

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

**Simulazione dinamica di un impianto di trigenerazione al servizio di una
struttura ospedaliera**

RELATORE:

CH.MO PROF. ING. FRANCESCO CALISE

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

CORRELATORE:

ING. GIANPIERO CASCONI

ING. LUIGI LIBERTINI

ING. ANNA MARIA ROSANOVA

ING. MARIA VICIDOMINI

CANDIDATO

EDOARDO QUIRITI

M67/236

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

Introduzione

Il mondo è in continua evoluzione e questo è possibile solo grazie all'energia; sarebbe quindi inimmaginabile oggi pensare di limitarne, o addirittura evitarne, la produzione. Negli ultimi anni, sempre più sorrette dalle normative, si sono affermate le fonti rinnovabili che, come indicato nel rapporto REN21 2016 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century), nel 2015 hanno coperto il 23,7% dei consumi elettrici ed il 19,2% dei consumi finali. In realtà, seppur possibile aumentare ancora di molto la produzione energetica da fonti rinnovabili, è difficile pensare nell'immediato di poter soddisfare l'intera richiesta energetica senza l'utilizzo di combustibili fossili. Parallelamente all'introduzione e allo sviluppo di forme di energia rinnovabile, quindi, occorre ideare e sviluppare soluzioni in grado di fornire alle utenze lo stesso fabbisogno energetico, ma con un minor consumo di energia primaria. In quest'ottica di risparmio energetico trova spazio la cogenerazione. Per cogenerazione si intende la produzione simultanea di energia elettrica e di energia termica utile, ottenute a partire dalla stessa energia primaria. Le principali tecnologie cogenerative disponibili attualmente sono: motori alternativi a combustione interna, turbine a gas, turbine a vapore, impianti a ciclo combinato. Quando si ottiene un ulteriore effetto utile, ovvero il freddo, si parla invece di trigenerazione. Ciò è possibile accoppiando al motore primo e al sistema di recupero termico, un sistema di generazione di freddo, come una macchina ad assorbimento. La cogenerazione è una soluzione innovativa ed affidabile che permette di ottenere: un significativo risparmio economico, una riduzione dell'impatto ambientale e delle emissioni in atmosfera di gas inquinanti e climalteranti, minori perdite di trasmissione e distribuzione per il sistema elettrico nazionale e minori rischi di interruzione del servizio. Il trasferimento di una parte dei consumi elettrici estivi per la climatizzazione degli ambienti su consumi di gas naturale permetterebbe di ridurre le punte di consumo elettrico. I consumi di gas naturale, inoltre, hanno un andamento fortemente stagionale e un aumento della domanda di gas durante la stagione estiva consentirebbe una più razionale gestione dei gasdotti (dimensionati sul consumo invernale), in un periodo dell'anno di larga disponibilità sulle reti di distribuzione del gas, con un miglior utilizzo delle riserve e una minore incidenza dei consumi energetici legati allo stoccaggio del gas. Tuttavia, oltre a garantire una corretta progettazione, gestione e manutenzione, ci sono dei requisiti, o comunque delle condizioni che devono presentarsi, affinché tutti i vantaggi prima elencati siano effettivamente raggiunti. Infatti la cogenerazione è realmente vantaggiosa nel momento in cui l'utenza (collocata vicino all'impianto cogenerativo/trigenerativo) necessita contemporaneamente di energia termica ed elettrica, presentando un elevato numero di ore all'anno di richiesta termica ed elettrica (almeno 4000 ore). Per tali ragioni, la trigenerazione è la

soluzione ideale per utenze quali alberghi, centri sportivi, centri commerciali e, come analizzato nella presente tesi, ospedali.

