

Abstract

Oggetto di studio di questo lavoro è lo sviluppo numerico e sperimentale di un impianto di cogenerazione da digestione anaerobica alimentata da reflui zootecnici.

La prima parte del lavoro di tesi si è concentrata sullo studio delle tecnologie disponibili per gli impianti di digestione anaerobica e sui processi.

In particolare, sono stati studiati:

1. *digestore discontinuo completamente miscelato (BATCH);*
2. *digestore continuo con flusso a pistone (PFR);*
3. *digestore continuo completamente miscelato (CSTR).*

Successivamente si è passati all'analisi dell'impianto.

L'impianto, oggetto di studio, è ubicato nel Comune di Canello ed Arnone (CE). L'azienda si sviluppa su un lotto della superficie di circa 35.000 m² di cui 16.000 m² sono occupati dall'attività agricola di allevamento bufalino.

L'azienda agricola ospita circa 900 capi bufalini identificati per classi di età come indicato nella tabella sottostante:

Tabella 1 Consistenza aziendale

Consistenza aziendale	n° capi	Peso vivo
		[kg/capo]
Capi in lattazione	370	500
Capi in asciutta	150	500
Capi in accrescimento (1-2 anni)	240	250
Capi giovani (0-12 mesi)	140	60
n° Capi TOTALE	900	

Di seguito si riporta il layout schematico dei componenti principali costituenti l'impianto:

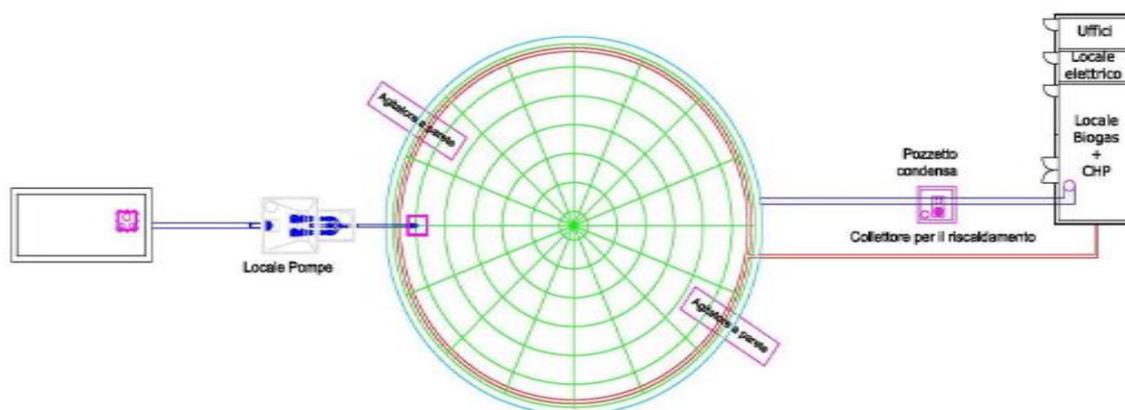


Figura 1 Schema dell'impianto

I liquami prodotti in azienda vengono raccolti mediante raschiatori meccanici in una canaletta di testata e stoccati nella prevasca. È caratterizzata da un sistema di agitazione, ma non di un sistema di riscaldamento, a differenza del digestore. La prevasca di stoccaggio dei substrati liquidi è dimensionata per contenere volumi di substrati che alimentano l'impianto per un periodo di 48 ore. È buona norma contenere i tempi di stoccaggio della matrice nella suddetta prevasca al fine di limitare la fermentazione e quindi le perdite di biogas.

