con lunghezza di 2,4 m, larghezza di 0,9 m e altezza di 1,2 m. Una volta calcolata la superficie attraverso il quale avviene lo scambio di calore ( $S = 7,92 \text{ m}^2$ ), si è determinata la potenza termica trasmessa mediante la seguente formula:

$$Q = U S (T_i - T_e) \quad (\text{W})$$

Dove:

- $T_i$  = temperatura funzionamento vasca;
- $T_e$  = temperatura locale galvanica.

Si riportano nelle Tabelle 4-5 i valori di potenza termica trasmessa, nel caso estivo e invernale, in ipotesi di regime stazionario.

a) *Caso invernale* :  $T_e = 18 \text{ }^\circ\text{C}$

Vasca	Temperatura di funzionamento [°C]	$\Delta T$ [°C]	Potenza termica trasmessa [W]	Potenza termica trasmessa totale [W]
1	60	42	174	745
5	60	42	174	
9	40	22	91	
11	40	22	91	
13	70	52	215	

Tabella 4 – Valori di potenza termica trasmessa nel caso invernale.

b) *Caso estivo* :  $T_e = 26 \text{ }^\circ\text{C}$

Vasca	Temperatura di funzionamento [°C]	$\Delta T$ [°C]	Potenza termica trasmessa [W]	Potenza termica trasmessa totale [W]
1	60	34	140	578
5	60	34	140	
9	40	14	58	
11	40	14	58	
13	70	44	182	

Tabella 5 – Valori di potenza termica trasmessa nel caso estivo.

Mentre le vasche della linea elettrolitica, 11 lavorano ad una  $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  e 1 lavora alla  $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Anche in questo caso sono tutte a forma di parallelepipedo, con le seguenti dimensioni: lunghezza di 1,1 m, larghezza di 0,7 m e altezza di 0,7 m. Il valore della superficie di scambio è pari  $2,52 \text{ m}^2$  e i valori di potenza termica trasmessa, nel caso estivo e invernale, in ipotesi di regime stazionario sono riepilogati nelle seguenti Tabelle 6-7.

a) *Caso invernale* :  $T_e = 18 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura di funzionamento [°C]	$\Delta T$ [°C]	Potenza termica trasmessa [W]	Potenza termica trasmessa totale [W]
60	42	337,6	4132
70	52	418	

Tabella 6 – Valori di potenza termica trasmessa nel caso invernale.

b) Caso estivo :  $T_e = 26 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura di funzionamento [°C]	$\Delta T$ [°C]	Potenza termica trasmessa [W]	Potenza termica trasmessa totale [W]
60	34	273,3	3360
70	44	353,7	

Tabella 7 – Valori di potenza termica trasmessa nel caso estivo.

## Analisi in regime dinamico

Il modello energetico dell'edificio galvanica e del relativo impianto, costruito tramite il software Trnsys-3D, permette di simulare un flusso dinamico di energia che si trasferisce da una zona termica all'altra o verso l'esterno. Al fine di ottenere risultati più vicini alla realtà si è suddiviso il locale galvanica in 4 zone termiche, dato che ciascuna zona è caratterizzata da una temperatura diversa. Tale modello viene riportato nella seguente figura.

