



Ricerca di Sistema elettrico

Sistemi di microgenerazione per lo sfruttamento di biogas finalizzati alla produzione di acqua calda sanitaria nelle piccole isole – (anno 2 di 3)

M. A. Ancona, L. Branchini, A. De Pascale, F. Ferrari, F. Melino, S. Ottaviano



SISTEMI DI MICROCOGENERAZIONE PER LO SFRUTTAMENTO DI BIOGAS FINALIZZATI ALLA PRODUZIONE DI ACQUA CALDA SANITARIA NELLE PICCOLE ISOLE – (ANNO 2 DI 3)

M. A. Ancona, L. Branchini, A. De Pascale, F. Ferrari, F. Melino, S. Ottaviano (Dipartimento di Ingegneria Industriale – Alma Mater Studiorum – Università di Bologna)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *4 - Reti energetiche integrate*

Linea di attività: *LA4.7 - Sistemi di microcogenerazione per lo sfruttamento di biogas finalizzati alla produzione di acqua calda sanitaria nelle piccole isole – (anno 2 di 3)*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package (LA4.1-LA4.15): Paolo Sdringola, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Sistemi ibridi di accumulo per l'incremento dello sfruttamento della risorsa rinnovabile nell'ambito delle comunità energetiche e Sistemi di microcogenerazione per lo sfruttamento di biogas finalizzati alla produzione di acqua calda sanitaria nelle piccole isole”*



Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 ARCHITETTURA DEL SISTEMA INTEGRATO	7
2.1 ARCHITETTURA DEL SISTEMA INTEGRATO DIGESTORE ANAEROBICO + MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA	7
2.2 ARCHITETTURA DEL SISTEMA INTEGRATO DIGESTORE ANAEROBICO + SISTEMA ORC	8
3 PROGETTAZIONE DEI BANCHI PROVA	10
3.1 PROGETTAZIONE DEL BANCO PROVA SPERIMENTALE RELATIVO AL MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA	10
3.2 PROGETTAZIONE DEL BANCO PROVA SPERIMENTALE RELATIVO AL DIGESTORE ANAEROBICO	17
3.3 BANCO PROVA SPERIMENTALE – CICLO RANKINE ORGANICO	23
4 INSTALLAZIONE DEI BANCHI PROVA	32
4.1 INSTALLAZIONE DEL BANCO PROVA SPERIMENTALE – MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA	32
4.1.1 <i>Prove preliminari per la caratterizzazione sperimentale del motore a combustione interna</i>	37
4.2 INSTALLAZIONE DEL BANCO PROVA SPERIMENTALE – DIGESTORE ANAEROBICO	41
4.3 BANCO PROVA SPERIMENTALE – ORC	44
4.3.1 <i>Risultati sperimentali preliminari</i>	49
5 CONCLUSIONI	56
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	58
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	59
8 INDICE DELLE FIGURE	60
9 INDICE DELLE TABELLE	63
10 CURRICULUM DEL GRUPPO DI LAVORO	64

Sommario

Il presente documento è il risultato della collaborazione tra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, avente l'obiettivo di condurre l'analisi di *Sistemi di microcogenerazione per lo sfruttamento di biogas finalizzati alla produzione di acqua calda sanitaria nelle piccole isole*. Tale collaborazione nasce all'interno dell'Accordo di Programma che il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato nel 2019 finalizzato all'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2019-2021 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

Il presente documento descrive la ricerca svolta durante la seconda annualità.

La linea di attività del secondo anno (LA#4.7_UniBologna-BIOGAS) è dedicata alla definizione, progettazione ed installazione di banchi prova per la caratterizzazione dei dispositivi digestore anaerobico e micro-cogeneratore. In particolare, in accordo con ENEA e sulla base dei risultati della precedente annualità (LA#4.6_UniBologna-BIOGAS), si è deciso di testare due diverse tecnologie di micro-cogenerazione, un motore a combustione interna ed un sistema basato sulla tecnologia ORC (Organic Rankine Cycle).

I banchi prova, che sono stati installati presso i laboratori dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, sono stati inizialmente progettati per testare i due componenti (digestore e micro-cogeneratore) separatamente, al fine di poterli caratterizzare con maggiore semplicità operativa e flessibilità. In tale fase si ipotizza pertanto di testare il digestore anaerobico (analizzando con gli opportuni strumenti di misura – tra le altre cose – la qualità e le caratteristiche del biogas prodotto) e contemporaneamente testare il micro-cogeneratore con miscele di gas simulato (ad esempio miscele di CH₄ e CO₂) sulla base delle evidenze sperimentali.

Lo studio svolto durante la seconda annualità è suddiviso in due fasi, così come di seguito illustrato:

- Fase I – Progettazione del banco prova: in tale fase si è proceduto alla definizione dei banchi prova per la caratterizzazione di un digestore anaerobico di piccola taglia e dei micro-cogeneratori ad esso integrabili. I due banchi prova che testano due diverse tecnologie per la micro-cogenerazione sono evidentemente da intendersi come alternative per l'applicazione residenziale studiata. Nel dettaglio, in questa fase sono stati individuati tutti i dispositivi per la misura, il controllo e l'analisi necessari alla sperimentazione in oggetto oltre che definiti tutti i sistemi ausiliari necessari.
- Fase II – Installazione del banco prova: in tale fase si è proceduto all'installazione dei banchi prova e dei relativi dispositivi (digestore anaerobico, micro-cogeneratori, sistemi di misura e controllo, sistemi ausiliari, carichi elettronici, ecc.), integrando attrezzature già presenti presso i laboratori dell'Alma Mater Studiorum Università di Bologna con altri componenti ad hoc, e sono state svolte alcune prime analisi sperimentali.

1 Introduzione

Il presente documento è il risultato della collaborazione tra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, finalizzata all'analisi di *Sistemi di microgenerazione per lo sfruttamento di biogas finalizzati alla produzione di acqua calda sanitaria nelle piccole isole*. Tale collaborazione nasce all'interno dell'Accordo di Programma che il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato nel 2019 finalizzato all'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2019-2021 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale. I temi sviluppati nell'ambito dell'accordo tra ENEA e il dipartimento DIN dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna riguardano la possibilità di installare sistemi per la produzione e successiva riconversione di biogas nel contesto di piccole isole non raggiunte dalla rete gas e con una connessione elettrica al continente (mediante connessione sottomarine già esistenti) di ridotta capacità.

Lo studio presentato rientra nell'ambito della ricerca di soluzioni finalizzate al conseguimento di una indipendenza energetica delle utenze site in piccole isole, nonché di una maggiore efficienza energetica e di una riduzione dei costi di produzione. L'obiettivo finale è pertanto quello di favorire lo sviluppo di sistemi di auto-produzione di piccola taglia tali da garantire flussi energetici (elettrici e sotto forma di gas) indipendenti dalla connessione con il continente. L'attività di ricerca, in tale contesto, si inquadra quindi verso lo studio di un sistema integrato composto da un digestore anaerobico e da un micro-cogeneratore, entrambi di piccola taglia in considerazione della tipologia di utenza (residenziale/domestica). L'obiettivo è, infatti, quello di analizzare la possibilità di produrre localmente (presso un'utenza domestica) biogas a partire dalla digestione anaerobica di una biomassa costituita dai rifiuti alimentari domestici e di reimpiegare successivamente il biogas prodotto all'interno di un sistema micro-cogenerativo, al fine di produrre energia elettrica e termica che possa coprire – totalmente o parzialmente – i fabbisogni elettrici e di acqua calda sanitaria dell'utenza stessa. In tal modo, si stima di ridurre i consumi di energia elettrica (importata dal continente mediante le connessioni sottomarine esistenti), attualmente finalizzati al soddisfacimento dei fabbisogni elettrici e termici per produzione di acqua calda sanitaria.

Durante la prima annualità (LA#4.6_UniBologna-BIOGAS) [1], nell'ambito della prima fase dell'attività di ricerca condotta, sono stati studiati lo stato dell'arte delle tecnologie di digestione anaerobica ed i parametri chiave che ne influenzano il processo, consentendo la definizione di un modello di calcolo (con approccio di tipo "black box") in grado di simulare il comportamento di un digestore anaerobico al variare delle condizioni al contorno (quali ad esempio la composizione della biomassa in input al digestore e la concentrazione della biomassa all'interno del substrato). Tale modello matematico è basato su bilanci di massa che coinvolgono la biomassa, il substrato organico e il biogas prodotto e consente di stimare le caratteristiche e la composizione del biogas prodotto sulla base delle caratteristiche della corrente in input al digestore. In una fase successiva della ricerca, il modello sviluppato è stato impiegato, unitamente ai fabbisogni di acqua calda sanitaria ed energia elettrica di un'utenza domestica concordata con ENEA e rappresentativa del contesto che si intende analizzare (le piccole isole), per definire la taglia del sistema integrato di produzione e riconversione del biogas. Tale analisi ha, tra le altre cose, consentito di orientare la ricerca di mercato che è stata condotta per individuare alcuni possibili digestori anaerobici in commercio idonei per l'applicazione oggetto di analisi. Inoltre, nella seconda fase dell'attività di ricerca svolta durante la prima annualità, dopo un'analisi sullo stato dell'arte delle diverse tecnologie cogenerative di piccola taglia per la conversione del biogas (microturbine a gas, motori a combustione interna, motori Stirling, celle a combustibile e cicli Rankine organici), sono stati individuati – tramite un'analisi di mercato – alcuni modelli di micro-cogeneratori commerciali come possibili alternative per il sistema integrato che si intende realizzare. La selezione è stata effettuata sulla base dei fabbisogni di acqua calda sanitaria ed energia elettrica registrati per l'utenza presa in esame. Per ciascuna macchina è stato quindi creato un modello che consente di valutarne le prestazioni in relazione al profilo di fabbisogno dell'utenza e che ha quindi permesso di analizzare il funzionamento di ciascuna tecnologia durante l'intero periodo considerato, al fine di individuare la tecnologia (o le tecnologie) di conversione del biogas più idonea al contesto, così come la taglia del biodigestore ad essa integrato. A completamento delle indagini condotte durante la prima

annualità, è stata infine elaborata una prima ipotesi preliminare di architettura per il banco prova relativo a ciascuna tecnologia micro-cogenerativa.

Sulla base delle analisi effettuate durante la prima annualità e in accordo con ENEA, sono state selezionate due possibili alternative di sistema integrato digestore anaerobico più micro-cogeneratore, individuati come i più idonei per l'applicazione in esame:

- digestore anaerobico + motore a combustione interna;
- digestore anaerobico + sistema ORC.

I banchi prova relativi a queste due alternative sono stati oggetto di progettazione e realizzazione durante la seconda annualità, così come verrà descritto nel dettaglio nel prosieguo della presente relazione tecnica.

2 Architettura del sistema integrato

Prima di procedere con la descrizione dell'attività di progettazione dei banchi prova volti alla caratterizzazione sperimentale dei sistemi di digestione anaerobica e cogenerazione, si ritiene utile presentare – per le due alternative individuate – il layout completo del sistema integrato proposto per l'installazione presso utenze di tipo domestico nel contesto delle piccole isole e dedicato alla produzione di acqua calda sanitaria (ACS) ed energia elettrica. Come descritto nell'introduzione al presente documento, la prima soluzione individuata in accordo con ENEA prevede l'accoppiamento del digestore anaerobico con un motore a combustione interna che, sfruttando il biogas prodotto dal digestore ed accumulato, consente di produrre energia elettrica e calore in cogenerazione. Tra le diverse tecnologie per la micro-cogenerazione, la soluzione basata sul motore a combustione interna è stata scelta per l'elevato livello di maturità tecnologica di questi sistemi, la relativa semplicità impiantistica, i buoni valori di efficienza ed i costi non eccessivi.

La seconda architettura individuata per il soddisfacimento dei fabbisogni di energia elettrica e termica per acqua calda sanitaria di un'utenza domestica nel contesto delle piccole isole, invece, prevede l'integrazione di un digestore anaerobico con un sistema basato sulla tecnologia ORC. In questo caso, la scelta della tecnologia micro-ORC – meno consolidata e diffusa sul mercato e caratterizzata da un'efficienza di conversione minore se paragonata ad altre tecnologie di micro-cogenerazione – è motivata dal crescente interesse del mondo della ricerca verso questi sistemi, specialmente per applicazioni cogenerative, grazie alla loro flessibilità e capacità di sfruttare fonti di calore a temperature molto variabili.

Nel presente capitolo verrà, pertanto, descritta nel dettaglio l'architettura dei sistemi integrati digestore anaerobico-motore a combustione interna e digestore anaerobico-sistema ORC, che è stata concepita per l'installazione presso l'utente finale e che costituisce il punto di partenza per la progettazione dei banchi prova.

