

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

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

TESI DI LAUREA

**Analisi dinamica di un impianto di cogenerazione al servizio della
DI MAURO Officine Grafiche S.p.A.**

RELATORE:

CH.MO PROF. ING. FRANCESCO CALISE

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

CORRELATORE:

ING. LUIGI LIBERTINI

ING. EDOARDO QUIRITI

ING. ANTONIO ROMALDO

CANDIDATO

SILVIA GIORNO

M67/258

ANNO ACCADEMICO 2016/2017

Introduzione

La cogenerazione, nota anche come CHP (Combined Heat and Power), è la produzione congiunta e contemporanea di energia elettrica e calore utile a partire da una singola fonte di energia primaria, attuata in un unico sistema integrato. La cogenerazione, utilizzando il medesimo combustibile per due scopi differenti, mira ad un più efficiente sfruttamento dell'energia primaria, con relativi risparmi economici soprattutto nei processi produttivi laddove esista una forte contemporaneità tra prelievi elettrici e prelievi termici. E' possibile sintetizzare, di seguito, i principali vantaggi legati all'utilizzo di un impianto cogenerativo:

- Minor consumo di energia primaria grazie alla maggior efficienza del sistema: con impianti cogenerativi è possibile raggiungere valori del rendimento globale anche superiori a 0,8 con conseguente minor consumo di combustibile a parità di servizio reso;
- Minori emissioni in atmosfera di gas climalteranti: la migliore efficienza complessiva dei sistemi cogenerativi consente una riduzione nel consumo di combustibili e di conseguenza minori emissioni di CO₂;
- Riduzione delle perdite per trasmissione: l'applicazione della cogenerazione, essendo l'impianto di norma localizzato vicino all'utente finale, rende minime le perdite per la distribuzione ed il trasporto dell'energia;
- Possibilità di diminuire i rischi di interruzione del servizio: i sistemi cogenerativi, in grado di funzionare anche in modalità "Stand Alone", consentono di ridurre al minimo i rischi di interruzione dell'alimentazione dell'energia per disservizi di rete, condizione di importanza fondamentale in tutti quei contesti in cui sia importante la continuità dell'approvvigionamento dell'energia elettrica.

E' bene comunque sottolineare anche i principali limiti di cui è necessario tenere conto nella valutazione di un impianto cogenerativo. Il principio della cogenerazione, seppure valido in generale, talvolta non può essere applicato in maniera energeticamente ed economicamente conveniente, se non sono soddisfatte le seguenti condizioni:

- Presenza e vicinanza dell'utenza termica: perché un impianto cogenerativo possa essere realizzato è necessario che nelle vicinanze di questo sia presente una utenza termica, industriale o civile. Tale necessità di fatto si scontra con la tendenza di collocare in luoghi distanti dai centri urbani o di lavoro gli impianti termoelettrici per la generazione di energia, al fine di limitare l'esposizione della popolazione alle emissioni in atmosfera;

- Contemporaneità delle utenze: un'altra condizione, perché un impianto cogenerativo possa essere sfruttato in maniera opportuna, è che la richiesta di energia termica ed elettrica siano contemporanee. Un impianto di cogenerazione tipicamente è in grado di mettere a disposizione calore ed energia elettrica simultaneamente, pertanto è necessario che le utenze simultaneamente assorbano tale energia;
- Compatibilità delle temperature: non tutti gli impianti cogenerativi rendono disponibile calore alla medesima temperatura. Può accadere dunque che un sistema cogenerativo non sia adatto a servire una utenza termica perché questa richiede calore a livelli di temperature troppo elevate. È necessario pertanto scegliere correttamente il sistema cogenerativo da accoppiare ad una certa utenza oppure introdurre modifiche all'impianto stesso tali da innalzare la temperatura del calore messo a disposizione;
- Flessibilità dell'impianto: pur essendo presenti in maniera contemporanea la domanda di calore ed energia elettrica da parte di una utenza può accadere che in certi momenti la richiesta di energia elettrica sia proporzionalmente maggiore di quella termica o viceversa;

Partendo dalla cogenerazione, la trigenerazione unisce alla produzione combinata di energia elettrica e termica anche quella di condizionamento dell'aria e di raffrescamento. L'impianto è formato sostanzialmente da un cogeneratore, costituito da un motore endotermico accoppiato ad un generatore elettrico, al quale viene associato un sistema per la produzione di fluidi freddi, ovvero un sistema ad assorbimento il cui funzionamento si basa su trasformazioni di stato del fluido refrigerante in combinazione con la sostanza utilizzata quale assorbente. Rispetto alla generazione di sola energia elettrica, in un sistema di trigenerazione il rendimento globale aumenta.