Scopo della tesi

In questo elaborato di tesi sono stati ricavati ed analizzati i risultati ottenuti dalle simulazioni dinamiche effettuate attraverso il software TRNSYS 17 (Transient System Simulation Program) per un impianto di trigenerazione progettato da PVR e in costruzione presso la casa di cura Villa Serena, sita a Forlì (Figura 1). PVR è un'azienda di Roccapiemonte (SA) che si occupa di risparmio ed efficientamento energetico degli edifici, oltre che alla progettazione, all'installazione e alla manutenzione di impianti di cogenerazione e di impianti di produzione energetica da fonti rinnovabili; in tale azienda si è svolta un'attività di tirocinio formativo al fine fornire informazioni sul comportamento dell'impianto simulato, risultati dal punto di vista energetico e garanzie sulla fattibilità tecnico-economica dello stesso).



Figura 1 - Casa di cura Villa Serena

Il caso studio

La casa di cura dispone di 147 posti letto, 35 ambulatori e 3 sale operatorie che permettono lo svolgersi di diverse attività ospedaliere. Il consumo energetico è pari a 1527,8 MWh elettrici e 165104 m³ di gas naturale (dati anno 2015). L'edificio è strutturato su sei livelli di cui uno è seminterrato per due metri circa, le tre sale operatorie presenti sono al terzo piano mentre al quinto piano sono presenti solo locali tecnici. Dopo un attento studio dell'edificio, è stato realizzato il modello geometrico tridimensionale mediante il software SketchUp, plug-in di TRNSYS3d, suddividendolo in quattro Zone Termiche (Piani, Seminterrato, Sottotetto e Sale Operatorie), mostrato in Figura 2:

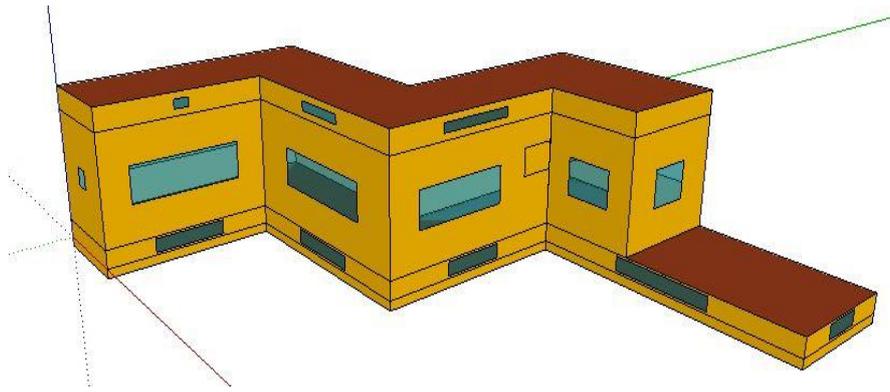


Figura 2 - Modello tridimensionale geometrico della casa di cura Villa Serena

Dopo aver realizzato il modello dell'edificio, grazie al software TRNBuild di TRNSYS, si sono identificate: la stratigrafia muraria, la tipologia di finestre, i carichi endogeni dovuti alla presenza di persone, apparecchi illuminanti e macchine, le portate di infiltrazione attraverso le finestre, le portate di ventilazione forzata, gli orari di programmazione di ogni attività svolta e i periodi giornalieri e stagionali di climatizzazione impostando, inoltre, i tempi di funzionamento dell'impianto e le temperature da raggiungere negli ambienti analizzati. Le informazioni sono state fornite da PVR ed ottenute da dati di letteratura su altre strutture ospedaliere, mentre i valori di temperatura e di ricambi d'aria orari fanno riferimento al Decreto del Presidente della Repubblica del 14 Gennaio 1997 (detto Decreto Bindi), recante requisiti minimi impiantistici per le sale operatorie e i principali reparti ospedalieri. L'edificio è stato suddiviso in quattro zone termiche poiché le zone in questione differiscono per: valori di temperatura di comfort invernale ed estivo, programmazione oraria di occupazione dei locali, numero di ricambi d'aria all'ora, carichi termici interni e stratigrafia delle pareti delimitanti; questo ha consentito di ottenere un'analisi con un livello di dettaglio maggiore. La modalità di funzionamento adottata dall'azienda per la casa di cura è il pilotaggio termico, per via dell'elevata richiesta termica che caratterizza le strutture ospedaliere. L'impianto di trigenerazione è composto da un motore alternativo a combustione interna da 140 kW_e e 207 kW_t , in grado di produrre energia elettrica ed energia termica mediante il recupero di calore dai gas di scarico, dall'acqua per il raffreddamento dell'olio e per il raffreddamento del mantello. In estate, quando la richiesta termica è bassa e all'incirca pari solo a quella necessaria per la produzione di acqua calda sanitaria, l'acqua calda prodotta dal cogeneratore viene inviata ad un assorbitore monostadio da $175,8 \text{ kW}_t$, collegato a sua volta ad una torre evaporativa da 425 kW . In questo modo, l'impianto trigenerativo progettato è in grado di soddisfare gran parte della richiesta energetica; la restante parte di energia elettrica richiesta è acquistata dalla rete, mentre una caldaia ed un chiller elettrico ausiliari intervengono per coprire totalmente la richiesta di energia termica e frigorifera (Figura 3).