2.1 *Architettura del sistema integrato digestore anaerobico + motore a combustione interna*

Con l'obiettivo di realizzare presso un'utenza domestica un sistema energetico cogenerativo, atto a soddisfare i fabbisogni elettrico e termico per la produzione di acqua calda sanitaria e basato sulle tecnologie di digestione anaerobica e cogenerazione tramite motore a combustione interna, è stata definita l'architettura presentata in **Figura 1**. Nel dettaglio, il sistema proposto – sfruttando il rifiuto organico prodotto dall'utenza stessa – prevede la produzione di biogas mediante digestione anaerobica e, dopo essere stato filtrato in modo da eliminare le eventuali tracce di composti a base zolfo (sistema di adsorbimento dell' H_2S), il suo successivo stoccaggio all'interno di apposite sacche (S1 in **Figura 1**). Il biogas stoccato può quindi essere utilizzato per alimentare i fornelli da cucina e/o – il motore a combustione interna (previa compressione, C in **Figura 1**). La produzione di acqua calda sanitaria viene quindi effettuata tramite recupero termico dai fumi del motore a combustione interna, attraverso uno scambiatore di calore acqua-fumi (SC in **Figura 1**).

Si considera inoltre di prevedere e/o mantenere, come sistema di back-up, la presenza di uno scaldabagno elettrico, attualmente comunemente in uso presso le utenze domestiche site nel contesto delle piccole isole in cui la connessione alle reti di distribuzione del gas naturale e dell'energia elettrica risulta assente o con capacità limitata.

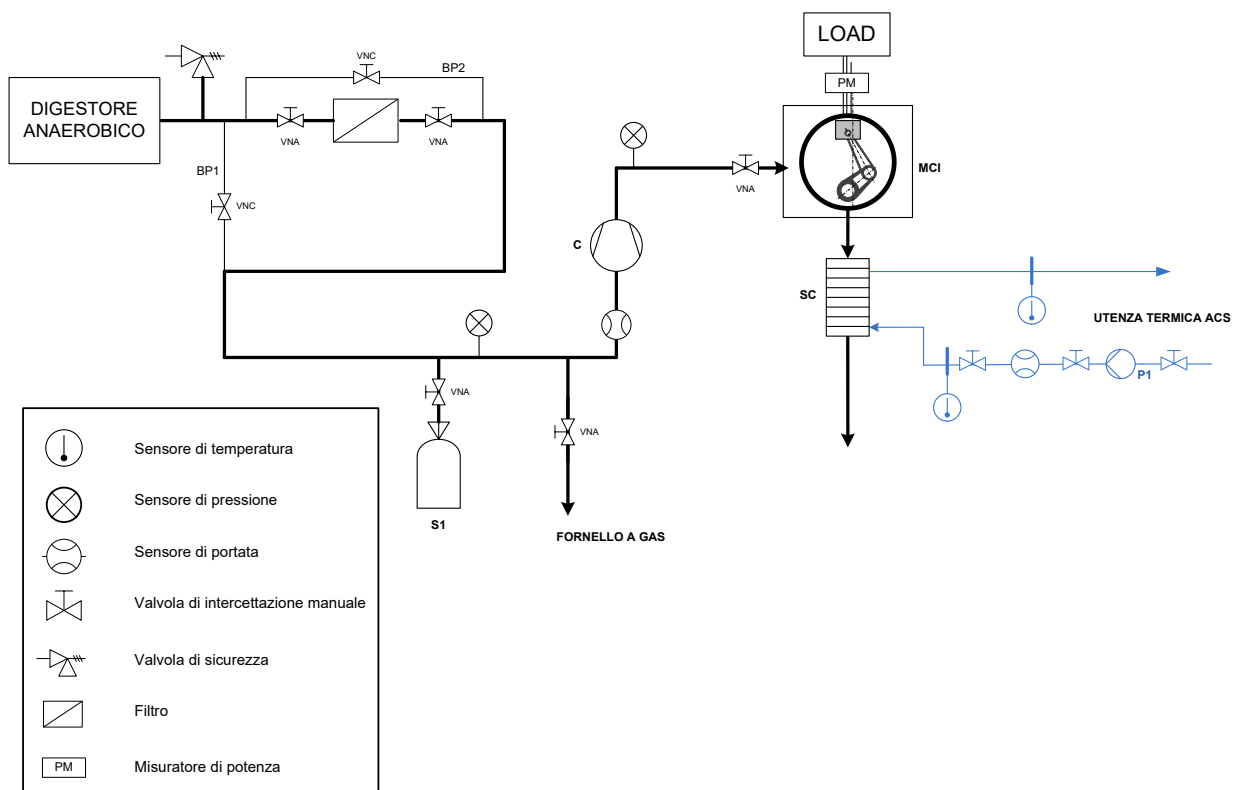


Figura 1 – Architettura del sistema integrato digestore anaerobico + motore a combustione interna, elaborato come ipotesi di installazione presso utenze domestiche site nel contesto delle piccole isole e volto al soddisfacimento dei fabbisogni energetici di tipo elettrico e termico per la produzione di acqua calda sanitaria delle utenze stesse.

2.2 Architettura del sistema integrato digestore anaerobico + sistema ORC

Il sistema integrato per la produzione di acqua calda sanitaria e di energia elettrica a servizio di un'utenza domestica nel contesto delle piccole isole, progettato considerando le tecnologie di digestione anaerobica e ORC, è presentato in **Figura 2**. Come si può osservare, la prima parte del sistema è del tutto identica a quanto visto nel paragrafo precedente, con il biodigestore accoppiato ad opportune sacche per lo stoccaggio del biogas ed al sistema di adsorbimento dell' H_2S . Tuttavia, in questo caso il biogas prodotto tramite il digestore anaerobico alimentato da rifiuti domestici, oltre che per il funzionamento di fornelli da cucina, viene utilizzato come combustibile all'interno di una caldaia, la cui produzione di potenza termica è a servizio di:

- I. un sistema ORC per la produzione di potenza elettrica;
- II. uno scambiatore di calore acqua-acqua per la produzione di acqua calda sanitaria dell'utenza.

Più in dettaglio, grazie alla combustione in caldaia si prevede di produrre potenza termica ad elevati livelli di temperatura, idonei alla cessione di calore, in prima battuta, all'evaporatore di un sistema ORC (EVA in **Figura 2**) e, successivamente, ad uno scambiatore di calore disposto in serie rispetto all'evaporatore e preposto alla produzione di acqua calda sanitaria per l'utenza domestica (SCAMB. ACS in **Figura 2**). In ragione delle temperature di condensazione tipiche dei sistemi ORC di piccola taglia, infatti, il calore scaricato al condensatore è caratterizzato da livelli di temperatura che non consentono un accoppiamento con l'utenza termica in questa sezione dell'impianto. Al contrario, è dimostrato che le temperature del fluido in uscita dall'evaporatore lato acqua sono ancora sufficientemente elevate da poter garantire il

soddisfacimento del fabbisogno di acqua calda sanitaria dell'utenza anche in condizione di funzionamento a pieno carico del sistema ORC [2]. In aggiunta, al fine di svincolare la produzione termica per ACS dal funzionamento del sistema ORC, è previsto un ramo di by-pass (BP, freccia tratteggiata in **Figura 2**) che possa deviare parte o tutta la portata proveniente dal serbatoio di accumulo qualora la richiesta di potenza elettrica da parte dell'utenza sia nulla o inferiore a quella di design dell'ORC.

Come si può osservare sempre dalla **Figura 2**, è inoltre previsto un serbatoio di accumulo termico per interfacciare la caldaia con l'ORC e l'utenza.

In analogia con il sistema basato sul motore a combustione interna come tecnologia di micro-cogenerazione, anche in questo caso è prevista la presenza di uno scaldabagno elettrico come sistema di back-up, che interviene solo quando il biogas prodotto non è sufficiente a soddisfare il fabbisogno dell'utenza.

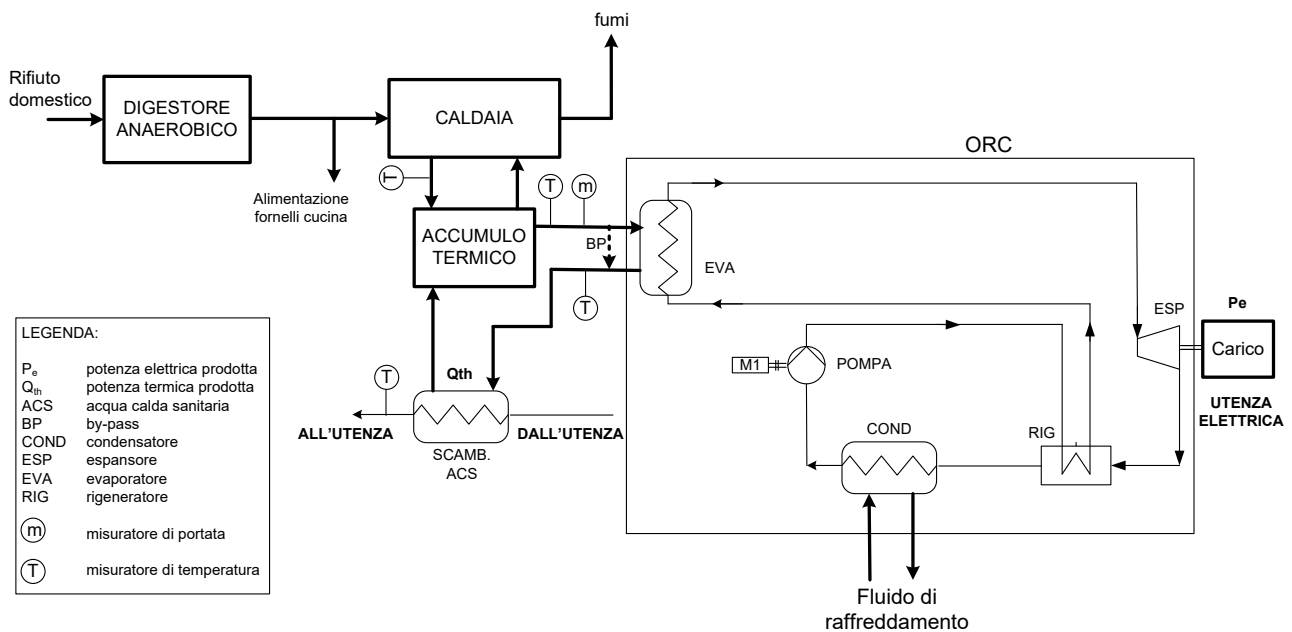


Figura 2 – Architettura del sistema integrato digestore anaerobico + ORC, elaborato come ipotesi di installazione presso utenze domestiche site nel contesto delle piccole isole e volto al soddisfacimento dei fabbisogni energetici di tipo elettrico e termico per la produzione di acqua calda sanitaria delle utenze stesse.

3 Progettazione dei banchi prova

Sulla base dei sistemi integrati definiti, in accordo con ENEA, è stata ipotizzata la progettazione (e successiva realizzazione all'interno di laboratori dall'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna) di tre banchi prova separati, rispettivamente per la caratterizzazione sperimentale del digestore anaerobico, del motore a combustione interna e del sistema ORC. Tale scelta consente in un primo momento di testare e caratterizzare in maniera più flessibile e indipendente i diversi componenti del sistema integrato, ma in un secondo momento si prevede di connettere digestore anaerobico e sistema cogenerativo per condurre test sperimentali anche sul sistema integrato completo. Nei paragrafi successivi, verrà descritta l'attività che ha condotto alla progettazione dei banchi prova. In particolare, per ciascun banco prova, l'attività di progettazione condotta dall'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna ha riguardato l'elaborazione dei P&I, la definizione della componentistica e la scelta e posizionamento dei sensori di misura necessari allo svolgimento dell'attività sperimentale. La selezione sul mercato dei modelli di ciascun componente, invece, è stata condotta in collaborazione con ENEA, ad eccezione del sistema ORC, già presente all'interno del Laboratorio di Meccanica dall'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.

3.1 Progettazione del banco prova sperimentale relativo al motore a combustione interna

L'attività di progettazione relativa al banco prova volto alla caratterizzazione del motore a combustione interna (MCI) ha portato all'elaborazione del P&I presentato in **Figura 3**. A tale proposito, come già accennato, si sottolinea che – in una prima fase della sperimentazione e quindi nella progettazione e realizzazione del banco prova – si è deciso di disaccoppiare digestore anaerobico e sistema cogenerativo, al fine di una maggiore flessibilità durante l'attività sperimentale e di una più accurata caratterizzazione delle prestazioni del motore a combustione interna che verrà installato. Di conseguenza, il biogas in input al MCI testato nel banco prova qui descritto non sarà quello prodotto dal digestore anaerobico, ma si ottiene miscelando in opportune percentuali CH_4 e CO_2 , alimentati separatamente. Come si può osservare, infatti, il layout mostra due bombole di gas (appunto metano ed anidride carbonica), le cui correnti in uscita confluiscono in un miscelatore prima di essere alimentate al cogeneratore. Questa soluzione risulta particolarmente interessante perché consentirà – nella fase sperimentale – di avere un maggiore controllo sulla composizione del biogas e di testare il sistema simulando in input un biogas a composizione variabile e nota. Alimentato da un gas così ottenuto, quindi, il MCI è connesso ad un carico elettrico, mentre i fumi – prima di essere scaricati in atmosfera – vengono inviati ad uno scambiatore di calore connesso ad un circuito aperto di raffreddamento ad acqua che simula l'utenza termica (scambiatore acqua-fumi). La scelta della tipologia di circuito di raffreddamento è stata effettuata nell'ottica della successiva installazione del banco prova all'interno di un laboratorio con disponibilità di una connessione ad un pozzo e/o all'acquedotto.