Il digestore anaerobico è realizzato con una vasca in cemento armato di forma cilindrica di dimensioni pari a 20 m di diametro per 6 m di altezza (capacità complessiva 1900 m³ circa), le cui superfici esterne, sia laterale che di base, sono coibentate con materiale isolante per ridurre al minimo le dispersioni termiche. Le superfici laterali sono, inoltre, rivestite di lamiera grecata al fine di aumentare la protezione e ridurre al minimo le dispersioni termiche. L'interno è riscaldato e mantenuto ad una temperatura di 42°C (digestione anaerobica in campo mesofilo) mediante un opportuno sistema di riscaldamento. Quest'ultimo è costituito dalle varie condotte e scambiatori di calore, permette il trasferimento del calore dal cogeneratore al digestore. Grazie all'utilizzo di un fluido termovettore naturale come l'acqua, il calore viene distribuito sulle superfici laterali interne e quella di base del digestore attraverso un sistema di tubi radianti in acciaio inox fissati sui muri perimetrali del digestore, ad un'altezza circa di 1,00 m dal pavimento. Il digestore è dotato di una cupola gasometrica collocata sulla superficie superiore ed è completo di agitatori laterali ad immersione, dotati di motore elettrico impermeabile ai gas.

Il biogas in uscita dal digestore anaerobico viene depurato al fine di garantire un funzionamento efficiente del cogeneratore. Nel biogas prodotto sono presenti composti con proprietà ossidanti e poco combustibili, i quali dovranno essere eliminati o ridotti al minimo per ottenere una buona combustione.

Il gas in uscita dal processo biologico di digestione anaerobica ha una temperatura di circa 37-40°C con un alto grado di umidità, che favorisce la formazione di condensa, quindi deve essere effettuata una deumidificazione, prima del processo di combustione; attraverso l'impiego di un impianto di condensazione composto da un frigorifero ad espansione diretta, uno scambiatore a fascio tubiero acqua/biogas ed un filtro a coalescenza dove viene condensato, il vapore acqueo verrà poi scaricato.

Il processo di desolfurazione biologica è realizzato mediante l'istallazione di una rete in plastica posta sotto la cupola gasometrica, sopra le travi che collegano il pilastro centrale del digestore alle pareti. I batteri chemioautotrofi utilizzando l'acido solfidrico H_2S per i loro scopi metabolici, lo trasforma in acqua e zolfo cristallizzato, inerte rispetto al processo di digestione anaerobica. L'ossigeno necessario ai batteri per ossidare lo zolfo viene raccolto dall'ambiente tramite adduzione controllata.

Il gruppo di cogenerazione è costituito dall'accoppiamento di un motore a combustione interna, alimentato a biogas (ciclo Otto), con un generatore elettrico (Gruppo Elettrogeno) e dal sistema di recupero dell'energia termica generata (Modulo Termico).

Il recupero di tale energia avviene attraverso il circuito di raffreddamento motore (testa cilindri), integrato dal raffreddamento dell'olio lubrificante, e dallo scambio termico con i gas di scarico. Risulta quindi possibile ottenere in uscita acqua calda. Il circuito idraulico di recupero dell'energia termica è disaccoppiato dal circuito di utenza attraverso uno scambiatore di calore.

A bordo macchina sono installate tutte le protezioni previste dalla normativa dei VV.F. relativamente a parametri fondamentali, tra cui massima temperatura circuito, bassa pressione olio, etc.

Il servizio di parallelo con la rete elettrica di distribuzione, che prevede prima la trasformazione della tensione dalla BT (400V) alla MT (2000V) e poi il collegamento alla rete, è effettuato tramite un apposito dispositivo omologato ENEL, che protegge la macchina, arrestandone il funzionamento, in caso di anomalie sulla linea.

L'impianto descritto in precedenza è stato analizzato sia dal punto di vista numerico che sperimentale. In particolare, si è realizzata una campagna di misura con lo scopo di monitorare i principali parametri di funzionamento dell'impianto. Allo stesso tempo, è stato

sviluppato un modello di simulazione del digestore del tipo zero e mono dimensionale in regime stazionario.