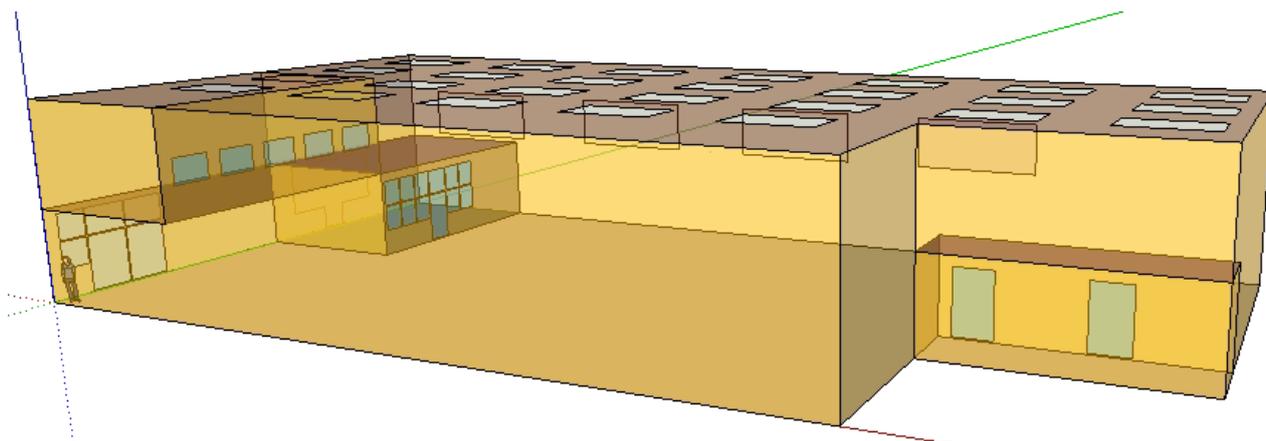


Figura 4 – Modello energetico delle zone dell'area galvanica

In particolare si può osservare in Figura 4, dai diversi colori utilizzati nella rappresentazione delle varie parti di ogni elemento, come questo modello differenzi le superfici vetrate dalle mura perimetrali, le mura perimetrali dal soffitto, ecc. Questo fa sì che nelle fasi successive si possa andare ad assegnare delle differenti caratteristiche dei materiali che compongono ogni tipo di superficie, mediante una delle interfacce di TRNSYS 17 ovvero TRNbuild.

Il software utilizzato per la creazione di questo modello, al momento del salvataggio, crea un file *.idf* che può essere richiamato dal software Trnsys17 in modo da poter far interagire l'edificio con l'impianto a suo servizio. Proprio col software Trnsys17, ed in particolare con la sua interfaccia *simulation studio*, in un secondo momento si è passati alla modellazione del recuperatore di calore a servizio della zona galvanica. In tale attività di tesi sono stati proposti quattro ipotesi di intervento di efficientamento energetico dell'area galvanica, ovvero:

- isolamento del muro ovest con 10 cm di polistirene espanso;
- installazione di un recuperatore di calore a doppia batteria;

- installazione di un recuperatore di calore a flussi incrociati;
- installazione di un impianto radiante.

In particolare si sono considerati due scenari di interventi.

1) Nel primo, in cui si considera l'attuale impianto termico, si è valutato:

- l'isolamento del muro ovest con 10 cm di polistirene espanso;
- l'installazione di un recuperatore di calore a doppia batteria;
- l'installazione di un recuperatore di calore a flussi incrociati.

2) Nel secondo invece, in cui si considera la sostituzione dell'impianto attuale, si è valutato:

- l'installazione di un impianto radiante;
- l'installazione di un impianto radiante con recuperatore di calore a doppia batteria;
- l'installazione di un impianto radiante con recuperatore di calore a flussi incrociati.

Per ogni scenario sono stati analizzati i seguenti elementi:

- ✓ il locale galvanica, modellato tramite un plug-in del software google SketchUp "Trnsys-3D";
- ✓ il recuperatore di calore modellato tramite il software Trnsys17.

L'insieme Edificio-Impianto, modellati tramite i due software precedentemente descritti, viene mostrato nella seguente Figura 5, in particolare, come esempio si mostra il caso impianto di riscaldamento attuale con recuperatore a flussi incrociati.