Come si può notare da **Figura 3**, inoltre, il banco prova è stato progettato prevedendo la presenza della seguente ulteriore componentistica:

- due riduttori di pressione, rispettivamente in uscita dalla bombola di metano e da quella di anidride carbonica, che consentono di portare i gas dalla pressione di stoccaggio alla pressione richiesta in input dal MCI;
- quattro valvole di intercettazione manuale normalmente chiuse, due in uscita dalla bombola di metano e due in uscita dalla bombola di CO_2 ;
- due valvole di non ritorno, rispettivamente in uscita dalla bombola di metano e da quella di anidride carbonica, che impediscono una eventuale non corretta miscelazione dei due gas con inversione della direzione del flusso;
- una valvola a tre vie miscelatrice per l'ammissione del gas al MCI;
- una pompa di circolazione dell'acqua (P1 in **Figura 3**), sul circuito di raffreddamento dello scambiatore di calore acqua-fumi (che simula l'utenza termica);
- tre valvole di intercettazione manuale normalmente aperte, sul circuito di raffreddamento dello scambiatore di calore acqua-fumi (che simula l'utenza termica), a valle del serbatoio di accumulo

(Tank in **Figura 3**): due valvole sono posizionate rispettivamente a monte e a valle della pompa P1, sul ramo di connessione tra la sorgente di acqua (pozzo/acquedotto) e lo scambiatore, mentre la terza valvola è posta a valle del misuratore di portata.

Il banco prova è infine dotato dei seguenti sensori di misura:

- due misuratori di portata, sui rami in uscita dalle bombole rispettivamente di metano e CO₂;
- un sensore di pressione, sulla linea di alimentazione del biogas al motore;
- un misuratore di portata, sul circuito di raffreddamento dello scambiatore di calore acqua-fumi (che simula l'utenza termica), posto sul ramo di connessione tra la sorgente di acqua e lo scambiatore;
- due sensori di temperatura, sul circuito di raffreddamento dello scambiatore di calore acqua-fumi (che simula l'utenza termica), rispettivamente in ingresso e in uscita dallo scambiatore sul lato acqua.

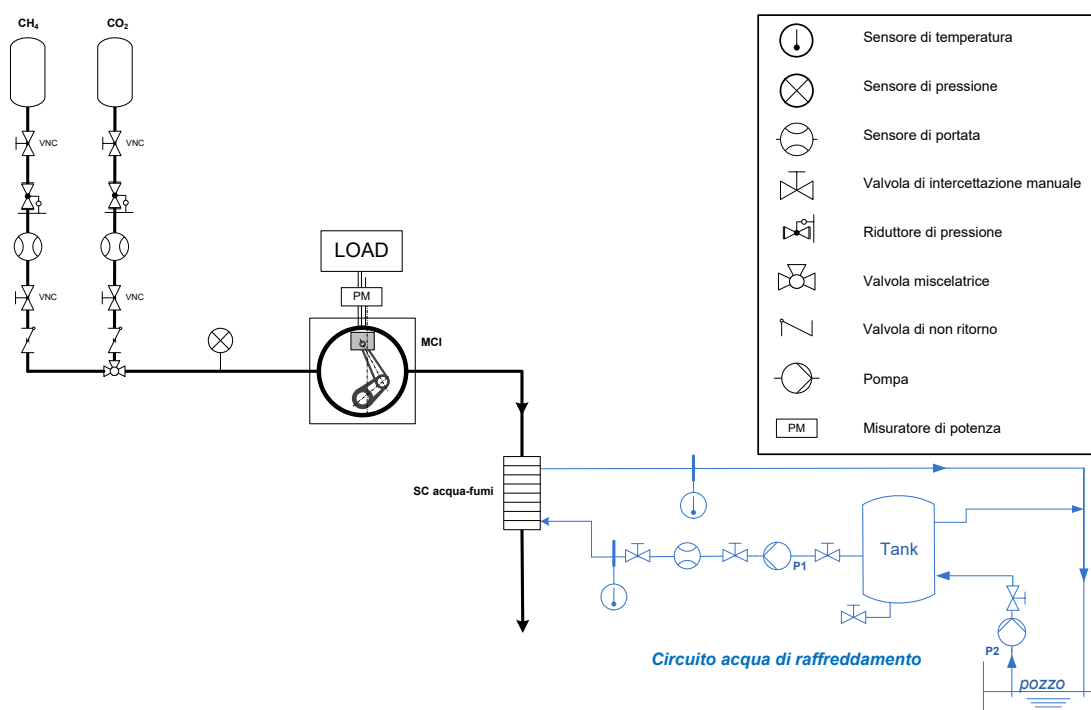


Figura 3 – P&I del banco prova progettato per la caratterizzazione del motore a combustione interna cogenerativo.

Entrando nel dettaglio dei singoli componenti, in **Tabella 1** sono elencati i dati tecnici del cogeneratore. Si tratta di un motore a combustione interna multi-fuel prodotto dall'azienda GRETECH® [3], che – se alimentato da biogas – è in grado di produrre una potenza elettrica pari a 1.35 kW in condizioni di design. Il motore è stato sviluppato appositamente per applicazioni di tipo residenziale e/o civile ed è caratterizzato da un relativamente basso livello di emissioni sonore (circa 68 dB a 7 m). Il sistema è inoltre dotato di una batteria ricaricabile al piombo acido di capacità pari a 7.5 Ah e tensione in ingresso pari a 12 V.

Per quanto riguarda lo scambiatore di calore per il recupero dai fumi del MCI e la produzione di acqua calda, invece, sono state selezionate due diverse tipologie: uno scambiatore a fascio tubiero e mantello ed uno scambiatore a piastre.

Lo scambiatore a piastre, dell'azienda tedesca Wiltec [4], è in acciaio inossidabile ed è costituito da 10 piatti per una potenza termica massima complessiva di 22 kW. In **Tabella 2** sono presentate le specifiche tecniche

dello scambiatore, mentre un suo disegno è mostrato in **Figura 4**. Con riferimento alla figura, si possono inoltre individuare le seguenti connessioni:

- F1 & F3: 1/2" 12.70 mm ISO-G
- F2 & F4: 3/4" 19.05 mm ISO-G

Tabella 1 – Scheda tecnica del MCI scelto per l'installazione all'interno del Laboratorio di Meccanica dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.

	GENERATORE		
Costruttore	GRETECH		
Modello	JLY 2500-3		
Tensione di design (output AC)	230 V		
Frequenza di design	50 Hz		
Fuel	Benzina/GPL	GN	Biogas
Potenza elettrica prodotta in design	2.00 kW	1.80 kW	1.35 kW
Massima potenza elettrica prodotta	2.20 kW	2.00 kW	1.45 kW
Tensione/Corrente DC	12 V/8.3 A		
Fattore di potenza	1.0		
Peso	50 kg		
Ingombro	610x465x465 mm		
Pressione fuel in ingresso	2.8 kPa	2.0 kPa	4.0 kPa
Consumo specifico	0.36 m ³ /kW.h	0.35 m ³ /kW.h	0.60 m ³ /kW.h
	MOTORE		
Numero modello motore	JL 200		
Tipologia	1 cilindro/4 tempi/valvole in testa/raffr. ad aria		
Alesaggio x Corsa	68 x 54 mm		
Cilindrata	196 cm ³		
Sistema di accensione	Transistor Magneto (T.C.I.)		
Candela	NGK (BP6E)		

Tabella 2 – Scheda tecnica dello scambiatore di calore a piastre per il recupero termico dai fumi del MCI scelto per l'installazione all'interno del Laboratorio di Meccanica dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.

	Unità	Valore
Produttore	[-]	Wiltec
Tipologia	[-]	a piastre
Materiale piatti	[-]	Acciaio inox AISI 304
Materiale saldature	[-]	rame
Numero di piatti	[-]	10
Massima portata	[m ³ /h]	4
Massima potenza termica	[kW]	22
Capacità (per piatto)	[L]	0.18
Range di temperatura	[°C]	-195 – +225
Pressione	[bar]	20
Superficie di scambio effettiva (per piatto)	[m ²]	0.012
Spessore pannello conduttivo	[mm]	0.26
Spessore pannello di copertura	[mm]	1.00

Distanza tra i pannelli	[mm]	2.10
Dimensione pannelli	[mm]	191x73

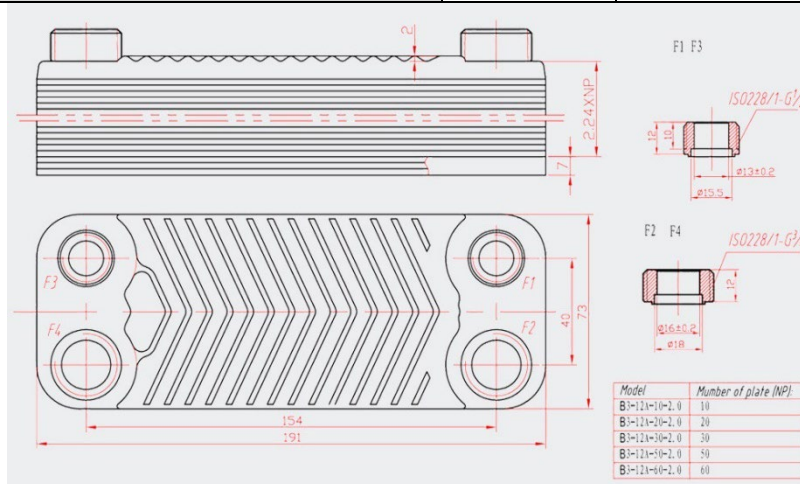


Figura 4 – Disegno dello scambiatore a piastre acqua-fumi per il recupero termico e la produzione di acqua calda [4].

In **Figura 5** si presenta infine una schematizzazione dei flussi termici [4] interni allo scambiatore di calore.

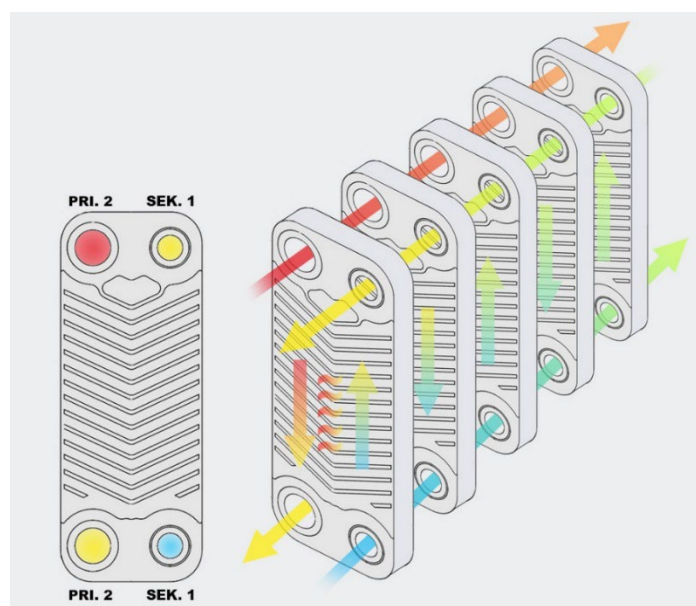


Figura 5 – Schematizzazione dei flussi termici all'interno dello scambiatore a piastre acqua-fumi per il recupero termico e la produzione di acqua calda [4].

Le caratteristiche tecniche dello scambiatore a fascio tubiero e mantello (**Figura 6**), invece, commercializzato dall'azienda tedesca dpPerformance [5], sono presentate in **Tabella 3**. In aggiunta, lo scambiatore è dotato delle seguenti connessioni:

- lato gas: 2.5" (63.5 mm)
- lato acqua di raffreddamento: 1/2" NPT (38.1 mm)



Figura 6 – Immagine dello scambiatore di calore a fascio tubiero e mantello selezionato [5].

Tabella 3 – Scheda tecnica dello scambiatore di calore a fascio tubiero e mantello per il recupero termico dai fumi del MCI scelto per l’installazione all’interno del Laboratorio di Meccanica dell’Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.

	Unità	Valore
Produttore	[-]	dpPerformance GmbH
Tipologia	[-]	shell
Materiale	[-]	Alluminio
Massima potenza termica	[kW]	54
Lunghezza totale	[mm]	340
Lunghezza dissipatore	[mm]	200
Diametro esterno dissipatore	[mm]	100
Peso	[kg]	1.9

Il circuito di raffreddamento connesso allo scambiatore e che simula l’utenza termica è mostrato nel dettaglio in **Figura 7** ed è stato progettato considerando la possibilità di alimentazione dell’acqua da un pozzo, che è installato all’interno del Laboratorio di Meccanica dell’Alma Mater Studiorum – Università di Bologna. Il pozzo ha un diametro di 1 m ed è profondo 11 m, consentendo quindi una capacità d’acqua compresa tra 10 m³ e 11 m³. L’acqua fredda a temperatura ambiente viene estratta da una pompa sommersa e immagazzinata in un serbatoio di accumulo della capacità di 300 litri, quindi fatta circolare verso lo scambiatore di calore per il recupero termico dai fumi del MCI tramite una pompa centrifuga (P1 in **Figura 7**). Un’alternativa prevista è quella di utilizzare direttamente l’acqua del rubinetto (alimentata quindi dall’acquedotto), con il vantaggio di una temperatura più bassa e costante durante l’anno rispetto all’acqua di pozzo, inevitabilmente legato alla temperatura dell’aria ambiente. Per contro, questa soluzione comporta lo spreco di quantità significative di acqua che viene scaricata in fognatura.