Sono stati raccolti una serie di dati sperimentali, tra cui:

1. temperatura del liquame all'interno del digestore

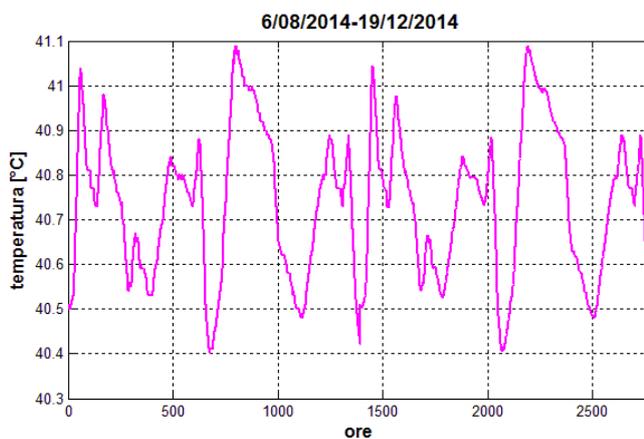


Figura 2 temperatura del liquame misurata all'interno del digestore

2. percentuale di riempimento della cupola gasometrica, altezza del liquame all'interno del digestore

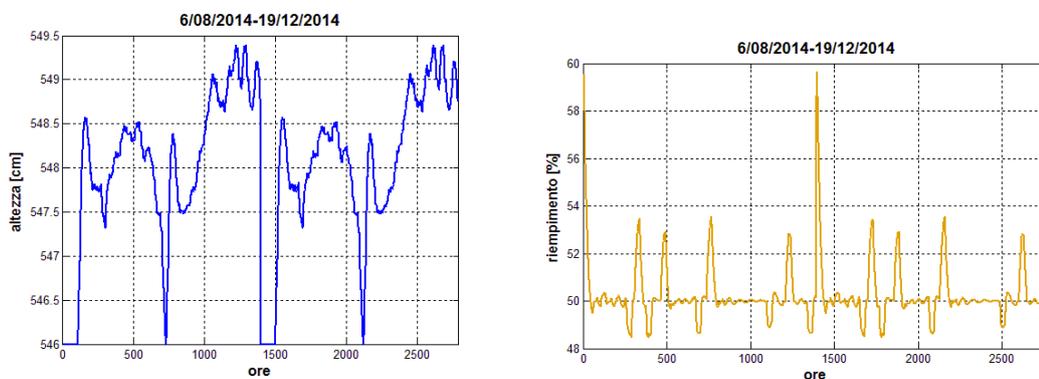


Figura 3 Altezza del liquame e percentuale di riempimento della cupola gasometrica