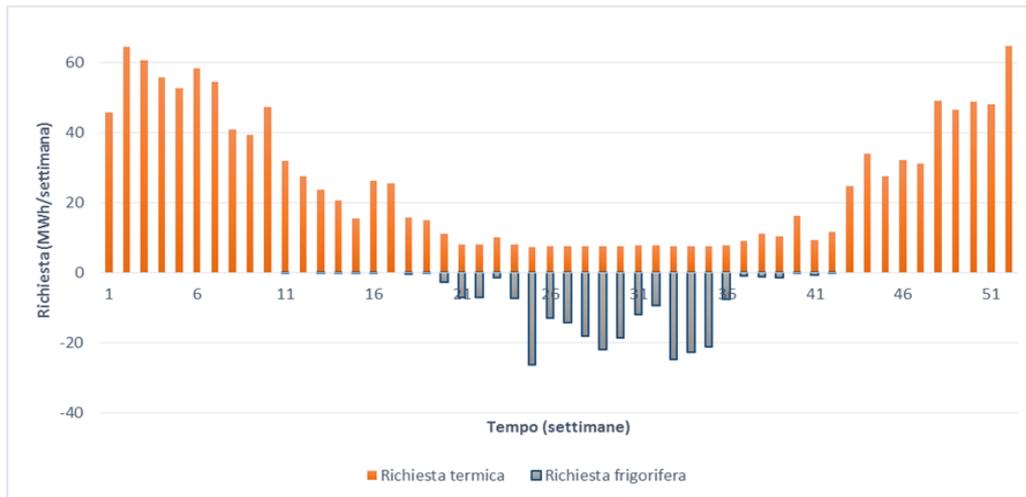


Figura 3 – Richiesta termica e frigorifera settimanale

Il carico termico e frigorifero sono stati stimati attraverso il software di simulazione dinamica adoperato. Per quanto riguarda il carico elettrico, non è stato possibile reperire i dati di prelievo orario dell'energia elettrica, assolutamente indispensabile per lo sviluppo del modello di simulazione dinamica. Per questo motivo, questo dato è stato ricostruito utilizzando il profilo orario di prelievo di energia elettrica di utenze simili disponibili in letteratura. Ovviamente, tali profili sono stati opportunamente calibrati al fine di ottenere una corrispondenza esatta con i dati aggregati di consumo ricavati dalle bollette dell'energia elettrica dell'utenza analizzata.