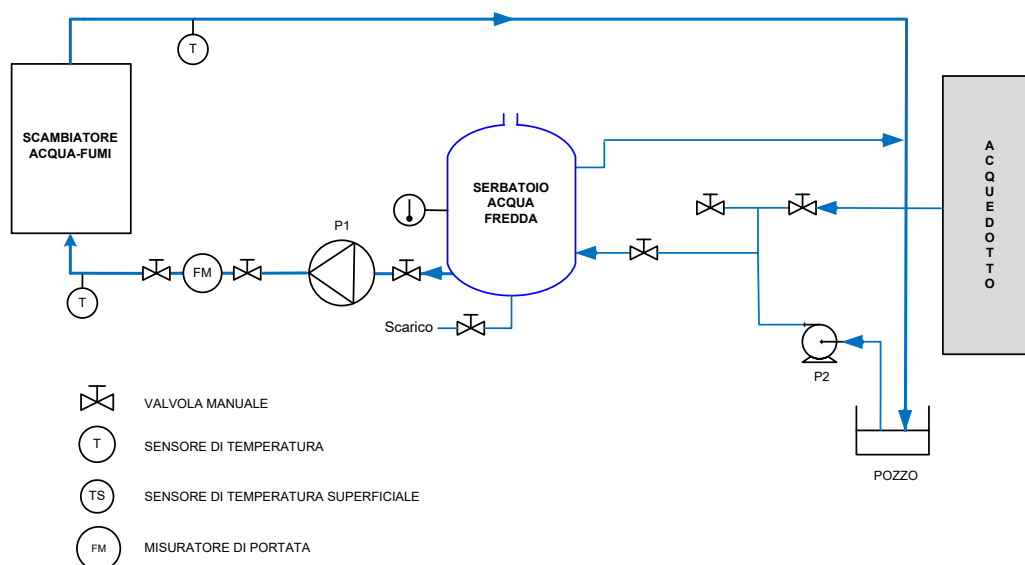


Figura 7 – Layout del circuito dell’acqua di raffreddamento per il recupero di calore dai fumi del MCI (che simula l’utenza termica).

Per quanto riguarda invece i sensori di misura, in **Tabella 4** sono elencate le principali specifiche di quelli che verranno installati nel banco prova [6, 7].

Tabella 4 – Caratteristiche sensori di misura previsti per il banco prova sperimentale – MCI.

Grandezza misurata	Portata gas (x2)	Portata liquido	Pressione	Temperatura (x2)
Modello	red-y smart meter GSM-C	H + E Promag	JUMO 404327	-
Tipologia	thermal mass flow meter	misuratore magnetico	trasduttore con sensore capacitivo di tipo ceramico	termocoppia di tipo K
Posizione	uscita bombole CH ₄ e CO ₂	ingresso SC, lato acqua	alimentazione MCI	ingresso e uscita SC, lato acqua
Precisione	± 1.0 % del fondo scala	±0.5 % RV	≤ 0.2 % del fondo scala	±0.5 °C
Calibrazione/range operativo	0-1000 NL/min*	0-9.8 L/s	0-100 mbar	0-90 °C

* Fluido: 100% CH₄

** in accordo con LST EN1434-1:2016

Al fine di effettuare una corretta caratterizzazione sperimentale del generatore nelle diverse condizioni al contorno considerate, inoltre, si è scelto di monitorare le principali grandezze fisiche di processo mediante un sistema di acquisizione basato sull’utilizzo di alcune schede Arduino Mega 2560 interfacciate con il software LabVIEW. Più in dettaglio, nel sistema di acquisizione progettato, gli strumenti di misura della pressione di alimentazione del gas al motore, delle portate di metano e CO₂ e le temperature dell’acqua in ingresso e in uscita dallo scambiatore di calore acqua-fumi sono opportunamente connessi ai microcontrollori Arduino comunicanti con il software di controllo, così come di seguito descritto.

Per quanto riguarda i collegamenti elettrici, gli strumenti in dotazione per le misure di pressione e portata (**Tabella 4**) forniscono come output un segnale analogico di corrente nell’intervallo 4-20 mA, mentre i microcontrollori Arduino Mega 2560 sono in grado di rilevare segnali di tensione compresi entro l’intervallo

0–5 V. Di conseguenza, è necessario riportare il segnale di corrente in uscita dal sensore in una caduta di tensione equivalente. Lo schema elettrico equivalente dei collegamenti per una corretta acquisizione dei due segnali è mostrato in **Figura 8**.

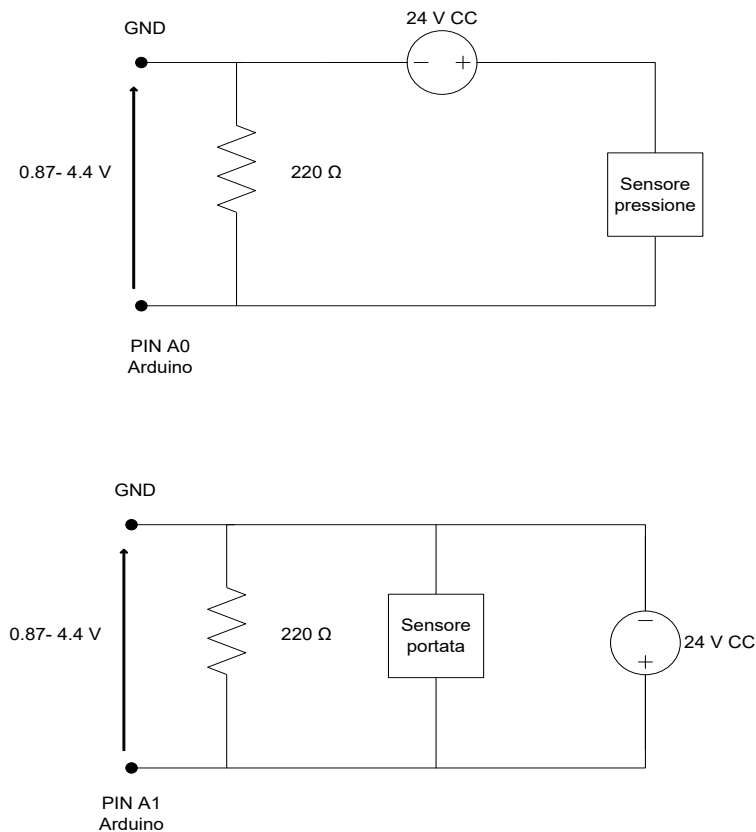


Figura 8 – Schema elettrico equivalente dei collegamenti realizzati per una corretta acquisizione dei segnali.

Per le misure di temperatura, invece, le termocoppie di tipo K posizionate a monte e a valle dello scambiatore di recupero dai fumi del MCI, sul lato acqua, saranno connesse ad Arduino mediante il chip di amplificazione MAX6675, secondo lo schema esemplificativo mostrato in **Figura 9**.

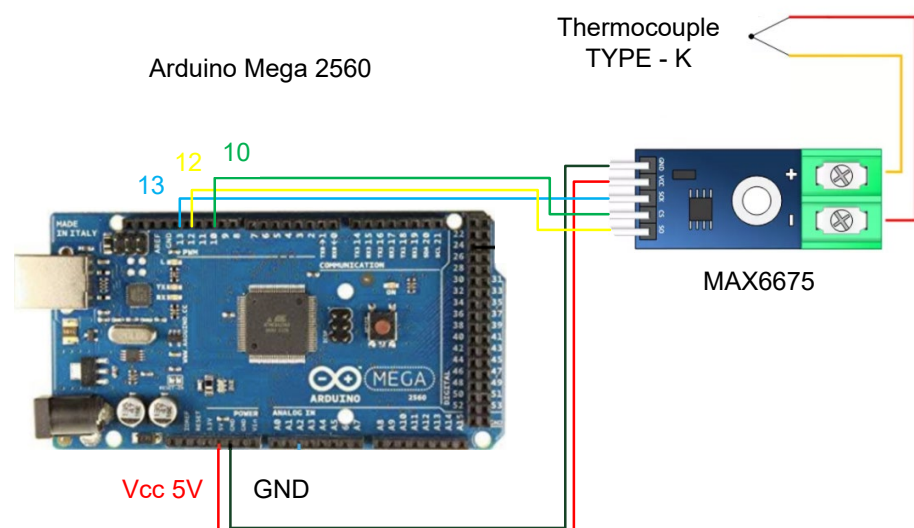


Figura 9 – Schema di connessione tra il sensore di temperatura e la scheda Arduino.

3.2 Progettazione del banco prova sperimentale relativo al digestore anaerobico

L'attività di progettazione del banco prova per test su digestore anaerobico ha condotto all'elaborazione di due P&I, per l'installazione nel laboratorio dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, rappresentato in **Figura 10**.

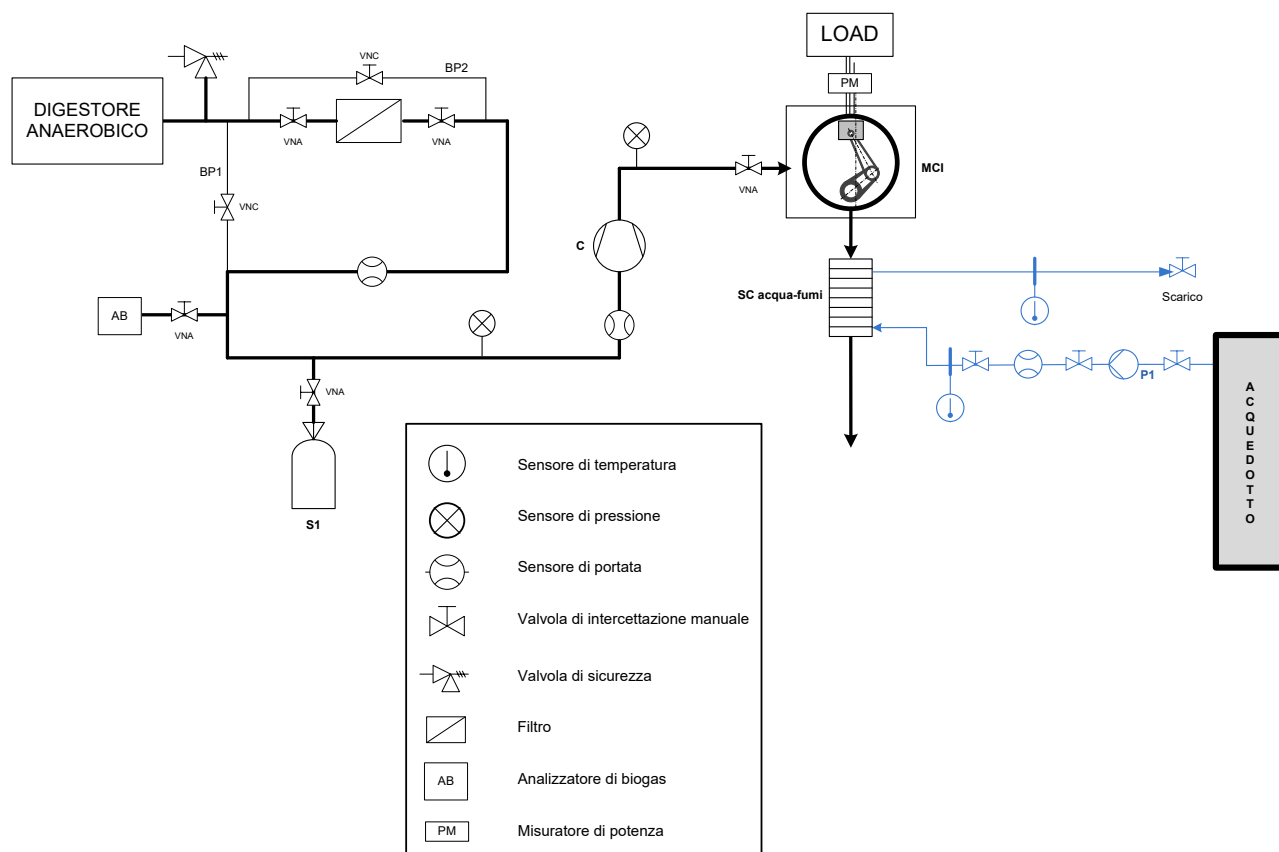


Figura 10 – P&I del banco prova relativo al digestore anaerobico (laboratorio dall'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna).

Si sottolinea che il layout presentato in **Figura 10** è quello completo, con digestore e MCI integrati. Come già detto, infatti, in una prima fase sperimentale, presso i laboratori dall'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, il banco prova sarà usato per testare il digestore da solo, accumulando il biogas così prodotto, e solo in una seconda fase verrà fisicamente integrato con il motore a combustione interna, caratterizzato anch'esso separatamente nel banco prova descritto nel paragrafo precedente.