3. composizione del biogas

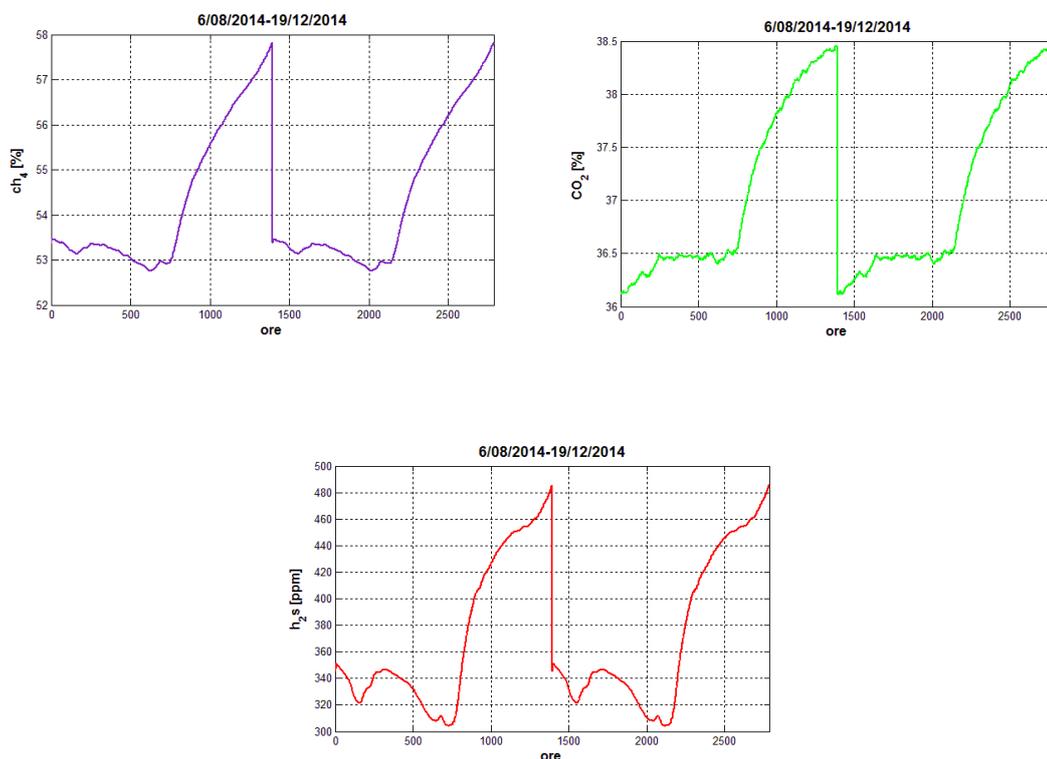


Figura 4 composizione del biogas misurata

Dall'analisi dei risultati riportati si può notare che il funzionamento dell'impianto è sostanzialmente stazionario infatti la temperatura del liquame all'interno del digestore è costante con oscillazioni di $\pm 1^\circ C$. Analogamente la percentuale di riempimento della cupola gasometrica si mantiene praticamente costante nel range 48-54%. L'altezza del liquame all'interno del digestore rimane pressoché invariata, oscilla tra un valore minimo di 5,46 m e un valore massimo di 5,49 m.

La stazionarietà delle condizioni si notano anche nella composizione percentuale di biogas, infatti la percentuale di metano si mantiene sempre intorno al 52-55%.

Questo risultato è di grande importanza perché validerà la successiva ipotesi di regime stazionario che verrà utilizzata nel modello.

Poiché risultavano mancanti i dati riguardanti le portate di acqua del sistema di riscaldamento del digestore si è resa necessaria la misura di tali valori.

Allo scopo è stato utilizzato un misuratore ad ultrasuoni di tipo clamp-on, in particolare lo strumento adottato è il Siemens Sitrans F.



Figura 5 Siemens Sitrans F



Figura 6 Set-up sperimentale per la misura della portata d'acqua che alimenta il digestore

In questo caso la portata misurata è risultata pari a $6,82 \text{ m}^3/\text{h}$.

Parallelamente all'analisi sperimentale, è stato sviluppato un modello di simulazione del digestore. Il modello è costruito attraverso il bilancio di energia di ciascun elemento identificato in Figura 7.