Layout dell'impianto

A partire dallo schema funzionale dell'impianto fornito da PVR, è stato realizzato il layout dell'impianto simulato, come mostrato in Figura 4:

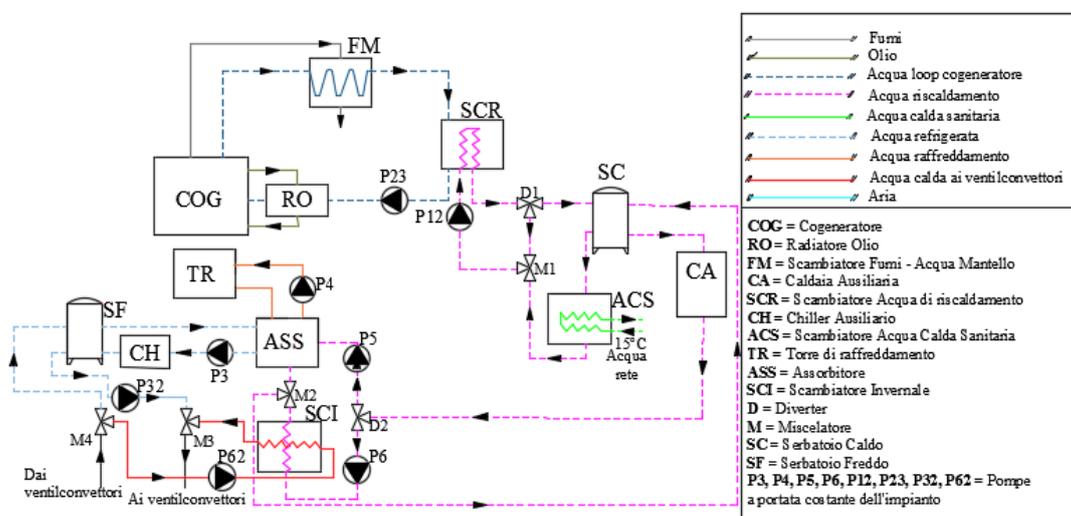


Figura 4 - Layout dell'impianto e principali circuiti

Controlli

Nel modello sono presenti diverse logiche di controllo che garantiscono il corretto funzionamento dell'impianto. Queste sono state realizzate grazie ai *Types* del software TRNSYS che svolgono le funzioni di un controllore. In particolare, sono state sviluppate ed implementate logiche inerenti il funzionamento del cogeneratore, della caldaia, dell'assorbitore, del chiller elettrico, delle pompe e dei fan coil. Ad esempio, i controlli sul cogeneratore sono stati implementati grazie all'utilizzo di tre *Types*: il controllore differenziale On/Off (*Type 2b*), il controllo proporzionale (*Type 1669*) e il controllo a retroazione (*Type 22*). Grazie al controllore differenziale On/Off la temperatura dell'acqua in ingresso allo scambiatore di calore dell'acqua di riscaldamento (SCR) non supera mai il valore dei 70°C (Figura 5); ciò garantisce che avvenga sempre un incremento di temperatura dell'acqua di riscaldamento del valore ΔT desiderato.

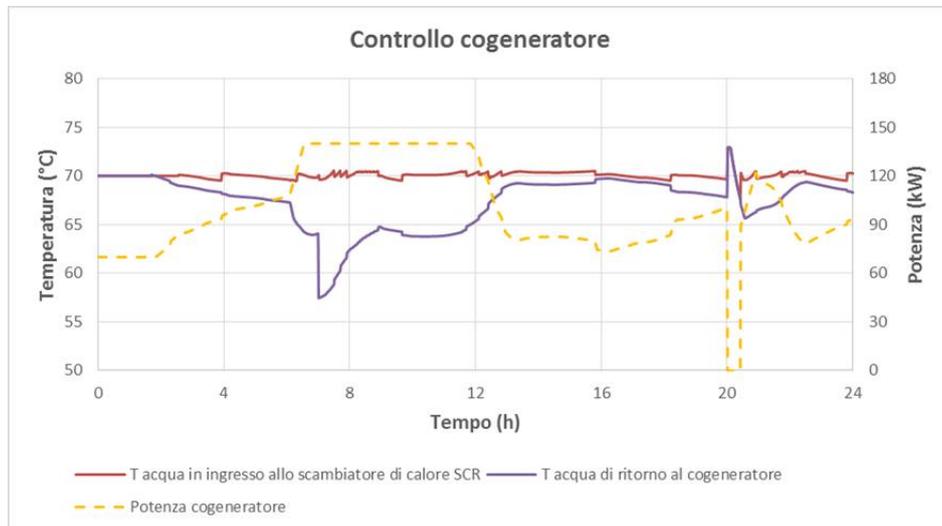


Figura 5 - Controllo cogeneratore (1)