Con riferimento a **Figura 10**, i principali componenti del sistema sono:

- il digestore anaerobico;
- un sistema di filtraggio dell' H_2S , in uscita dal digestore;
- una sacche per l'accumulo del biogas prodotto (S1 in **Figura 10**);
- un compressore (C in **Figura 10**), che impedisce fenomeni di inversione di flusso ed assicura la corretta alimentazione del biogas al motore;
- il motore a combustione interna, connesso opportunamente ad un carico;
- uno scambiatore di calore (SC in **Figura 10**) acqua-fumi, con relativo circuito di raffreddamento ad acqua connesso all'acquedotto, che consentirà di testare il motore in assetto cogenerativo.

Per quanto riguarda inoltre la strumentazione prevista, il banco prova di **Figura 10** è dotato dei seguenti sensori di misura:

- due misuratori di portata del biogas, posti rispettivamente in uscita dal sistema di filtraggio dell'H₂S ed in uscita della sacca di stoccaggio del biogas;
- due misuratori di pressione, rispettivamente a monte e a valle del compressore;
- un analizzatore del biogas, che consente di valutarne la composizione, posto a valle del sistema di filtraggio dell'H₂S.
- un contacalorie per la contabilizzazione della potenza termica recuperata dai fumi del motore, con sensori installati sul lato acqua. Il circuito dell'acqua è altresì dotato di una pompa di circolazione (P1 in [Figura 10](#)) e di un certo numero di valvole di intercettazione manuale per la corretta gestione del circuito stesso.

Nel banco prova è presente inoltre:

- una valvola di sicurezza in uscita dal digestore anaerobico, anche detta “valvola del troppo pieno”, che si attiva quando nella sacca di stoccaggio del biogas interna al digestore viene raggiunta una determinata pressione;
- due valvole di intercettazione manuale, a monte e a valle del sistema di filtraggio dell'H₂S, normalmente aperte;
- due rami di by-pass, rispettivamente per il solo filtro o per la linea filtro + misurazione della portata di biogas, ciascuno dei quali dotato di una valvola di intercettazione manuale normalmente chiusa;
- una valvola di intercettazione manuale normalmente aperta sul ramo di alimentazione all'analizzatore di biogas;
- una valvola di intercettazione manuale normalmente aperta sul ramo di alimentazione alla sacca di stoccaggio del biogas S1;
- una valvola di intercettazione manuale normalmente aperta a monte del motore a combustione interna.

La progettazione del banco prova è stata coordinata con l'attività condotta da ENEA nella linea LA 4.2, quest'ultima infatti, come descritto nel report RdS/PTR2020/140, prevede la progettazione e realizzazione di un sistema integrato biodigestore-cogeneratore-pompa di calore con accumulo termico da 210 litri per provare in condizioni reali di funzionamento la produzione di acqua calda sanitaria e l'energia frigorifera di scarto (dal evaporatore della pompa di calore) utilizzando il biogas prodotto dal biodigestore domestico.

Entrando nel dettaglio dei componenti, il digestore anaerobico scelto è mostrato in [Figura 11](#). Si tratta di un sistema *plug&play* dell'azienda HomeBiogas [8] che grazie alle sue caratteristiche risulta una soluzione particolarmente idonea per l'installazione presso utenze domestiche non connesse con la rete del gas, come quelle site nell'ambito di piccole isole, che rappresentano il contesto all'interno del quale viene svolto il presente studio.



Figura 11 – Immagini relative al digestore *plug&play* “HomeBiogas 2.0”.

Il dettaglio del sistema è inoltre presentato in **Figura 12**, mentre le specifiche tecniche sono elencate in **Tabella 5**.

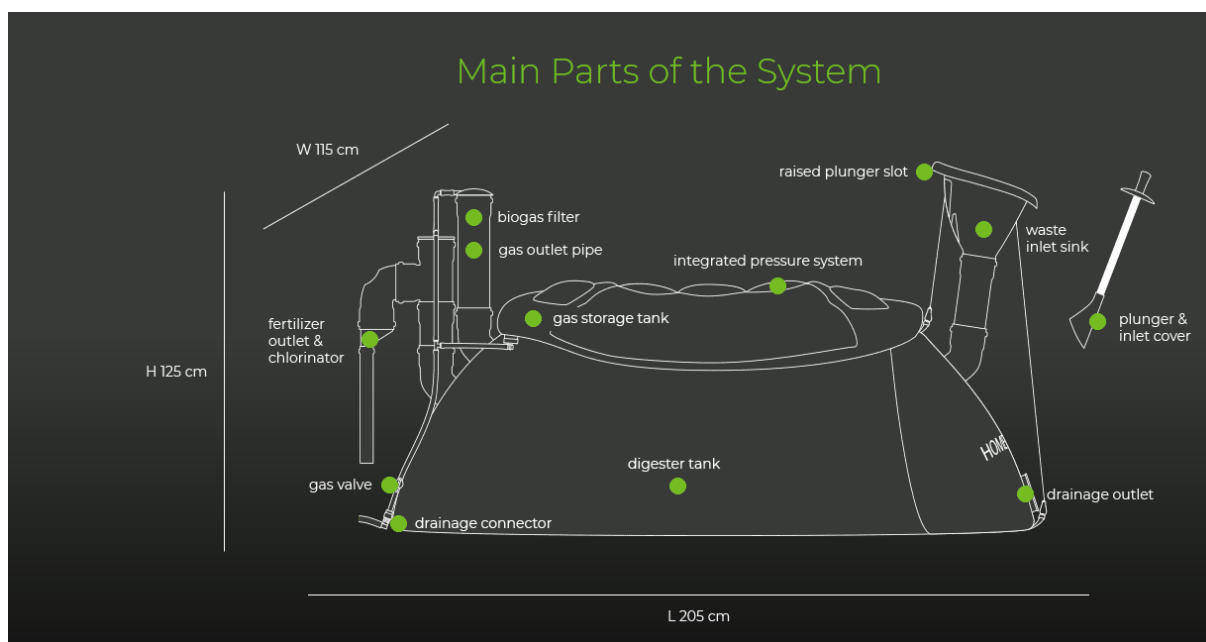


Figura 12 – Immagine di dettaglio delle principali parti che compongono il digestore *plug&play* “HomeBiogas 2.0”.

Tabella 5 – Scheda tecnica del digestore “HomeBiogas 2.0” [8].

	Unità	Valore
Dimensioni del sistema complessivo	[cm]	210x115x125
Volume del serbatoio di gas	[L]	600
Volume del digestore	[L]	1500
Massima quantità giornaliera di rifiuto domestico in input	[L]	6
Massima quantità giornaliera di deiezioni animali (slurry) in input	[L]	45
Peso	[kg]	1200

Il digestore HomeBiogas 2.0 è un sistema in grado di trasformare i rifiuti organici, quali rifiuti domestici da cucina o letame animale, in biogas e fertilizzante liquido naturale. Il sistema opera a flusso continuo: i rifiuti organici vengono immessi da un lato e i prodotti, ovvero biogas e fertilizzante, vengono costantemente emessi dall'altro fin tanto che il digestore è in funzione ed alimentato. Il fertilizzante viene inoltre prodotto ogni volta che si aggiungono liquidi e rifiuti nel sistema.

Il sistema è composto principalmente da un serbatoio contenente acqua, all'interno del quale viene introdotta la biomassa e in cui avviene il processo di digestione (digester tank in [Figura 12](#)), e da un serbatoio di accumulo del biogas prodotto (gas storage tank in [Figura 12](#)), situato nella parte alta del sistema e integrato con un dispositivo di misura e controllo della pressione. Gli step fondamentali del suo funzionamento sono:

1. i rifiuti organici vengono immessi nel serbatoio del digestore, che viene a sua volta riempito con acqua;
2. i batteri anaerobici all'interno del digestore biodegradano i rifiuti organici, producendo biogas nel processo;
3. il biogas prodotto passa attraverso un filtro attivo per rimuovere eventuali odori sgradevoli e tracce di idrogeno solforato, viene infine immagazzinato nel serbatoio posto sopra il digestore. In aggiunta al biogas, il sistema produce un fertilizzante naturale;
4. un meccanismo brevettato regola la pressione del gas quando il biogas viene utilizzato, consentendo una pressione costante e uniforme alla fine del dispositivo.

5. Uno speciale meccanismo di rilascio della pressione rilascia il gas in eccesso una volta che il serbatoio è pieno.

Il biogas, generato dal sistema, che a pieno carico pesa circa 1200 kg, è un gas infiammabile molto più leggero dell'aria ed è composto principalmente da metano ed anidride carbonica.

Per quanto riguarda la componentistica, invece, con riferimento a **Figura 12**, si può osservare che in alto è presente un meccanismo – brevettato – per la pressione del gas. Esso consiste nella presenza di sacche riempite di sabbia che bilanciano la pressione all'interno dello stoccaggio mantenendola costante e uniforme. A seguire, si può osservare il canale idraulico in ingresso con lo stantuffo, il serbatoio a doppia fodera con uno stoccaggio da 700 litri, la presa e l'uscita per il drenaggio, la camera di digestione (dove avviene l'azione batterica e la "trasformazione" della sostanza organica in biogas e fertilizzante) con doppio strato sigillato e protetto dai raggi UV, il tubo d'uscita del fertilizzante, il cloratore, ossia il purificatore (mediante l'utilizzo di cloro) del liquido fertilizzante, il tubo d'uscita del biogas, il filtro di purificazione del biogas in alto ed infine la valvola per l'uscita del biogas stesso. Si sottolinea infatti che, prima di essere inviato all'utenza, il biogas generato all'interno del sistema viene filtrato attraverso un filtro a carbone attivo, appositamente studiato per rimuovere eventuali odori sgradevoli. Infine, come già anticipato, in aggiunta al biogas il processo produce un fertilizzante che viene additivato con cloro e che costituisce un secondo prodotto utilizzabile in uscita dal sistema.

Il rendimento del digestore dipende dalle condizioni ambientali, ed in particolare subisce delle variazioni in base al luogo di installazione ed alla temperatura ambiente. È pertanto importante scegliere e allestire la giusta postazione, prediligendo aree esposte alla luce del sole in modo da aiutare la fase di riscaldamento. Per quanto riguarda le caratteristiche climatiche del sito di installazione, l'azienda HomeBiogas garantisce una buona efficienza del digestore per temperature medie giornaliere (giorno/notte) uguali o superiori ai 15 °C, con necessità di fornire calore dall'esterno o di ridurre il flusso di biomassa in ingresso durante i mesi più freddi se la temperatura media giornaliera è compresa tra i 15 °C e i 20 °C (si veda **Figura 13**).

Infatti, affinché il digestore raggiunga le sue condizioni operative, la temperatura media tra giorno e notte deve essere intorno ai 25 °C per le prime quattro settimane. Per essere messo in funzione, inoltre, il digestore ha bisogno di 100 litri di letame animale fresco, filtrato da terra e pietrisco e, per il primo utilizzo, è necessario attendere da una a tre settimane affinché il biogas venga prodotto.

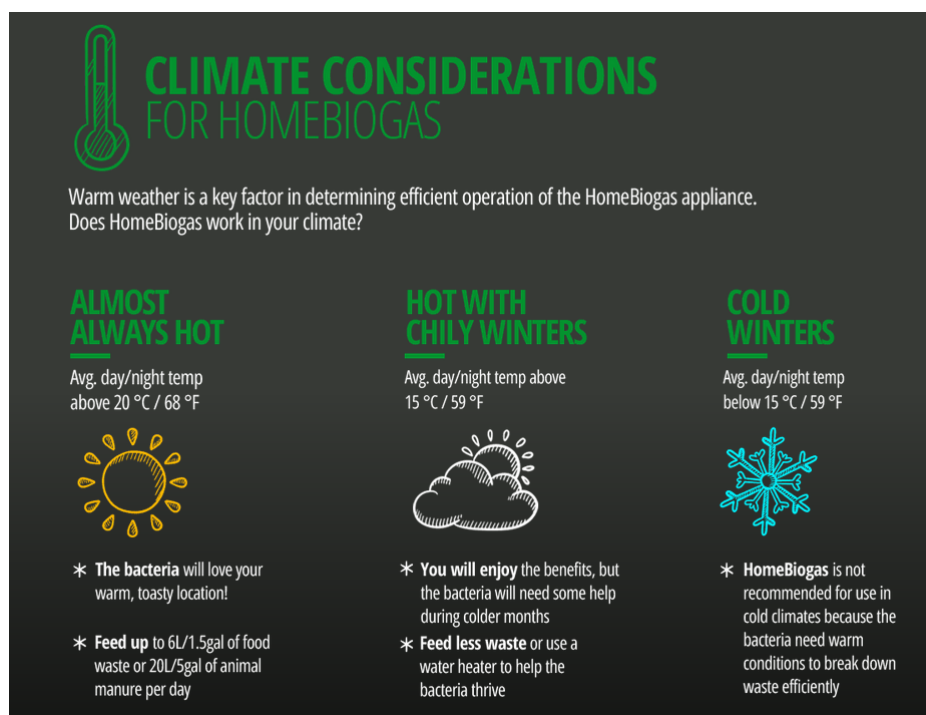


Figura 13 – Vincoli sulle condizioni climatiche del sito di installazione del biodigestore [9].