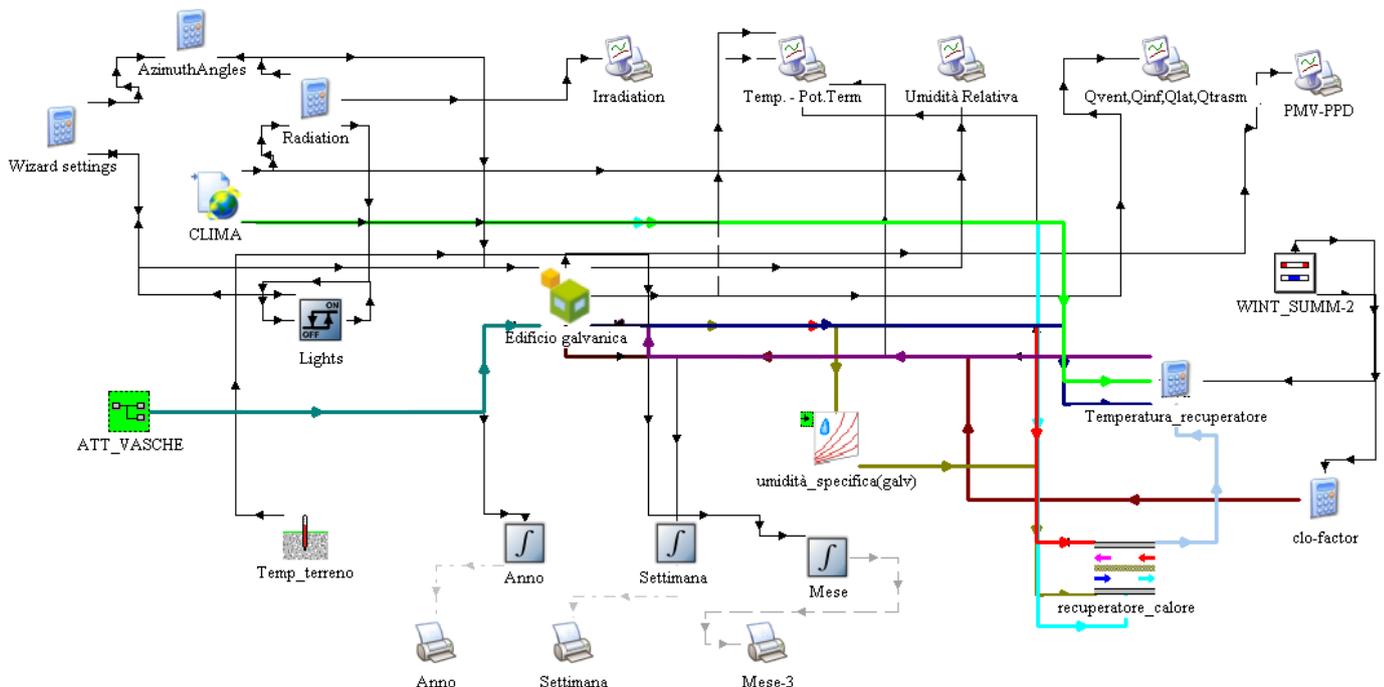


Figura 5 – Modello Edificio - recuperatore a flussi incrociati in Trnsys17

Successivamente si riportano, a titolo di esempio, i risultati relativi al primo scenario di interventi in cui non si considera la sostituzione dell'attuale impianto termico. In particolare si mostra l'andamento delle temperature in un giorno significativo dell'anno (invernale), Figura 6.