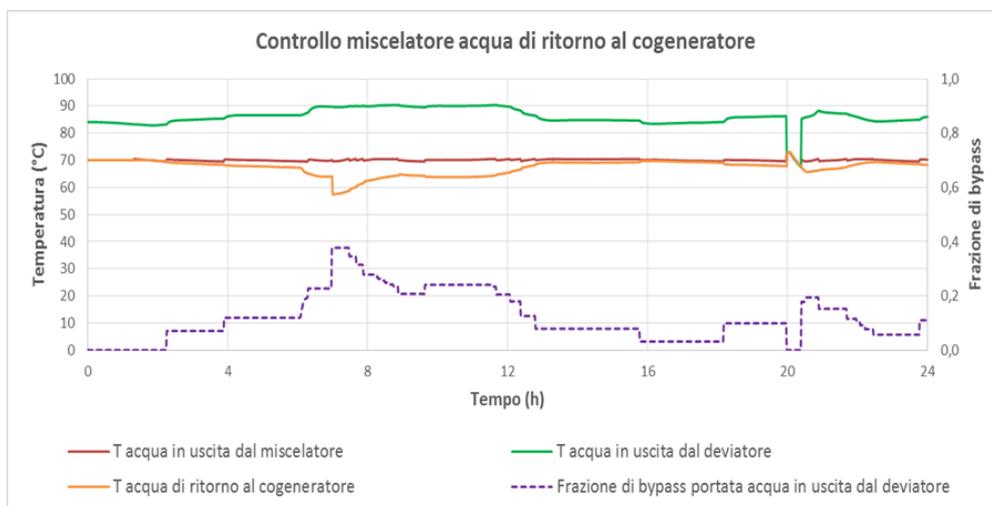


Figura 6 - Controllo cogeneratore (2)

Nel momento in cui la temperatura dell'acqua di ritorno supera i 72°C, infatti, il cogeneratore si spegne e riparte solo quando la stessa temperatura non scende al di sotto di 67,5°C. Il controllo proporzionale, invece, consente al cogeneratore di parzializzare in funzione della temperatura dell'acqua di ritorno; quando tale temperatura raggiunge (o scende al di sotto) dei 65°C, il cogeneratore funziona alla massima potenza, mentre se essa sale al di sopra dei 65°C, la potenza diminuisce fino al 50% al raggiungimento dei 70°C (Figura 5). Quando la temperatura dell'acqua di ritorno è invece troppo bassa, interviene un nuovo controllo (a retroazione), il quale governa l'apertura di un diverter collocato sulla mandata dell'acqua calda in uscita dallo scambiatore di calore SCR, spillando una parte di essa che viene inviata ad un miscelatore collocato subito prima dello scambiatore di calore SCR. Così, quando necessario, l'acqua ritorna al cogeneratore sempre alla temperatura di set point (70°C). Sull'asse secondario è presente il fattore di bypass della portata di acqua calda (ottenuto dal rapporto tra la portata spillata e la portata totale in ingresso al deviatore), che mostra il convogliamento di acqua calda al miscelatore nel momento in cui la temperatura dell'acqua di ritorno al cogeneratore scende al di sotto dei 70°C (Figura 6).