In caso di test sul sistema integrato completo, evidentemente, motore a combustione interna e scambiatore di calore sono gli stessi descritti nel paragrafo precedente (Paragrafo 3.1) e si rimanda pertanto ad esso per le specifiche tecniche. Come anticipato nella descrizione del layout di **Figura 10**, tuttavia, a causa delle pressioni in gioco, per connettere digestore e cogeneratore è necessario inserire un compressore (o circolatore di gas) sulla linea che dallo stoccaggio del biogas alimenta il MCI. Il biogas viene infatti prodotto dal digestore anaerobico HomeBiogas a pressione ambiente e si stima che le perdite di carico sulla linea che lo separa dal motore a combustione interna siano tali da non consentire – senza un’opportuna compressione – una corretta alimentazione del motore stesso (che richiede in ingresso un gas a pressione pari a 4 kPa). Le specifiche tecniche del compressore scelto sono riportate in **Tabella 6**.

Tabella 6 – Specifiche tecniche del compressore di biogas.

	Unità	Valore
Produttore	[-]	KNF
Modello	[-]	PJ33314
Tensione	[V]	24 (DC)
Corrente	[A]	3.6
Massimo incremento di pressione	[kPa]	+50

Per quanto riguarda i sensori di misura e l’analizzatore di biogas (per la determinazione delle percentuali di CH₄ e CO₂ nel biogas) che verranno installati nel banco prova, invece, le principali specifiche sono elencate in **Tabella 7**.

Tabella 7 – Caratteristiche sensori di misura previsti per il banco prova sperimentale – digestore anaerobico.

Grandezza misurata	Portata gas (x2)	Potenza Termica	Pressione	Composizione
Modello	red-y smart meter GSM-C	IFX-M4-E3	JUMO 404327	MRU SWG100 BIOcompact
Tipologia	thermal mass flow meter	contacalorie	trasduttore con sensore capacitivo di tipo ceramico	infrarosso
Posizione	uscita bombole CH ₄ e CO ₂	lato acqua scambiatore	alimentazione MCI	alimentazione MCI
Precisione	± 1.0 % del fondo scala	classe 2**	≤ 0.2 % del fondo scala	3 % della lettura
Calibrazione/range operativo	0-1000 NL/min*	da 0.6 m ³ /h a 60 m ³ /h da 0 a 90 °C	0-100 mbar	0-100% (miscela CH ₄ +CO ₂)

Infine, si prevede di esplorare la possibilità di aggiungere sensori di misura della temperatura e della pressione – ridondanti ma utili per la caratterizzazione del sistema – all’interno della sacca del biodigestore, monitorate da remoto.

3.3 Banco prova sperimentale – Ciclo Rankine Organico

Il P&I relativo al banco prova per la sperimentazione relativa a sistemi ORC installato – a partire dal 2013 – presso il Laboratorio di Tecnologie di Micro-generazione dell’Alma Mater Studiorum Università di Bologna è presentato in **Figura 14**. Come si può notare, il sistema ORC consiste in una tipica configurazione recuperata che impiega, come componenti principali, un evaporatore a piastre saldobrasate, un espansore a pistoncini, un recuperatore a piastre saldobrasate, un condensatore a fascio tubiero ed una pompa di alimentazione ad ingranaggi. L’evaporatore è alimentato da acqua calda, che nell’ottica di test sperimentali in Laboratorio sarà riscaldata da una resistenza elettrica e non da una caldaia (come previsto nell’architettura pensata per l’installazione su un’utenza reale), mentre il condensatore è alimentato da acqua fredda in condizioni ambiente. A tale proposito si sottolinea, infatti, che l’utilizzo di resistenze elettriche per generare il calore necessario in input al sistema è dovuto ad una scelta funzionale al Laboratorio, ma che il sistema è progettato per poter operare anche con una diversa fonte di calore, come ad esempio una caldaia a biomassa, collettori solari termici, energia geotermica a bassa entalpia o qualsiasi tipo di calore di scarto industriale di bassa qualità. Il fluido di lavoro scelto per essere impiegato all’interno del ciclo è HFC-134a (R134a), le cui caratteristiche sono riportate in **Tabella 8** e nel diagramma termodinamico di **Figura 15**. Trattandosi di un fluido ad elevato Global Warming Potential (GWP), si prevede la sua eliminazione nelle applicazioni all’interno dell’Unione Europea nei prossimi anni. Come sostituti particolarmente idonei sono stati pertanto individuati due fluidi appartenenti alla famiglia delle olefine, in particolare R1234yf e R1233zd, che presentano valori simili di temperatura e pressione critica. Il sistema, inoltre, è stato progettato per rispettare vincoli di compattezza con ingombri pari a 80x85x300 cm (larghezza x profondità x altezza).

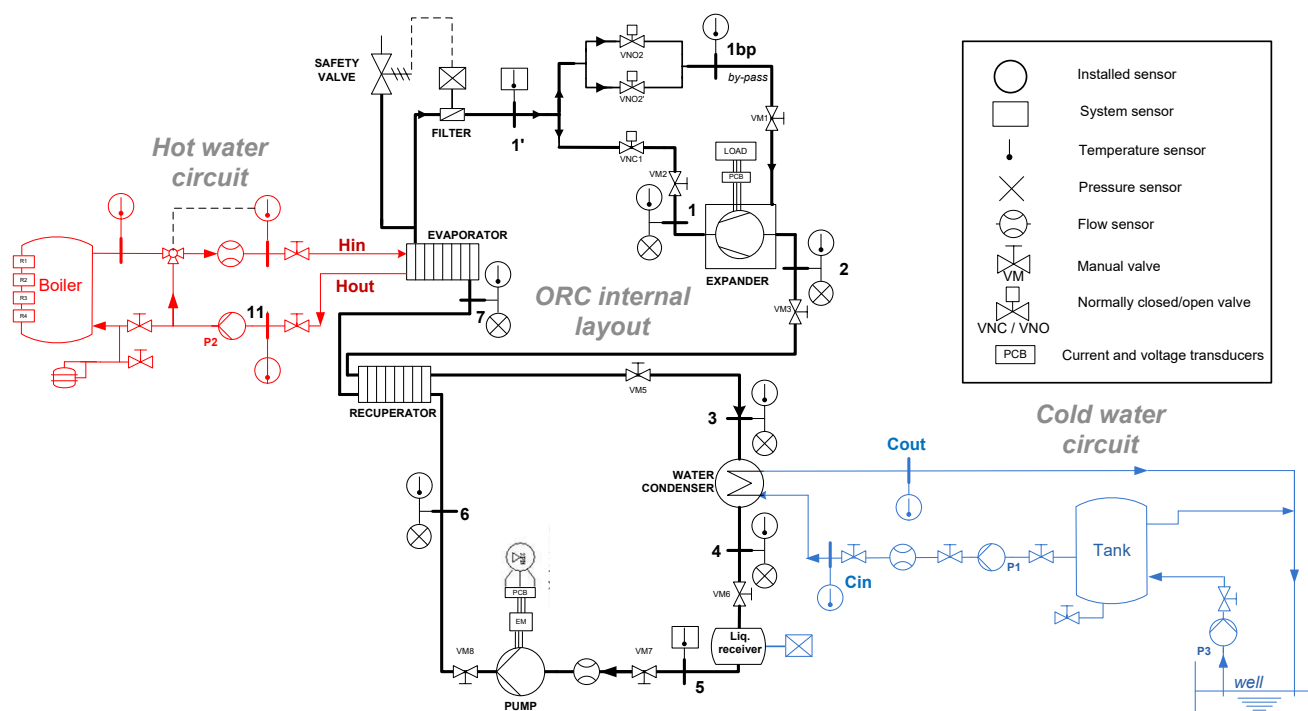


Figura 14 – P&I del banco prova per la caratterizzazione del sistema ORC.

Tabella 8 – Principali proprietà del fluido operativo HFC-134a.

Proprietà	U.d.m.	Valore
Temperatura critica	°C	101.1
Pressione critica	bar	40.67
Densità a 0 °C e 1 bar	Kg/m ³	4.25

ODP	-	0
GWP	-	1430
Classificazione di sicurezza	-	A1

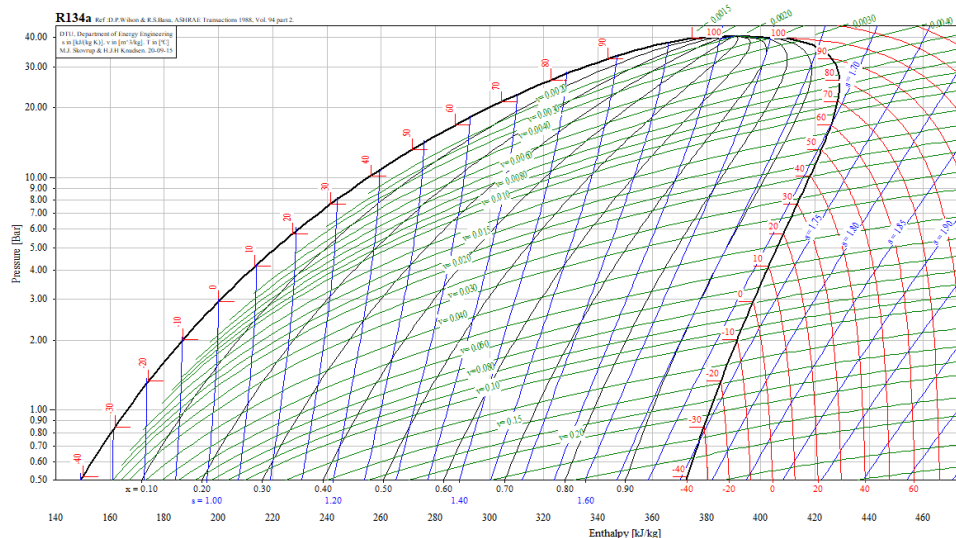


Figura 15 – Diagramma termodinamico del fluido operativo (HFC-134a) impiegato all'interno del sistema ORC sperimentale installato.

La **Figura 14** mostra inoltre la presenza di diverse tipologie di valvole:

- sette valvole manuali (VM), installate per l'ispezione e in caso di rottura;
- una valvola normalmente chiusa (VNC1) e due valvole normalmente aperte (VNO2, VNO2'), installate per l'operazione di avviamento dell'ORC, quando il fluido scorre attraverso la cassa esterna dell'espansore (ramo 1'-1bp) by-passando i cilindri dell'espansore stesso (ramo 1'-1). Questa procedura consente, da un lato, di raggiungere la condizione di surriscaldamento desiderata, evitando la potenziale presenza di gocce di liquido nell'espansore, e dall'altro di aumentare la temperatura sulle superfici dell'espansore stesso, prevenendo sollecitazioni termiche sulla macchina. Al raggiungimento della temperatura di set point all'ingresso dell'espansore (1bp), è possibile aprire la valvola VNC1, immettendo il fluido all'interno dei cilindri e attivando l'espansore;
- una valvola di sicurezza (*safety valve* in **Figura 14**), installata all'uscita dell'evaporatore per interrompere il funzionamento in caso di sovrappressione imprevista (la pressione massima ammissibile è settata a 26 bar).

Entrando nel dettaglio del sistema ORC, in **Figura 16** è presentato il disegno CAD-3D ad esso relativo. Il sistema ORC è stato fornito dalla società StarEngine [10], ed è stato concepito per l'applicazione nel settore residenziale, con possibilità di funzionamento anche come sistema di alimentazione off-grid. Lo sviluppo del banco prova, compresi i circuiti esterni di fornitura del calore e di raffreddamento, così come il sistema di acquisizione e controllo, sono stati invece specificatamente progettati e realizzati all'interno del Laboratorio di Tecnologie di Micro-generazione dell'Alma Mater Studiorum Università di Bologna.

Espansore e pompa di alimentazione sono macchine prototipali prodotte dal fornitore del sistema, mentre gli altri componenti sono commerciali. I diversi componenti sono collegati da tubi rigidi in rame, di diametro pari a 42 mm e 35 mm, rispettivamente per le linee di bassa e alta pressione.

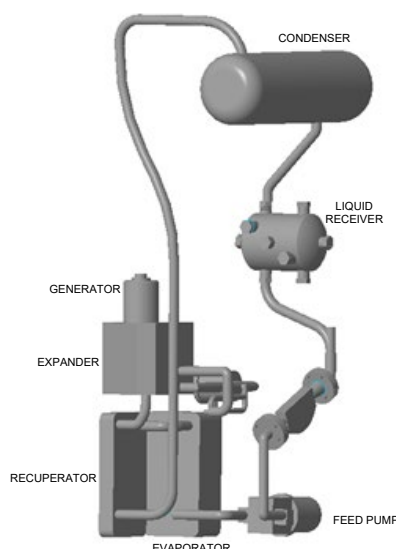


Figura 16 – Modello CAD 3D del sistema ORC.