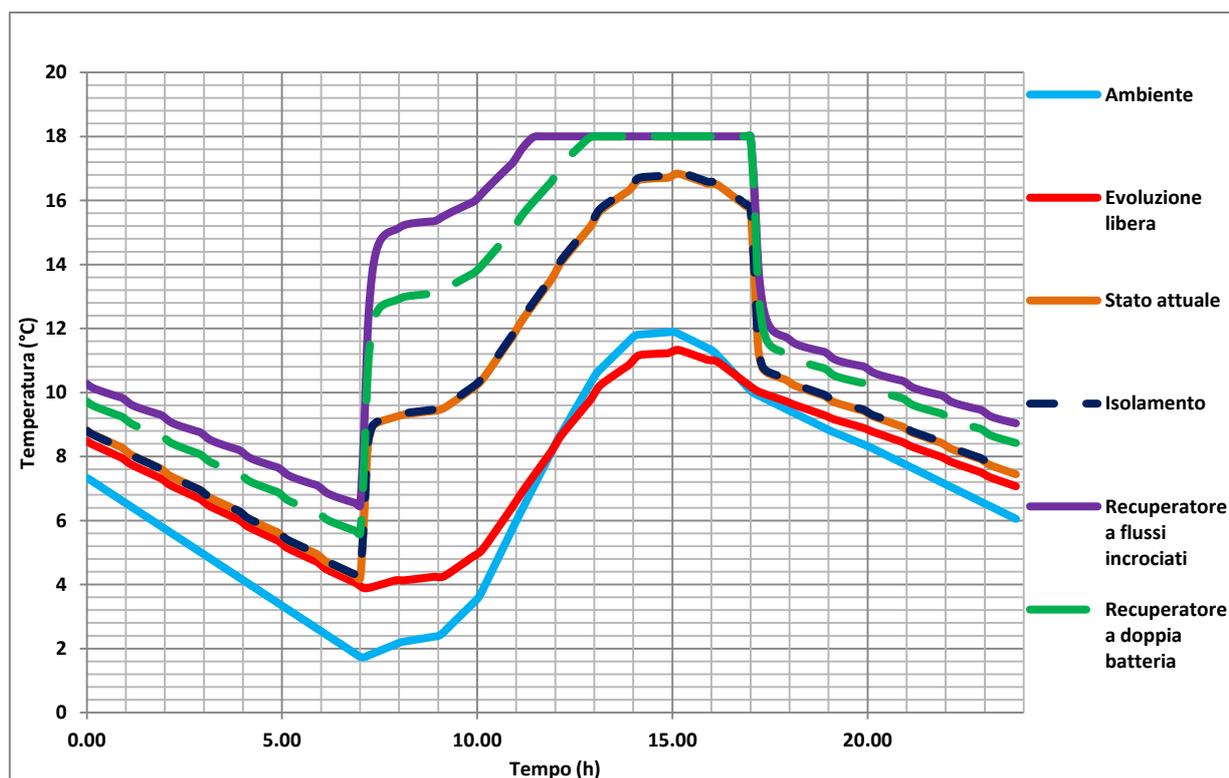


Figura 6 – Andamento temperature area galvanica di un giorno tipico invernale (25/01)

Osservando la temperatura dell'area galvanica relativa al caso in cui l'impianto sia spento "evoluzione libera", si può notare che l'andamento è prossimo a quello della temperatura ambiente. Ciò è dovuto all'impianto di ventilazione tangenziale presente su tutte le vasche attivo 24 ore al giorno per 7 giorni settimanali. Ciò comporta che si risente, quasi istantaneamente, delle variazioni della temperatura esterna il cui picco risulta quasi perfettamente in fase con quello della temperatura interna. Se si osserva la curva dello "stato attuale", ovvero quella relativa alla sola presenza degli aerotermi, alle ore 7 del mattino l'impianto di riscaldamento entra in funzione ma non riesce ad assicurare una temperatura di 18°C, temperatura di set invernale prevista. Tale temperatura non si riesce a garantire neanche dopo le ore 12, quando gli apporti solari aumentano. Alle 17 l'impianto viene spento e le temperature si riportano a valori più bassi. Stesso andamento si ha anche per lo scenario relativo all'isolamento del muro perimetrale ovest dell'area galvanica. Mentre nel caso relativo all'installazione del recuperatore di calore a batteria con pompa si ha un andamento diverso, in particolare si nota che si riesce a garantire una temperatura di 18°C dalle ore 13, questo perché una parte della portata d'aria calda espulsa, dall'impianto di ventilazione delle vasche, viene recuperata. Ciò si nota ancora di più con il recuperatore a flussi incrociati, il quale garantisce una temperatura di 18°C dalle ore 11, poiché essendo un recuperatore aria-aria ha un'efficienza di recupero maggiore rispetto al precedente, che utilizza come fluido termovettore l'acqua.

In figura 7 si riportano gli andamenti di potenza termica resa all'utenza relativi all'intero edificio per l'intero giorno. Si può notare come, nello scenario "stato attuale" e "isolamento" la potenza termica resa all'utenza è pari alla potenza installata degli aerotermi durante le 10 ore di funzionamento dell'impianto, mentre nei casi relativi all'installazione dei due recuperatori di calore si osserva che l'andamento della potenza è del tutto in accordo con i diagrammi delle temperature. Abbiamo un picco durante le prime ore del mattino, quando la temperatura deve portarsi al valore di settaggio di 18°C, successivamente il riscaldamento viene assicurato dalla presenza degli apporti offerti dai recuperatori e di quelli solari e

pertanto abbiamo un abbassamento. Infine, dopo le 15, si ha un innalzamento della potenza termica dato da un abbassamento della temperatura esterna.