Il raggiungimento ed il mantenimento delle temperature di comfort sono garantite, invece, dal controllore PID, il quale riproduce fedelmente l'andamento delle temperature all'interno degli ambienti. Si riporta a titolo di esempio l'andamento delle temperature giornaliere per la Zona Piani per un giorno tipo del mese di Maggio (Figura 7), scelto appositamente per evidenziare la possibilità dei fan coil (ipotizzati a 4 tubi) di fornire, nell'arco della stessa giornata, sia caldo che freddo:

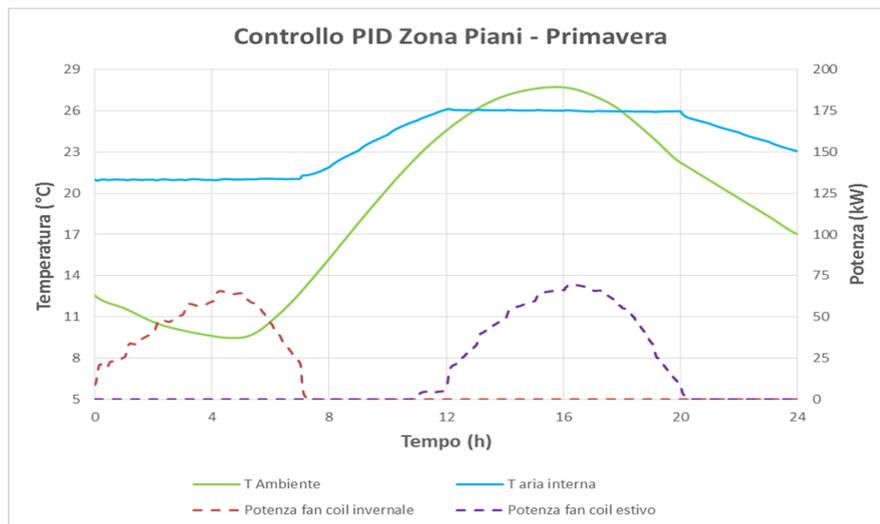


Figura 7 - Controllo PID Zona Piani (19 Maggio)

Analisi energetica ed economica

In seguito alla modellazione e alla simulazione dinamica dell'impianto, è stata effettuata un'analisi energetica ed economica al fine di verificarne gli eventuali benefici apportati dal sistema proposto. L'unità trigenerativa è in grado di produrre 808 MWh/anno di energia elettrica (di cui 9 MWh/anno assorbiti prevalentemente dalle pompe di circolazione, dall'assorbitore e dalla torre evaporativa), 1069 MWh/anno di energia termica (non avendo considerato l'aliquota in ingresso all'assorbitore) e 156 MWh/anno di energia frigorifera, coprendo il 54% della richiesta elettrica, il 78% di quella termica ed il 64% di quella frigorifera. A fronte di un investimento di 350000 € e 104770 €/anno di costi operativi, il SPB stimato è di 4,4 anni e il VAN di 475009 €, grazie ai 184254 €/anno di ricavi ottenuti.

Modalità di funzionamento alternative

Nell'elaborato sono state proposte, inoltre, altre due modalità di funzionamento alternative al semplice pilotaggio termico, risultando entrambe più vantaggiose dal punto di vista energetico ed economico. La prima consiste in un pilotaggio termico senza parzializzazione del motore; in questo modo, pur aumentando i costi di manutenzione dovuti ai maggiori spegnimenti e accensioni, vengono prodotti in più circa 60 MWh/anno di energia elettrica, circa 25 MWh/anno di energia termica utile e 2 MWh/anno di energia frigorifera. In questa modalità, mentre la percentuale di copertura del fabbisogno di energia termica e frigorifera non varia significativamente, la percentuale di copertura del fabbisogno elettrico sale al 58%, grazie alla maggiore efficienza ottenuta lavorando a pieno carico. Il SPB stimato è di 4,2 anni e il VAN di 516337€.

L'ultima modalità di funzionamento proposta è il pilotaggio elettrico; per realizzarla, è stato necessario modificare l'impianto progettato con l'introduzione di un dissipatore di calore. Questa soluzione si è dimostrata essere la migliore in assoluto, avendo stimato un SPB di 4 anni e un VAN di 580709 €. Dal punto di vista energetico, in confronto al semplice pilotaggio termico, vengono prodotti in più, infatti, 400 MWh/anno di energia elettrica, circa 30 MWh/anno di energia frigorifera e circa 500 MWh/anno di energia termica. In questa modalità di funzionamento, il cogeneratore non effettua nessun arresto; di contro, però, vi è una dissipazione di energia termica pari a 490 MWh/anno ed il consumo di energia primaria aumenta più del 50%. Questo comporta una riduzione del rendimento globale che passa rispettivamente da 0,899 a 0,756; tuttavia, anche se di poco, il rendimento globale è ancora maggiore di 0,75 e ciò consente di poter considerare a pieno la

produzione energetica senza l'introduzione della macchina equivalente. Le percentuali di copertura del fabbisogno elettrico, termico e frigorifero sono, rispettivamente, dell'81%, 75% e 75%.