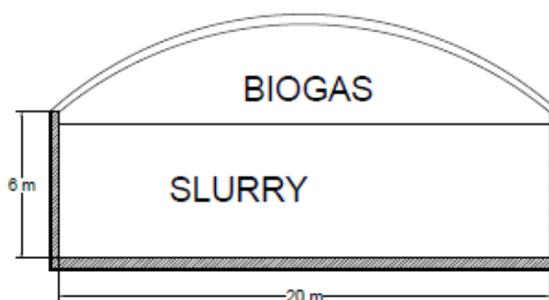


Figura 7 Sezione generale del digestore simulato nel modello 1-D

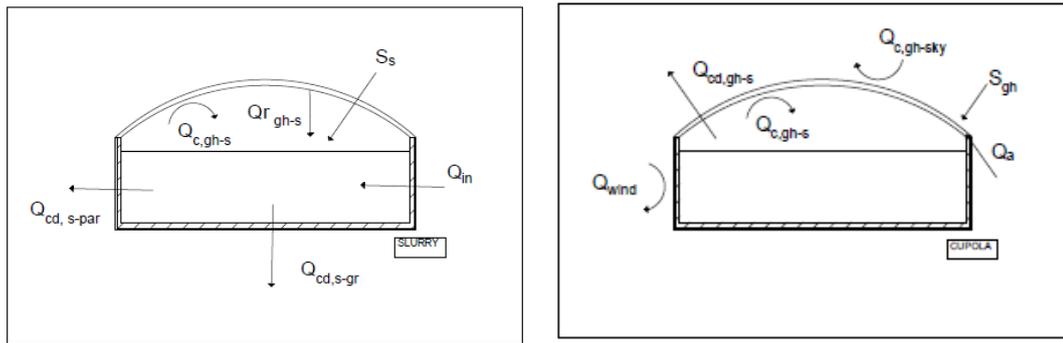


Figura 8 Schema digestore e di tutti gli elementi che lo costituiscono

Le ipotesi del modello sono:

1. Ogni elemento del sistema è rappresentato da un singolo valore di temperatura (1D);
2. Le radiazioni infrarosse non sono assorbite dal gas;
3. Le perdite di calore per evaporazione all'interno del digestore e la portata massica del gas sono trascurate;
4. La radiazione riflessa all'interno del sistema è trascurata;
5. Si assume che il calore generato dai microrganismi è trascurabile;
6. Le proprietà dei liquami aggiunti nel sistema sono assunte equivalenti alle proprietà del liquame ad eccezione della temperatura;
7. Le proprietà del terreno (calore specifico, conducibilità termica e densità) sono assunte costanti lungo tutta la profondità;
8. La temperatura del terreno è assunta pari alla temperatura esterna.

Il modello valuta gli scambi per convezione e per trasmissione attraverso le superfici verticali, la superficie superiore e l'irraggiamento della cupola.

Il modello è stato sviluppato in ambiente MATLAB, prendendo in considerazione un periodo di 1 anno.

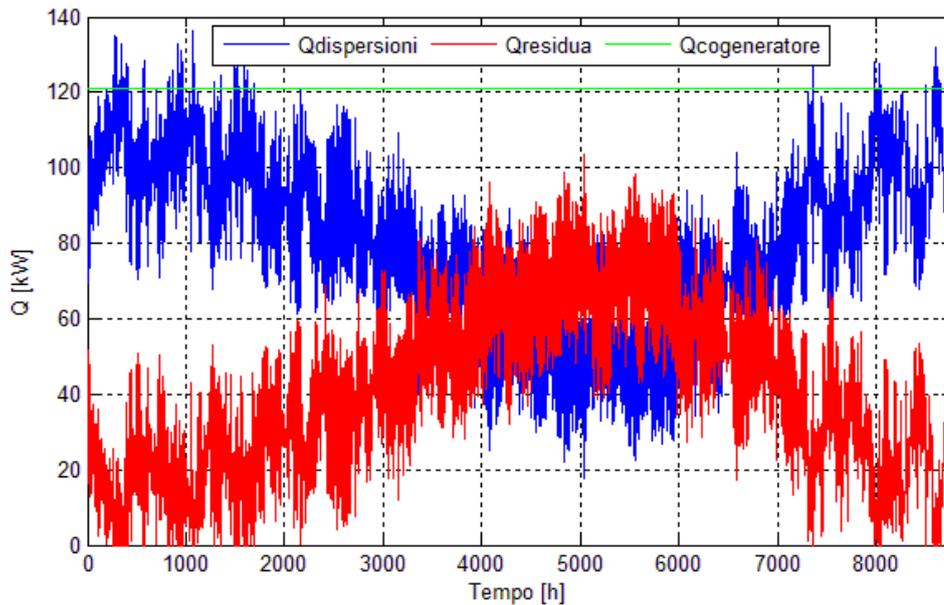


Figura 9 Potenza termica dissipata, potenza termica residua e potenza termica del cogeneratore durante l'anno

Dalle analisi effettuate risulta evidente che la potenza termica erogata dal cogeneratore è sufficiente a garantire il riscaldamento del digestore, nella quasi totalità dei giorni dell'anno. Si riporta l'andamento di due mesi (inverno, estate).