Entrando nel dettaglio dei componenti e dei circuiti che compongono il banco prova, l'espansore del sistema ORC oggetto del presente studio è una macchina prototipale di espansore alternativo a pistoni. Tale espansore (**Figura 17**) è costituito da tre cilindri posti radialmente a 120° , che muovono lo stesso albero motore. Ogni cilindro ha un volume di 76.5 cm^3 , per una cilindrata totale di $230 \text{ cm}^3/\text{giro}$. L'ammissione e lo scarico del fluido avvengono tramite valvole a disco rotante, che vengono mosse dalla rotazione dell'albero tramite ingranaggi. In particolare, la valvola di ammissione inizia ad aprirsi al punto morto superiore (non è prevista la fasatura di anticipo) e rimane aperta per circa il 70% della corsa del pistone. A tale proposito va sottolineato che, quando la valvola è aperta, la sua area di passaggio del flusso non è costante, ma aumenta fino al suo valore massimo corrispondente alla metà della corsa di apertura (quindi al 35% della corsa del pistone), per poi diminuire nuovamente fino a quando la valvola non viene richiusa. L'espansore è inoltre provvisto di due bocche di ingresso: una porta il fluido alle valvole di ammissione, l'altra conduce direttamente allo scarico senza entrare nei cilindri. Quest'ultimo percorso viene utilizzato quando il circuito di by-pass esterno è attivato, cioè durante le operazioni di avviamento, al fine di far raggiungere al fluido le condizioni di temperatura desiderate e di riscaldare la cassa dell'espansore. In aggiunta, la superficie esterna dell'espansore è stata isolata termicamente tramite fogli di lana minerale, al fine di ridurre le dissipazioni termiche verso l'ambiente esterno che, in applicazioni simili, si sono dimostrate non trascurabili [11]. Infine, l'albero su cui è calettato l'espansore è accoppiato ad un generatore a magneti permanenti senza alcun riduttore di velocità e pertanto le due macchine funzionano alla stessa velocità di rotazione. Tale generatore è posto all'interno della cassa sigillata dell'espansore ed è raffreddato dallo stesso fluido di lavoro. La **Tabella 9** raccoglie le principali caratteristiche del prototipo di espansore installato.

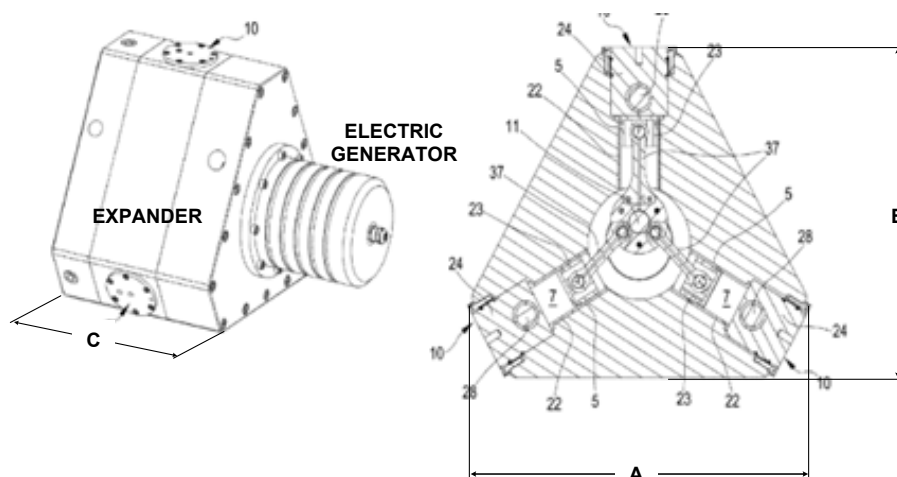


Figura 17 – Disegno dell’espansore del sistema ORC progettato [10].

Tabella 9 – Principali specifiche dell’espansore ORC.

	Unità	Valore
Modello	[-]	Alternativo a pistoni
Configurazione	[-]	3 pistoni radiali a 120°
Cilindrata Totale	[cm ³]	230
Alesaggio cilindro	[mm]	46
Corsa Pistone	[mm]	46
Dimensioni Esterne AxBxC	[mm]	350x410x320

Per quanto riguarda la pompa di alimentazione del fluido organico, è anch’essa una macchina prototipale realizzata dal fornitore del micro-ORC (Star Engine). Si tratta di una pompa ad ingranaggi esterni con cilindrata di circa 50 cm³/giro, accoppiata ad un motore asincrono da 1.5 kW. Tra l'albero motore e l'albero pompa è interposto un riduttore di velocità con un rapporto di velocità pari a 3:1. La velocità del motore della pompa è controllata da un variatore di frequenza, in grado di regolare la frequenza di alimentazione fino a 60 Hz, corrispondente ad una frequenza del motore pari a 15 Hz, poiché il motore ha quattro coppie di poli. La frequenza meccanica massima effettiva degli ingranaggi della pompa è quindi di 5 Hz, corrispondenti a 300 giri/min. La scelta di progettare la pompa con cilindrata relativamente alta e bassa velocità di rotazione ha avuto lo scopo di ridurre il rischio di cavitazione sul lato aspirazione della pompa, che aumenta con la velocità degli ingranaggi. Viceversa, la bassa velocità di rotazione ha un effetto negativo sull'efficienza volumetrica della pompa, poiché aumenta le perdite di fluido dall'alimentazione al lato di aspirazione della pompa.

Le principali caratteristiche della pompa di alimentazione sono riportate in **Tabella 10**.

Tabella 10 – Principali specifiche della pompa di alimentazione.

	Unità	Valore
Modello	[-]	pompa ad ingranaggi esterni
Cilindrata	[cm ³]	50
Velocità nominale	[rpm]	300
Numero di denti	[-]	10
Diametro esterno ingranaggio	[mm]	57
Diametro interno ingranaggio	[mm]	37
Ampiezza dentatura ingranaggio	[mm]	33
Potenza motore	[kW]	1.5

Come anticipato, gli scambiatori di calore presenti all'interno del sistema ORC sono l'evaporatore, il condensatore ad acqua, il condensatore ad aria ed il recuperatore:

- L'evaporatore è uno scambiatore di calore a piastre saldobrasate modello ONDA S202 (**Figura 18**), costituito da 64 piastre e caratterizzato da un volume pari a 8.53 litri (lato fluido organico) e 8.80 litri (lato acqua). La superficie di scambio termico non è indicata nella scheda tecnica del componente, ma può essere stimata dalle dimensioni e dal numero delle piastre, considerando un fattore accrescitivo che tiene conto dei passaggi all'interno dei quali scorre il fluido in ciascuna piastra.
- Il recuperatore è uno scambiatore dello stesso modello dell'evaporatore ma con 19 piastre, e caratterizzato da volumi pari a 2.06 litri e 2.33 litri, rispettivamente lato fluido di lavoro e lato acqua.
- Il condensatore ad acqua è uno scambiatore del tipo a fascio tubiero a 4 passaggi, caratterizzato da un volume lato fluido organico pari a 34.5 litri e da un volume lato acqua pari a 12.5 litri (**Figura 19**). Il condensatore ad acqua è, inoltre, il componente che trattiene il maggior volume di fluido di lavoro nel circuito. Non essendo fornito neanche il valore della superficie di scambio termico del condensatore, essa è stata stimata pari alla superficie esterna dei tubi in cui scorre l'acqua, che sono stati misurati sul campo.
- L'impianto è dotato anche di un condensatore ad aria, posto in parallelo a quello ad acqua, per potenziare la capacità di raffreddamento in caso di carichi frigoriferi elevati. Il condensatore ad aria è uno scambiatore di calore a tubi alettati dotato di due ventole ed ha una potenza frigorifera nominale di circa 9 kW. Pertanto, durante il normale funzionamento del sistema ORC, il condensatore ad aria non sarebbe in grado di fornire l'intera richiesta di raffreddamento del fluido di lavoro, ma può essere utilizzato solo in combinazione con il condensatore ad acqua, per aumentare la capacità di raffreddamento. In ogni caso, il condensatore ad acqua è generalmente in grado di soddisfare la richiesta frigorifera da solo.

In **Tabella 11** sono riassunte le principali caratteristiche degli scambiatori di calore.

Come si può osservare da **Figura 16**, inoltre, a valle del condensatore e prima dell'ingresso della pompa è presente un ricevitore di liquido. Si tratta di un serbatoio con un volume interno pari a 19 L, dotato di indicatori di livello del liquido, in modo che l'utilizzatore possa essere certo che la pompa aspiri fluido liquido ed evitare di conseguenza che possano verificarsi fenomeni di cavitazione. Lo scopo del ricevitore è quello di fornire un volume tampone per compensare la variazione del volume specifico del fluido di lavoro nel circuito, ad esempio dopo l'aumento della frazione liquida all'uscita del condensatore. È dotato di due bocche di ingresso, una collegata all'uscita del condensatore ad acqua e l'altra al condensatore ad aria, e una di uscita, diretta all'aspirazione della pompa. I tubi di ingresso e uscita del ricevitore sono dotati di valvole a sfera, quindi il serbatoio viene utilizzato anche per immagazzinare il fluido organico durante la manutenzione di altri componenti, generalmente insieme al condensatore ad acqua.

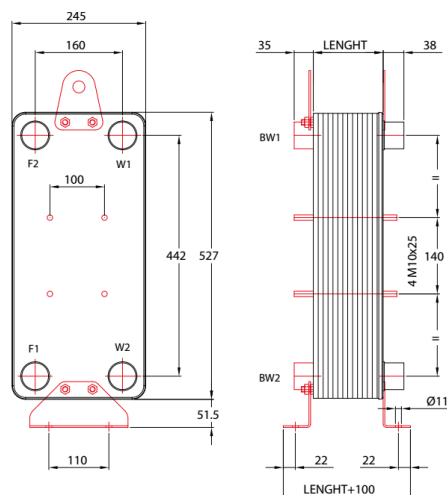


Figura 18 – Disegno dell’evaporatore a piastre saldobrasate riportante le principali dimensioni.

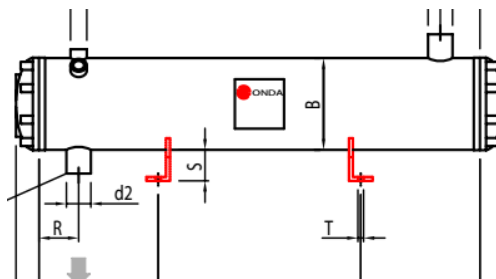


Figura 19 – Disegno del condensatore a fascio tubiero.

Tabella 11 – Principali specifiche degli scambiatori di calore.

	Unità	Evaporatore	Recuperatore	Condensatore ad acqua	Condensatore ad aria
Modello	[-]	Onda S202	Onda S202	Onda CT292	Non disp.
Volume lato caldo	[L]	8.796 (acqua)	2.330 (vapore)	34.5 (fluido operativo)	6
Volume lato freddo	[L]	8.526 (fluido operativo)	2.061 (liquido)	12.5 (acqua)	-
Numero di piastre	[-]	64	19	-	-
Numero di passaggi/tubi per passaggio	[-]	-	-	4/14	-
Superficie di scambio termico (stimata)	[m²]	6.2	1.8	3.5	Non disp.
Potenza nominale	[kW]	50	10	100	9

Il generatore elettrico, i cui dati di targa sono presentati in **Tabella 12**, è collegato direttamente all'espansore in un case ermetico. Si tratta di un generatore sincrono trifase a magneti permanenti con 4 coppie di poli, che viene raffreddato per mezzo dello stesso fluido di lavoro. L'uscita trifase è collegata ad un quadro elettrico separato che alimenta il carico elettrico, costituito da cinque carichi resistivi puri, collegati in parallelo tra loro ed a triangolo con la linea trifase di uscita del generatore. Ogni carico è composto da tre lampadine con una potenza nominale di 200 W ciascuna ed è provvisto di un interruttore

separato; pertanto, la potenza nominale assorbibile dal carico resistivo è regolabile tra un minimo di 600 W (1 carico attivato) e un massimo di 3000 W (5 carichi attivati), corrispondente alla potenza nominale dell'ORC.

Tabella 12 – Principali specifiche del generatore elettrico.

	Unità	Valore
Modello	[-]	Magnetic NGB 145 M-SA
Potenza nominale	[kW]	3
Tensione nominale	[V _{rms}]	380
Corrente nominale	[A _{rms}]	5.2
Frequenza	[Hz]	120
Coppia nominale	[Nm]	17.8

Due diversi circuiti di acqua alimentano condensatore ed evaporatore del sistema ORC, al fine rispettivamente di scaricare e introdurre il calore necessario al funzionamento del ciclo. La sorgente fredda ed il circuito che la connette al condensatore sono del tutto identici a quanto presentato nel paragrafo precedente relativo al banco prova per testare il MCI, e pertanto si rimanda a [Figura 7](#) in cui al posto dello scambiatore acqua-fumi va ovviamente considerato il condensatore dell'ORC. Invece, la sorgente di calore per l'evaporatore ed il circuito di acqua calda relativo sono presentati in [Figura 20](#). La fonte di calore è costituita da un riscaldatore elettrico (anche detto *puffer*) della capacità di 500 L, dotato di 5 elettroresistenze per una potenza nominale complessiva pari a 40 kW. Le resistenze possono essere attivate separatamente, con gradini di 8 kW, per regolare la potenza termica in input all'ORC. Il riscaldatore, inoltre, è in grado di funzionare con acqua pressurizzata fino a 5 bar. L'acqua viene alimentata all'evaporatore grazie a una pompa centrifuga (P2 in [Figura 20](#)), normalmente fatta funzionare a velocità costante. La regolazione della portata dell'acqua calda avviene tramite una valvola a sfera automatica installata in ingresso all'evaporatore. Il circuito è inoltre dotato di una valvola a tre vie per la regolazione della temperatura dell'acqua in ingresso all'evaporatore: la valvola miscela l'acqua riscaldata dal puffer con il flusso più freddo di ritorno proveniente dall'evaporatore e può essere controllata automaticamente tramite un controller PID. In caso di necessità, commutando le valvole manuali MV1 e MV2, l'acqua riscaldata dal puffer può essere miscelata con l'acqua del rubinetto, molto più fredda dell'acqua di ritorno, consentendo variazioni più drastiche della temperatura di alimento all'evaporatore.