Scopo della tesi

Il lavoro presentato si basa sull'analisi della simulazione dinamica di un impianto di trigenerazione esistente; nello specifico l'impianto è stato installato nell'opificio industriale della DI MAURO Officine Grafiche S.p.A. sito in Cava de' Tirreni (SA). L'azienda produce imballi flessibili (flexible packaging) ed è presente sul mercato nazionale ed europeo. In tale azienda si è svolta un'attività di tirocinio formativo al fine di fornire informazioni sul funzionamento dell'impianto simulato.

Il caso studio

Il prodotto tipico della Di Mauro Officine Grafiche S.p.A. è costituito da poliaccoppiati stampati o neutri a più strati di film plastici cartacei o di alluminio, forniti alla clientela sotto forma di bobine o

sacchetti. Il ciclo di lavorazione dello stabilimento di Cava de' Tirreni della DI MAURO OFFICINE GRAFICHE S.p.A. può essere descritto come segue:

- Ricezione materie prime ed immagazzinamento: le materie prime sono ricevute in bobine disposte su pedane o in casse di legno e stoccate in apposite aree di magazzino, poste all'interno dell'opificio;
- Fotoformatura: nel reparto fotoformatura sono approntate le matrici (cilindri) impiegate successivamente dal reparto stampa. I cilindri già trattati superficialmente, sono sottoposti alle lavorazioni meccaniche con l'impiego di macchine utensili specifiche a punta diamantata per la preparazione delle superfici di stampa mediante l'incisione di celle di dimensioni micrometriche;
- Stampa: nel reparto stampa con l'impiego di macchine rotocalco, di matrici e di inchiostri, si stampano le immagini su appositi films plastici;
- Laminazione: nel reparto laminazione, con l'impiego di accoppiatrici in rotocalco, sono saldamente uniti tra loro mediante incollaggio due o più films, al fine di ottenere un poliaccoppiato con determinate caratteristiche di resistenza meccanica e di impermeabilità ai gas in genere;
- Taglio: nel reparto taglio con l'impiego di apposite taglierine sono tagliate, secondo le dimensioni ed i formati indicati dai clienti, le bobine di films stampate e accoppiate nei reparti descritti in precedenza;

Layout dell'impianto

L'impianto di trigenerazione installato presso DI MAURO OFFICINE GRAFICHE S.p.A. ha lo scopo di fornire l'energia elettrica e quella termica, necessarie alle attività tecnologiche proprie dell'opificio industriale. L'intero impianto è costituito fondamentalmente dai seguenti elementi:

- Motore a combustione interna a ciclo otto del tipo E Jenbacher JMS 612 GS NL con alimentazione a metano posizionato all'interno di un locale appositamente predisposto;
- Unità termica per il recupero di calore da fumi composta da due corpi scaldanti, rispettivamente il primo per il fluido diatermico ed il secondo per la produzione di acqua calda. In particolare in primo luogo si ha uno scambiatore a piastre del tipo fumi/olio diatermico. Il secondo corpo scaldante è caratterizzato da uno scambiatore di calore fumi/acqua;
- Gruppo di assorbimento monostadio del tipo THERMAX 5G 3M C per la produzione di acqua refrigerata;

- Torre evaporativa a servizio del gruppo assorbitore del tipo Baltimore Aircoil VXT 750 R;
- Dissipatore per la potenza termica non utilizzata del tipo acqua/aria.