In Tabella 1 si riporta il confronto tra le analisi energetiche delle tre modalità di funzionamento in esame:

	Pilotaggio termico	Pilotaggio termico senza parzializzazione	Pilotaggio elettrico
Energia elettrica cogeneratore	808	869	MWh/anno
Energia acqua refrigerata ACH	156	158	
Energia acqua raffrescamento ACH	350	361	
Energia termica in ingresso all'ACH	192	202	
Energia termica caldaia	330	323	
Energia frigorifera chiller	90	89	
Energia termica FM	479	481	
Energia termica SCR	1261	1285	
Energia termica SCI	995	996	
Energia termica ACS	393	397	
$\eta_{el,cog}$	35,1%	36,5%	
$\eta_{t,cog-lordo}$	54,8%	53,9%	
$\eta_{t,cog-effettivo}$	54,3%	53,4%	
Numero accensioni all'anno	4700	5528	
Ore equivalenti	5768	6209	8594

Tabella 1 – Confronto analisi energetiche tra la modalità a pilotaggio termico, pilotaggio termico senza parzializzazione e a pilotaggio elettrico

Per completare l'analisi, però, occorre valutare anche la redditività economica dei sistemi proposti (Tabella 2). I bilanci economici sono stati valutati considerando le normative attualmente vigenti, riguardanti gli incentivi fiscali sul gas naturale (Delibera AEEG n. 16/98, nota delle Agenzie delle Dogane n. 75649 del 6 settembre 2011, L. 44/2012), la Cogenerazione ad Alto rendimento (CAR), definita dal D.M. 4 agosto 2011, i certificati bianchi (D.M. 5 settembre 2011) e il regime agevolato per il pagamento degli oneri generali di sistema elettrico sull'energia autoconsumata, nel caso di sistemi qualificati come SEU - Sistemi Efficienti di Utente (Delibera AEEGSI 578/2013/R/eel e s.m.i.).

	Pilotaggio termico	Pilotaggio termico senza parzializzazione	Pilotaggio elettrico	Unità di misura
Rendimento globale	0,899	0,903	0,756	-
Risparmio di energia primaria nell'anno solare	976	1062	936	MWh/anno
PES	23%	24%	14%	-
Consumo di gas caldaia	40014	39162	47876	Sm ³ /anno
Consumo di gas totale	279992	288011	393886	
Consumo di gas defiscalizzato	177652	191245	264710	
Recupero Certificati bianchi	11800	12800	113000	€/anno
Costo evitato raffrescamento	7285	7344	8569	
Costo evitato riscaldamento & ACS	64691	64995	66935	
Costo evitato energia elettrica	109821	117511	166438	
Vendita energia elettrica	683	1030	0	
Costo evitato totale	182480	190880	241941	
Imposte energia elettrica	10094	10886	15040	
Ricavi	184254	192928	238284	
Costo combustibile	91511	93973	128459	
Oneri di sistema	1147	1147	1147	
Manutenzione	12113	14343	18048	
Costi di gestione	104770	109463	147654	
Differenza Ricavi/Costi	79483	83465	90630	
Investimento totale	350000	350000	360000	€
SPB	4,4	4,2	4	anni
VAN	475009	516337	580709	€
IP	1,36	1,48	1,613	-

Tabella 2 – Confronto analisi economiche tra la modalità a pilotaggio termico, pilotaggio termico senza parzializzazione e a pilotaggio elettrico

In Figura 8 si presenta il confronto sulla produzione energetica e sul consumo di energia primaria nelle diverse modalità di funzionamento analizzate, mentre in Figura 9 il confronto sulle percentuali di copertura del fabbisogno energetico.