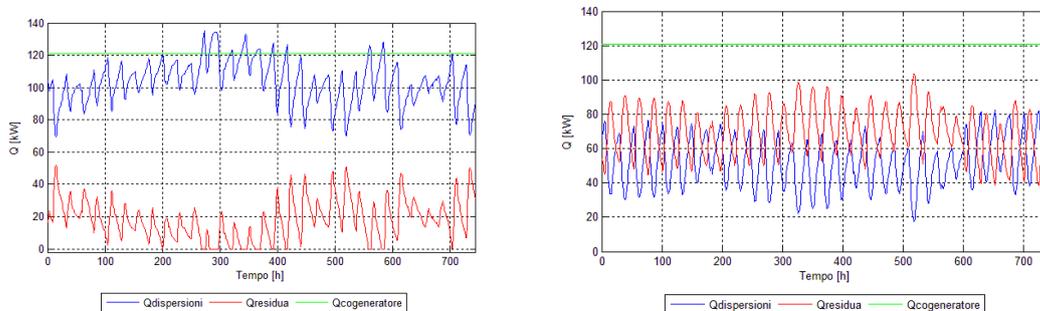


Figura 10 Potenza termica dissipata, potenza termica residua e potenza termica del cogeneratore nel mese di Gennaio e nel mese di Agosto

Dal grafico relativo al mese di Gennaio si nota che le dispersioni massime sono di circa 130 kW, mentre nel mese di Agosto sono di circa 80 kW. Dal confronto si nota che le dispersioni diminuiscono significativamente questo è dovuto all'effetto della riduzione della temperatura esterna e al guadagno solare che si ha nei mesi estivi.

Si mostra, anche, il grafico riepilogativo in cui si riportano le incidenze delle varie aliquote di energia dispersa. Dal diagramma appare evidente che la maggiore aliquota di energia è

dispersa attraverso la copertura. Mentre le dispersioni attraverso le pareti e la pavimentazione risultano contenute questo è dovuto sicuramente al miglior isolamento di questi elementi che incrementano il termine conduttivo del coefficiente di scambio termico globale.

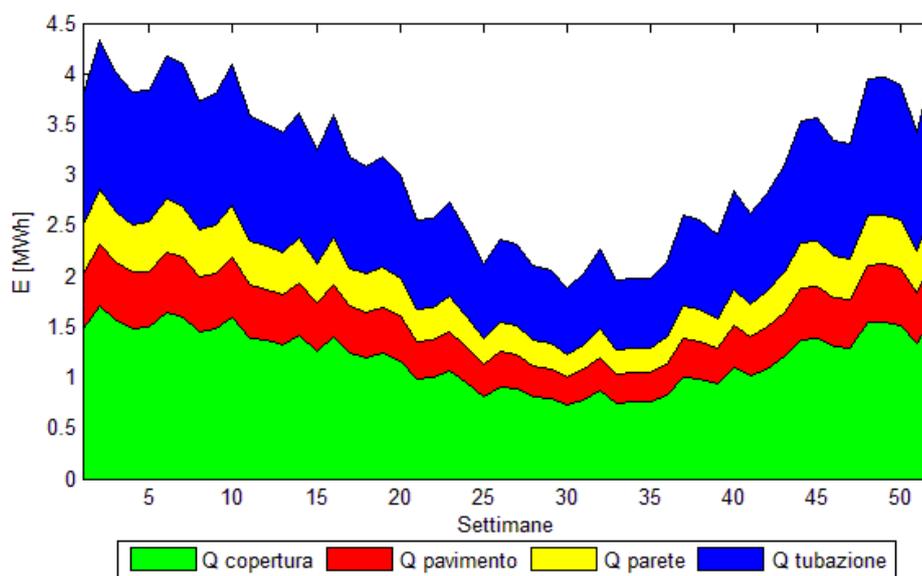


Figura 11 Diagramma ad area dell'energia dispersa al digestore

Sulla base del modello di simulazione precedentemente presentato è stato possibile calcolare l'energia termica resa disponibile a valle dell'utilizzo del digestore. Di questa energia termica i possibili utilizzi sono acqua calda sanitaria, riscaldamento e raffrescamento ambientale.