Per maggiore chiarezza si è riportato in Figura 1 lo schema funzionale dell'impianto:

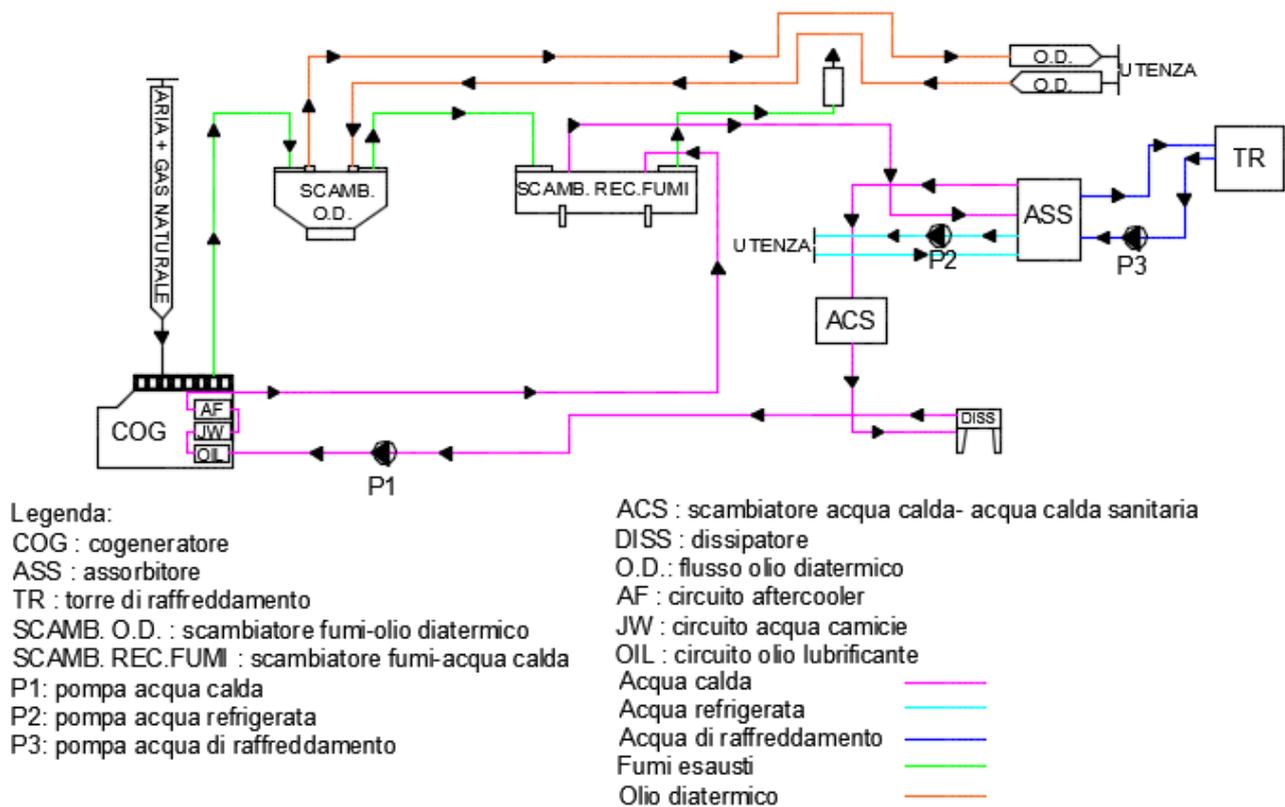


Figura 1 - Layout dell'impianto e principali circuiti

Partendo dal motore a combustione interna, i percorsi da seguire sono due: il primo è caratterizzato dai fumi esausti del motore e il secondo invece, dall'acqua che ha la funzione di refrigerare il motore. Durante il funzionamento del motore a combustione interna la portata di fumi esausti, che ammonta a 11699 kg/h, raggiunge una temperatura di 376°C. Tale flusso ad alta temperatura deve effettuare un primo scambio di calore con l'olio diatermico. Successivamente i gas esausti devono effettuare un secondo scambio di calore con l'acqua che ha refrigerato il motore. Considerando l'altro percorso, menzionato all'inizio del paragrafo, l'acqua, che ha la funzione di refrigerare il motore, con una portata di 51200 kg/h passa per tre circuiti, ed in particolare:

- Un circuito olio in cui acquisisce calore aumentando la propria temperatura da 80°C a circa 84°C;
- Successivamente attraversa il circuito acqua mantello del motore passando ad un valore di temperatura pari a circa 88°C;
- Infine passa attraverso il circuito intercooler arrivando ad una temperatura pari a circa 95°C.