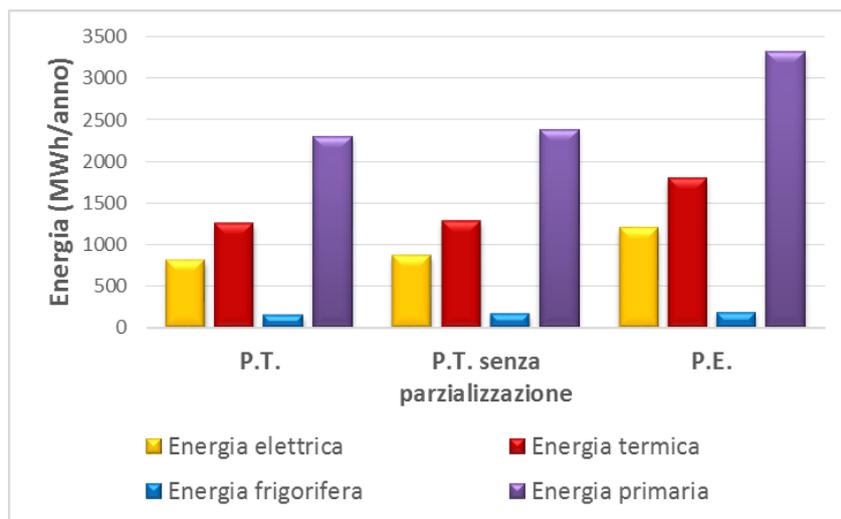


Figura 8 – Confronto sulla produzione energetica e sul consumo di energia primaria

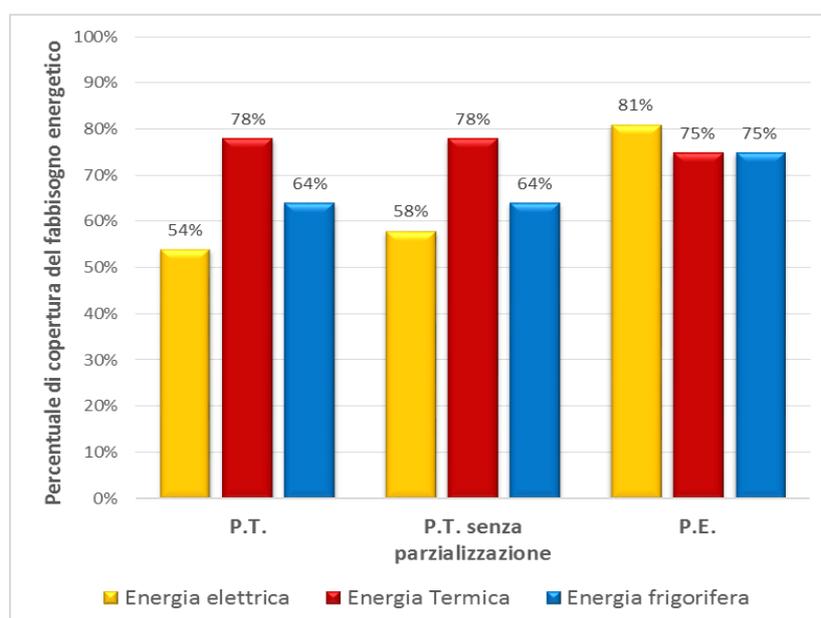


Figura 9 – Confronto sulla copertura percentuale del fabbisogno energetico

Lo studio effettuato evidenzia i benefici ottenibili dall'installazione dell'impianto di trigenerazione presso la casa di cura Villa Serena dal punto di vista energetico ed economico rispetto al sistema tradizionale; sono state poi proposte due modalità di funzionamento alternative che hanno presentato comunque ottimi risultati, necessitando tuttavia di un sistema di controllo più raffinato.