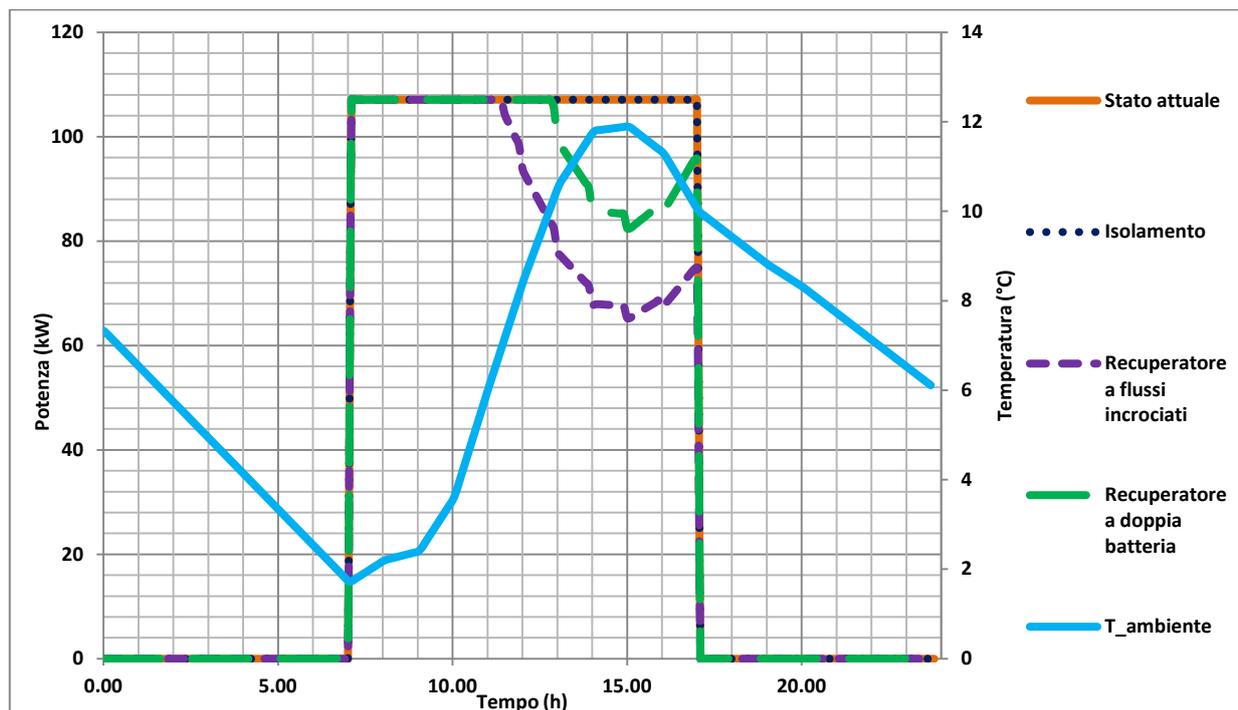


Figura 7 – Andamento della potenza termica richiesta dall'area galvanica in un giorno tipico invernale (25/01)

Vengono inoltre riportati in Figura 8 gli andamenti mensili del consumo di energia termica per i 3 interventi proposti. Da tale grafico si nota che l'intervento relativo all'isolamento del muro perimetrale ovest dell'area galvanica non comporta notevoli risparmi energetici, cosa che invece si evince nei due casi relativi all'installazione dei due recuperatori di calore.