Successivamente l'acqua deve acquisire calore dai gas esausti passando attraverso lo scambiatore "recupero fumi" già nominato precedentemente. L'acqua, a questo punto deve dirigersi verso il gruppo assorbitore. Anche qui i percorsi sono diversi e nel particolare tre: quello legato all'acqua di refrigerazione, quello che concerne l'acqua di raffreddamento e infine quello dell'acqua calda. Per quanto riguarda l'acqua di refrigerazione in uscita dall'assorbitore ha una temperatura di set-point pari a 7°C considerando una portata di 174000 kg/h. L'acqua di refrigerazione ritorna nell'assorbitore ad una temperatura pari a circa 12°C. L'acqua di raffreddamento, invece, lascia l'assorbitore con una temperatura di circa 34°C e una portata di 384000 kg/h per raggiungere la torre di raffreddamento dove subisce un abbassamento di temperatura fino a circa 29°C prima di tornare nuovamente all'interno dell'assorbitore. L'acqua calda invece, in uscita dall'assorbitore, deve effettuare un ulteriore scambio termico cedendo calore all'interno di uno scambiatore adibito per l'acqua calda sanitaria. Infine l'acqua, prima di tornare al motore per chiudere il ciclo, viene fatta circolare attraverso un componente di scambio che ha lo scopo di dissipare il calore in eccesso al fine di evitare che l'acqua in ingresso al circuito di raffreddamento sia troppo alta ed in particolare maggiore di 80°C. La presenza del dissipatore nel circuito analizzato d'altro canto è giustificata perché l'impianto, operando con pilotaggio elettrico, potrebbe trovarsi in condizioni in cui la produzione di energia termica risulta in esubero rispetto ai fabbisogni. In questo caso la potenza elettrica della cogenerazione è minore o uguale di quella elettrica richiesta. Nel modello, tale strategia è stata schematizzata introducendo un'equazione di controllo che, a secondo del valore della richiesta di potenza elettrica, quella del motore a combustione interna viene parzializzata inseguendo il carico elettrico. In sintesi il motore a combustione interna funziona :

- A pieno carico e a punto fisso quando la richiesta di potenza elettrica è uguale o maggiore di quella massima erogabile dallo stesso;
- In modo parzializzato quando la richiesta è compresa tra il 50% ed il 100% della potenza erogabile;
- In caso di richieste inferiori al 50% della potenza erogabile il motore a combustione interna si spegne.

Questa funzione restituisce un segnale di controllo che è collegato non solo al motore ma anche ai componenti ausiliari come ad esempio le pompe.

Analisi energetica ed economica

L'analisi è stata condotta mediante la realizzazione di un modello di simulazione dinamica rappresentativo del layout dell'impianto usufruendo del software TRNSYS (Transient System

Simulation Program). L'anno di riferimento di analisi è il 2016. L'impianto trigenerativo è in grado di soddisfare l'intera richiesta di potenza termica e frigorifera. L'azienda ha fornito su base oraria le richieste delle utenze di potenza elettrica, termica ad alta temperatura e frigorifera, le quali sono riportate in Figura 2, in Figura 3 e in Figura 4.