Poiché non si hanno a disposizione i dati di consumo e non è possibile realizzare un modello di simulazione dell'edificio, si sono creati vari scenari di utilizzo di questa energia termica.

Per questo motivo si considerano:

1. Scenario 1. Vendita solo energia elettrica
2. Scenario 2. Vendita energia elettrica + costo evitato energia termica residua per uso agricolo o accoppiamento con una macchina ad assorbimento
3. Scenario 3. Vendita energia elettrica + costo evitato energia termica per riscaldamento invernale.

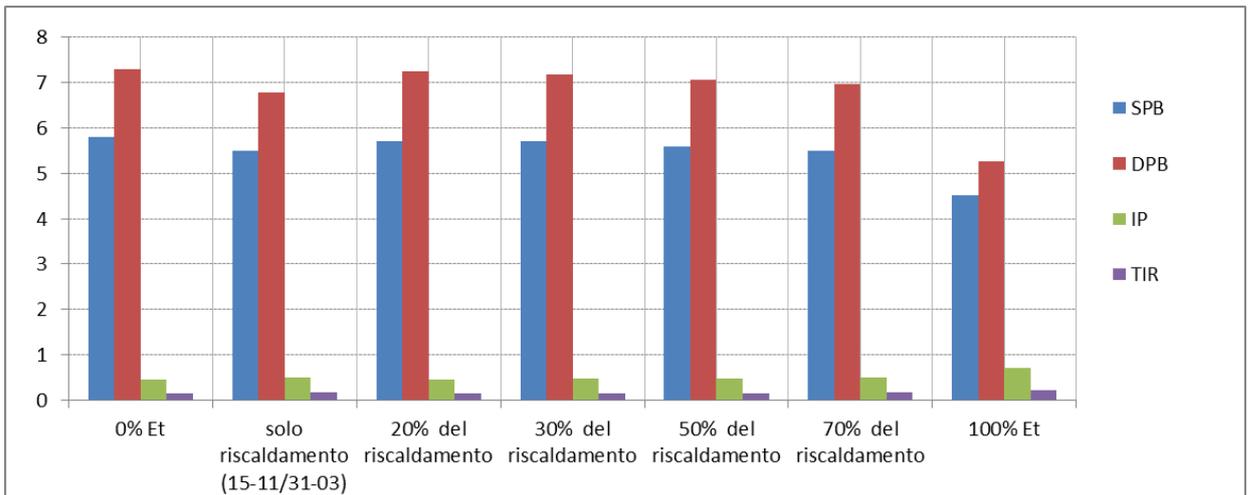


Figura 12 SPB, DPB, IP, VAN e TIR

La prima barra del grafico considera che nulla del calore disponibile a valle dell'utilizzo del digestore sia utilizzato. Nell'ultima barra si considera che tutto il calore viene utilizzato nel senso che il calore disponibile in inverno viene utilizzato per il riscaldamento ambiente, mentre il calore disponibile in estate viene inviato ad una macchina ad assorbimento per produrre energia frigorifera. Nei rimanenti casi si va a valutare la parziale utilizzazione dell'energia termica nel caso di solo riscaldamento invernale, quindi l'energia termica in estate verrà dispersa.

Dal grafico su riportato è chiaro che all'aumentare della percentuale di utilizzazione dell'energia termica aumenta l'IP. Per quanto riguarda il DPB, invece, questo diminuisce al variare della percentuale di utilizzazione.

L'IP aumenta di 0,26 passando dai ricavi minimi (0% E_T) ai ricavi massimi (100% E_T), mentre l'DPB diminuisce di circa 2 anni.