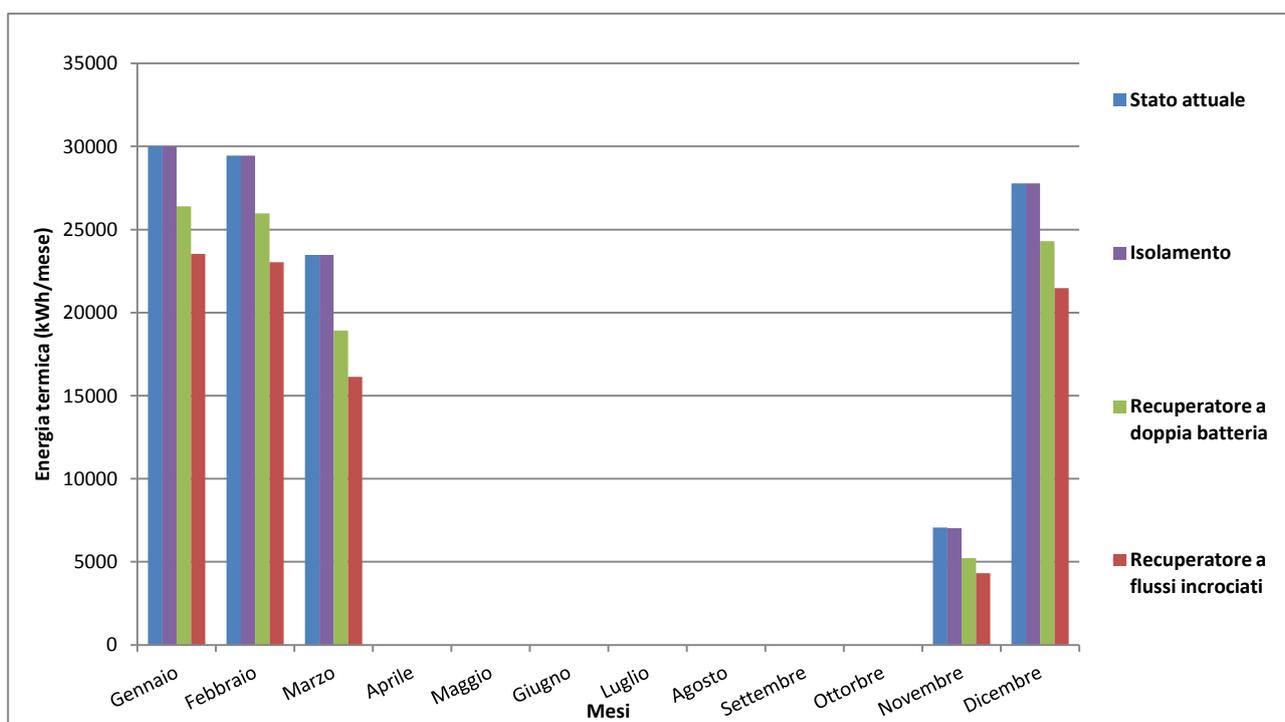


Figura 8 – Andamento mensile dell' energia termica richiesta dall'area galvanica

## Analisi economica

L'analisi economica per il primo scenario di interventi, è stata fatta, facendo riferimento ad un sistema di riscaldamento tradizionale in cui il generatore di calore è rappresentato da una caldaia (con rendimento pari 0,9), dato che non è stato possibile reperire i costi di energia termica che l'azienda sostiene dall'attuale impianto di riscaldamento. In più, in tale analisi non si è tenuto conto dell'intervento relativo all'isolamento del muro ovest, dato che quest'ultimo comporta un risparmio energetico molto ridotto. Tali indici sono stati calcolati assumendo i seguenti valori:

- vita utile impianti proposti = 20 anni;
- Costo unitario di gas naturale = 0,80 €/cent/Sm<sup>3</sup>;
- Tasso di attualizzazione = 5 %;

	Aerotermi attuali	Recuperatore a doppia batteria	Recuperatore a flussi incrociati
Investimento		16300	20145
Rendimento caldaia	0.9	0.9	0.9
Energia termica (kWh/anno)	117750	100805	88472
Energia primaria (kWh)	130833	112006	98302
Risparmio energia primaria (anno)		18827	32531
Costo energia primaria (€/anno)	10914	9344	8200
ΔC (€/anno)		1570.57	2713.73
ΔC (%)		0.14	0.25
SPB(anni)		10.38	7.42
DPB (anni)		15.00	9.51
FA (anni)		12.46	12.46
VAN (€)		3272	13674
IP		0.20	0.68

Tabella 8- Indici economici

In definitiva dai risultati ottenuti possiamo dire che :

- gli attuali aerotermi dell'area galvanica sembrano sottodimensionati al fine di garantire una temperatura di 18°C, questo perché ad incidere sono i volumi di aria calda espulsi causati dall'impianto di aspirazione delle vasche;
- l'isolamento del muro ovest non determina notevoli risparmi energetici, a differenza dei casi in cui si considera di installare i recuperatori di calore;
- l'installazione del recuperatore a flussi incrociati comporta un notevole risparmio energetico; inoltre, dal punto di vista economico, ha un valore di SPB (simple pay back) minore e un indice di profitto più alto, rispetto al caso con recuperatore a doppia batteria, per cui si può concludere che è il migliore tra gli interventi analizzati.