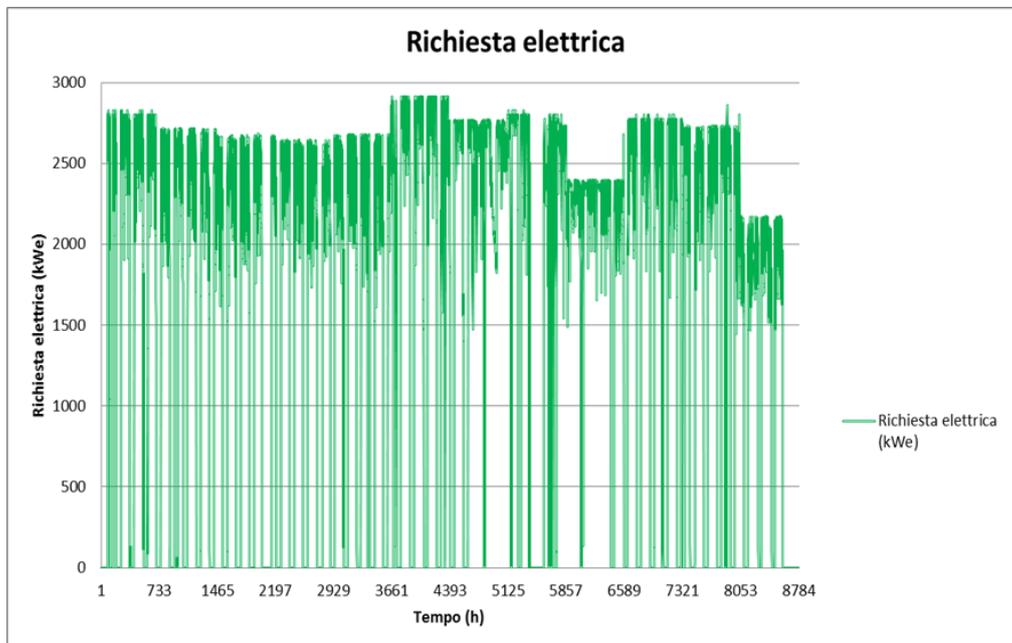


Figura 2 – Richiesta elettrica

Per quanto riguarda la potenza elettrica, la strategia di funzionamento considerata è il pilotaggio elettrico. Le richieste di potenza elettrica sono presenti per il 67,5% delle ore dell'anno ed il cogeneratore lavora per il 98% di tale percentuale spegnendosi solo per il 2%. Nello specifico, poi, il cogeneratore lavora per il 91%, delle ore in cui è acceso, a potenza fissa e per il 9% parzializza.

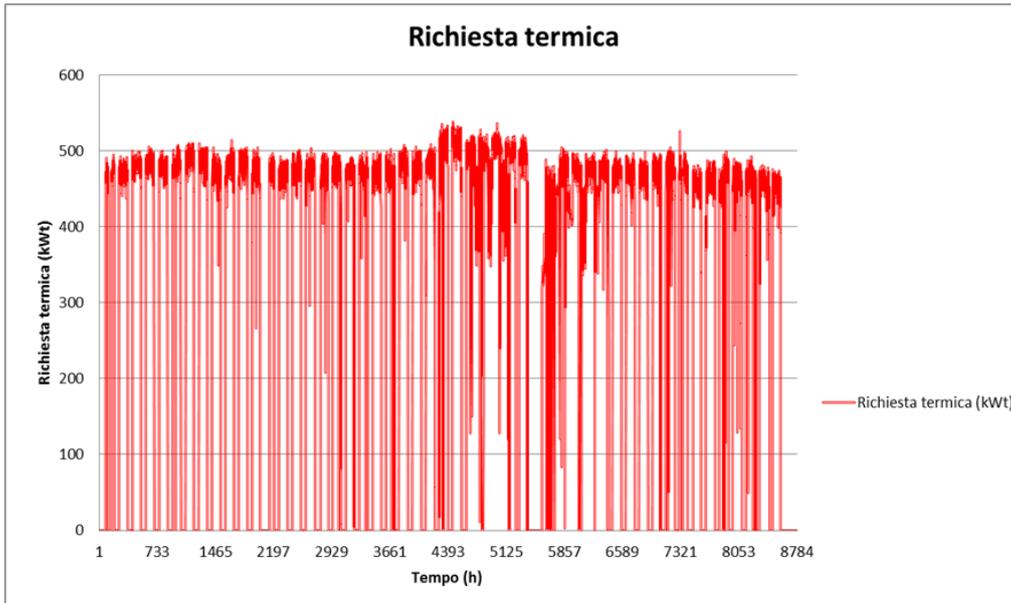


Figura 3 – Richiesta termica ad alta temperatura

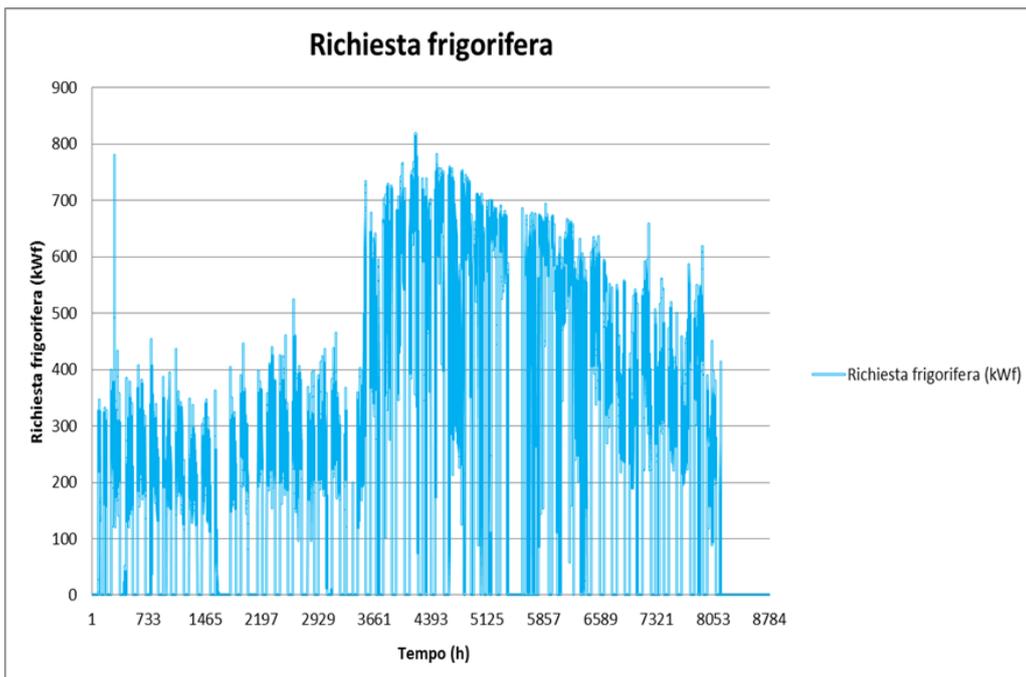


Figura 4 – Richiesta frigorifera

Grazie alle richieste di potenza sono state poi ottenute le curve di carico cumulato. In Figura 5, ad esempio, è riportata la curva di carico elettrico cumulata insieme alla curva rappresentativa della potenza massima e minima elettrica erogabile dal cogeneratore:

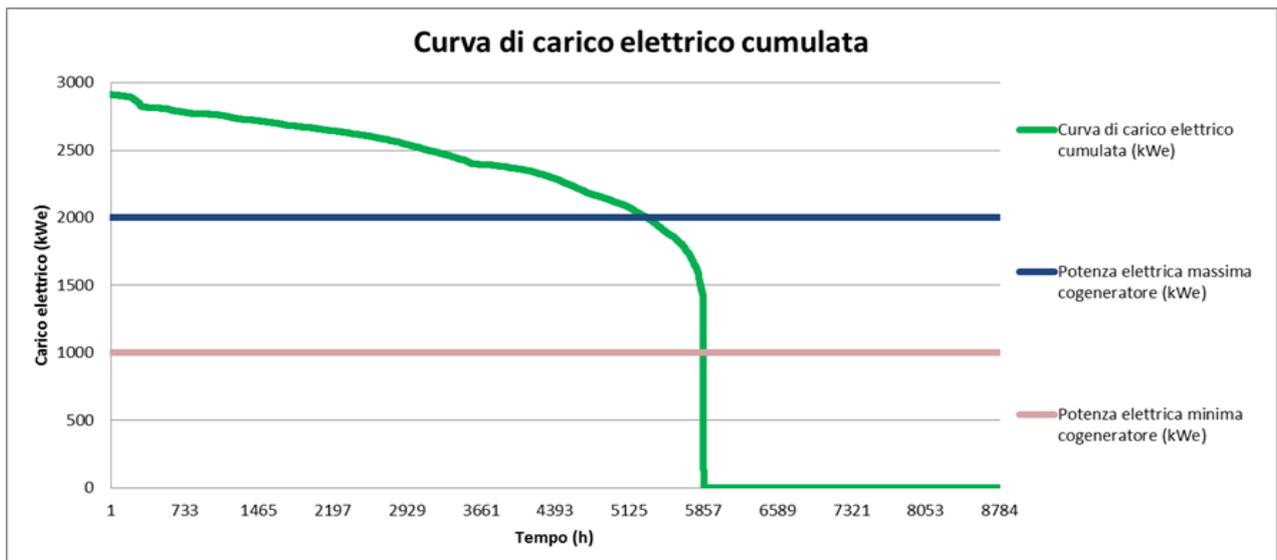


Figura 5 – Curva di carico elettrico cumulata

Considerando l'analisi energetica ottenuta in ambiente TRNSYS è possibile osservare in Figura 6 l'energia elettrica totale prodotta, termica prodotta totale (comprensiva delle aliquote di calore dissipate dai gas esausti e dal dissipatore) e sfruttata e frigorifera prodotta dal cogeneratore e dall'assorbitore:

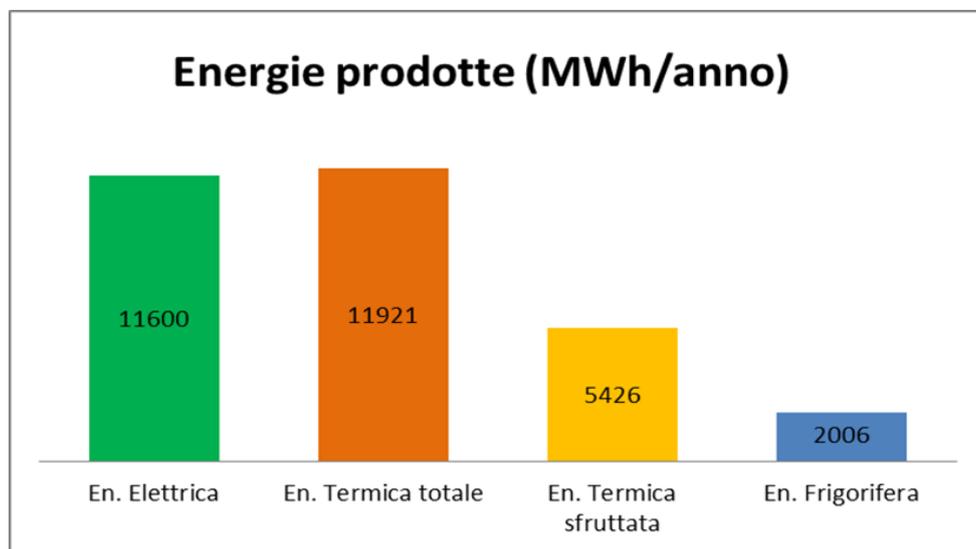


Figura 6 – Energie prodotte

Lo studio è proseguito svolgendo un'analisi economica. Considerando che il rendimento globale risulta essere inferiore al 75% e pari al 65% è stato necessario in prima battuta dimensionare la macchina virtuale. Inoltre l'azienda ha usufruito di un incentivo pubblico in conto capitale pari al

28% del costo dell'investimento totale. Tale valore percentuale è maggiore di quello limite del 20% definito per impianti di cogenerazione superiore a 1 MW di potenza installata. Per tale motivo l'azienda non può emettere Certificati Bianchi, poiché quest'ultimi non sono cumulabili con l'incentivo in conto capitale di cui l'azienda ha beneficiato. L'investimento al netto del finanziamento ammonta a 1.886.400 euro e il valore del SPB è pari a 3 anni, mentre il valore del VAN e dell'IP sono rispettivamente 3.126.191 euro e 1,66. Questi valori sono stati confrontati con un'analisi economica fatta con il valore dell'investimento totale che è pari a 2.620.000 euro. Considerando tale cifra il valore del SPB, VAN e IP risultano pari rispettivamente a 4; 2.392.591 euro e 0,91.

Scenario proposto

La soluzione proposta è volta a sfruttare parte del calore destinato al dissipatore. Infatti l'azienda nello stato attuale effettua il riscaldamento della palazzina uffici e di un magazzino adibito a camera di polimerizzazione tramite l'ausilio di una caldaia. Nello scenario proposto tale riscaldamento viene effettuato grazie al cogeneratore e nel modello, quindi, si prevede l'aggiunta di uno scambiatore di calore a valle dell'assorbitore e prima di quello destinato all'acqua calda sanitaria. La potenza termica richiesta dalle utenze per il riscaldamento è stata fornita dall'azienda su base oraria per un intero anno. Dall'analisi energetica è possibile osservare che, introducendo anche il riscaldamento nella soluzione proposta, si sfrutta maggiore energia termica a bassa temperatura ed in particolare si registra un incremento di 1229 MWh/anno di energia termica a bassa temperatura sfruttata a confronto del caso reale. In Figura 7 viene riportato il confronto tra l'energia termica totale sfruttata prima e dopo lo scenario proposto:

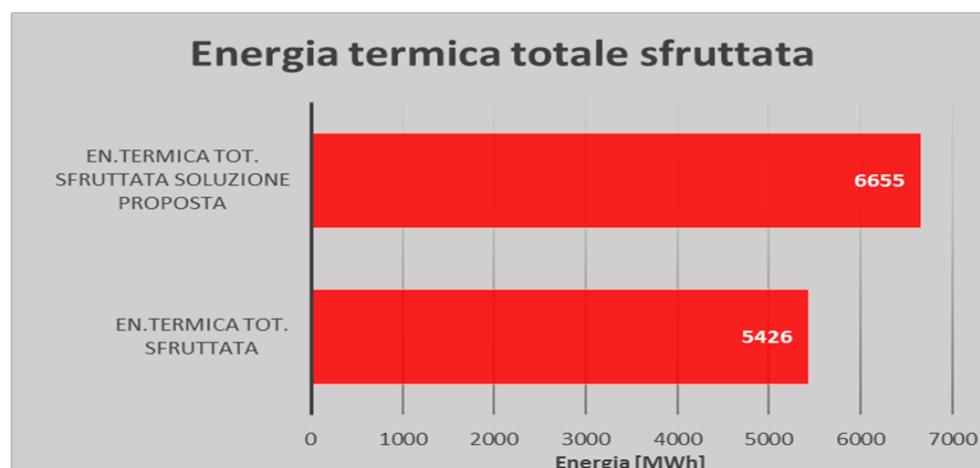


Figura 7 – Confronto energia termica sfruttata

In tal modo di tutta l'energia termica a bassa temperatura messa a disposizione dal cogeneratore il 59% rappresenta l'energia termica sfruttata dalle utenze e il 41% invece è destinato alla dissipazione. Il valore del rendimento globale raggiunge un valore del 69% e quindi, essendo comunque al di sotto del 75%, per poter effettuare l'analisi economica è necessario dimensionare la macchina virtuale. È stata fatta inoltre una valutazione economica preliminare per l'acquisto dello scambiatore e delle tubazioni per l'allacciamento dello scambiatore proposto con i componenti già presenti. Tale stima ammonta a 45.141 euro. Tale cifra è stata sommata al valore dell'investimento totale decurtato dell'incentivo pubblico in conto capitale e quindi, considerando che il valore dell'investimento risulta pari a 1.931.541 euro, i valori del SPB, VAN e IP risultano rispettivamente pari a 2,8; 3.488.530 euro e 1,81. In Tabella 1 viene riportato nel dettaglio l'analisi economica del caso reale e di quello proposto.

		Caso reale	Caso proposto	
Parametro	Simbolo	Valore	Valore	Unità
Rendimento globale	η_{globale}	0,65	0,69	-
Differenza Ricavi/Costi di gestione	ΔC	649299	702081	euro/anno
Investimento totale	I_T	1886400	1931541	euro
Tempo di ritorno dell'investimento	SPB	3	2,8	anni
Valore Attuale Netto	VAN	3126191	3488530	euro
Indice di profitto	IP	1,66	1,81	-

Tabella1 – Confronto economico

È possibile concludere che, grazie allo scenario proposto, si ha un maggiore sfruttamento dell'energia a bassa temperatura messa a disposizione dal cogeneratore ed inoltre il tempo di ritorno dell'investimento diminuisce del 7% .