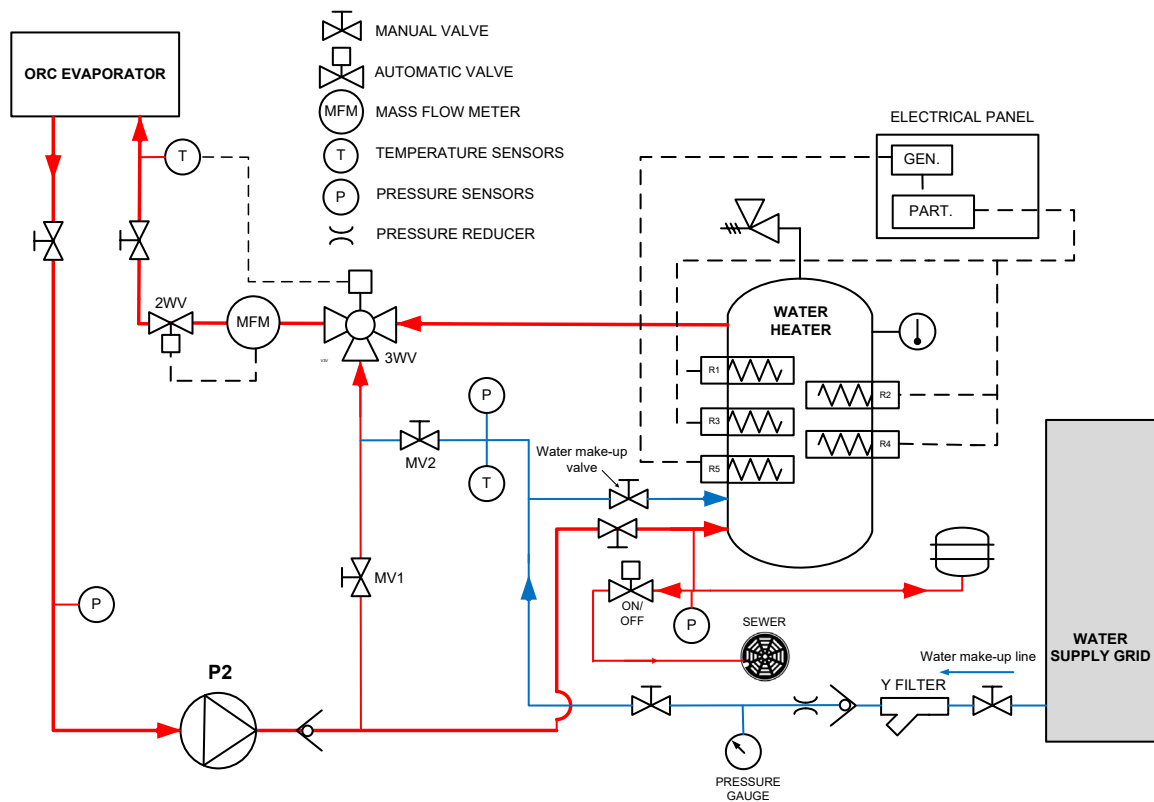


Figura 20 – Layout del circuito di acqua calda che alimenta l’evaporatore dell’ORC.

Le principali caratteristiche dei sensori e degli attuatori inclusi nel banco prova ORC sono, infine, elencate in [Tabella 13](#). Il dispositivo di acquisizione dei segnali di misura è un CompactRIO, della National Instruments, modello cRIO 9022, mentre il software di acquisizione è stato sviluppato in ambiente LabVIEW e dispone della libreria CoolProp per le proprietà termodinamiche del fluido di lavoro.

Tabella 13 – Principali caratteristiche di sensori ed attuatori installati nel banco prova.

Variabile	Sezione*	Tipologia	Calibrazione/range operativo	Precisione COTS**
SENSORI				
Temperatura (circuito ORC)	1, 1bp, 2, 3, 4, 5, 6, 7	termocoppia di tipo T	0-90 °C	±0.5 °C
Temperatura acqua calda	10, 11	termocoppia di tipo K	0-90 °C	±0.5 °C
Temperatura acqua fredda	12, 13			
Pressione (circuito ORC)	1, 6, 7	trasduttore di pressione Honeywell FP200	0-30 bar	±0.25 % FS
	2, 3, 4		0-10 bar	
Pressione acqua calda	H _{in} , H _{out}	trasduttore di pressione	1-6 bar	±0.25 % FS
Portata in massa (circuito ORC)	5	misuratore Coriolis (H+E Promass)	0.05-1.00 kg/s	±0.3 % RV
Densità (circuito ORC)			10-1300 kg/m ³	±0.1 kg/m ³
Portata in massa acqua calda	H _{in}	misuratore magnetico (H+E Promag)	0-6.4 l/s	±0.5 % RV
Portata in massa acqua fredda	C _{in}	misuratore magnetico (H+E Promag)	0-9.8 L/s	±0.5 % RV
Corrente e tensione	Linee di alimentazione generatore espansore e motore pompa	Trasduttori di tensione e corrente ad effetto Hall montati su PCB	0-400 V 0-5 A	±0.1 % RV ±0.2 % RV
ATTUATORI				
Portata di acqua calda	H _{in}	Valvola a sfera motorizzata	0-100%	-
Temperatura in ingresso acqua calda	H _{in}	Valvola a tre vie motorizzata	0-100%	-
Scarico acqua calda	H _{out}	Valvola a solenoide	On/off	-

* Con riferimento a [Figura 14](#).

** Precisione COTS (Component Off-the-Shelf): si riferisce alla precisione dello strumento indicata nella scheda tecnica, prima della sua calibrazione o della calibrazione della catena di misura.

4 Installazione dei banchi prova

Nel presente capitolo verranno mostrati i tre banchi prova, installati presso laboratori dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, e alcuni risultati sperimentali preliminari sul banco prova per test su MCI e sul banco prova ORC. Come già anticipato, l'installazione dei banchi prova relativi al motore a combustione interna e al digestore anaerobico è stata oggetto di realizzazione della presente annualità, mentre il sistema ORC era già presente all'interno del Laboratorio di Meccanica dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.

4.1 Installazione del banco prova sperimentale – motore a combustione interna

Come descritto nel Capitolo 3, ai fini di caratterizzare le prestazioni di un motore a combustione interna operante in assetto cogenerativo e alimentato da biogas, testando opportunamente e con un elevato grado di flessibilità la composizione del biogas all'interno del MCI, è stato progettato – in aggiunta al banco prova relativo al digestore anaerobico – anche un banco prova per MCI, in cui il biogas viene ottenuto tramite miscela di CO₂ e CH₄ sintetici. Tale banco prova, i cui componenti sono stati in parte acquistati e in parte erano già disponibili in Laboratorio, è stato installato presso il Laboratorio di Meccanica dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna. In una fase successiva della sperimentazione, si intende integrare il MCI con il digestore anaerobico (che, come verrà descritto nel Paragrafo 4.2 è attualmente installato presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroalimentari dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna), al fine di testarne il funzionamento con il biogas da esso prodotto.

Alcune foto del motore a combustione interna, installato presso il Laboratorio di Meccanica, sono mostrate in **Figura 21**.



Figura 21 – Foto del MCI installato presso il Laboratorio di Meccanica dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.

Per quanto riguarda il recupero termico dai fumi di scarico del MCI, sono stati acquistati due scambiatori di calore di diversa tipologia, rispettivamente a piastre e a fascio tubiero e mantello (*shell*). Durante l'attività sperimentale, si intende testare in primo luogo lo scambiatore shell e, successivamente (nel corso della terza annualità), anche quello a piastre.

Alcune foto degli scambiatori di calore vengono presentate in **Figura 22** ed in **Figura 23**, rispettivamente per quanto riguarda lo scambiatore a fascio tubiero e mantello e per quanto riguarda quello a piastre.



Figura 22 – Foto dello scambiatore di calore a fascio tubiero e mantello installato presso il Laboratorio di Meccanica dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.



Figura 23 – Foto dello scambiatore a piastre installato presso il Laboratorio di Meccanica dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.

Una parte (comprensiva di serbatoio di accumulo) del circuito dell'acqua di raffreddamento che alimenta lo scambiatore di calore è inoltre mostrato in **Figura 24**.



Figura 24 – Foto del serbatoio dell'acqua di raffreddamento installato in Laboratorio e di parte del circuito relativo.

La sensoristica installata all'interno del banco prova, invece comprende:

- due misuratori di portata identici, posizionati rispettivamente in uscita dalla bombola di CH₄ e da quella di CO₂. Foto del misuratore sono presentate in **Figura 25**;
- un sensore di pressione (**Figura 26**), posizionato sulla linea di alimentazione del motore;

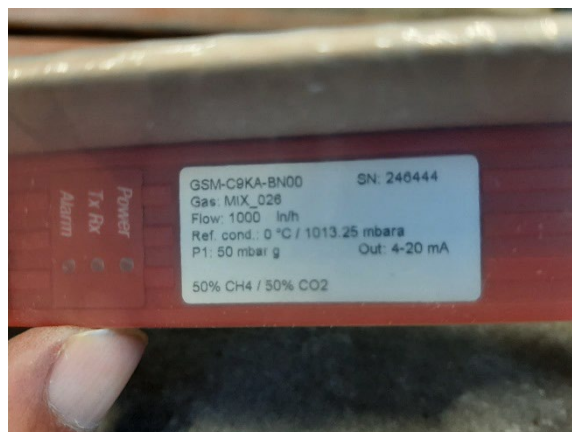


Figura 25 – Foto di uno dei due misuratori di portata (identici) installati.



Figura 26 – Foto del sensore di pressione installato.

Per ciò che concerne il sistema di l'acquisizione in ambiente LabVIEW dei segnali processati da Arduino, in **Figura 27** è mostrata una foto esplicativa delle connessioni realizzate. Nel dettaglio, è stato realizzato un diagramma a blocchi, ed una corrispondente interfaccia grafica per la visualizzazione dei segnali in tempo reale, grazie al supporto del tool LINX, appositamente creato per interfacciare LabVIEW con i dispositivi elettronici di prototipazione ed altri strumenti di acquisizione dati. La libreria in questione dispone di numerose funzionalità, tra le quali anche i blocchi per la lettura dei segnali analogici impiegati per l'acquisizione delle misure di pressione e portata. A differenza di questi ultimi, il chip MAX6675 fornisce in uscita dei pacchetti dati in digitale, pertanto è stato realizzato un codice attraverso l'IDE di Arduino per la lettura e la conversione dei pacchetti; successivamente, sfruttando la libreria LINX, è stato importato il dato di temperatura via seriale.

Il codice caricato sulla scheda è mostrato in **Figura 28**, mentre il pannello di controllo del sistema è mostrato nelle **Figura 29** e **Figura 30**.

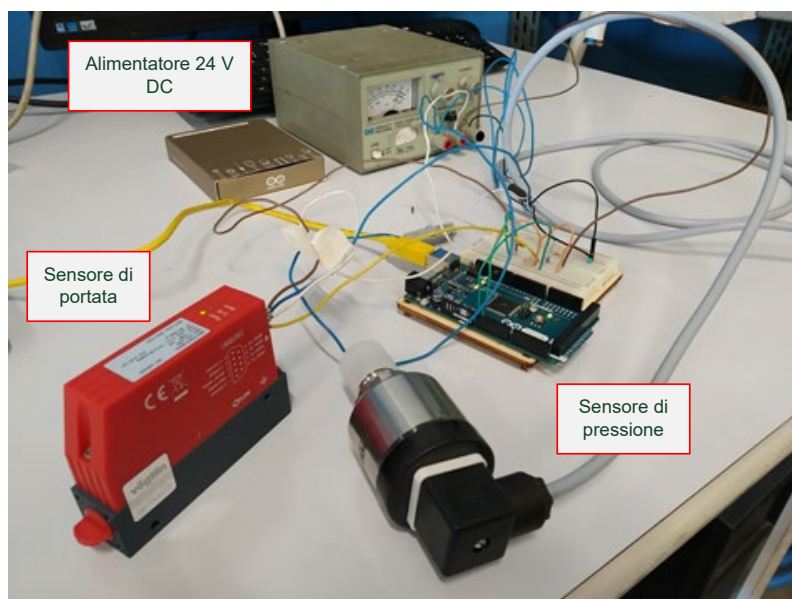


Figura 27 – Foto del sistema di acquisizione dai sensori di misura.

```
#include <SPI.h>

#define MAX6675_CS 10
#define MAX6675_SO 12
#define MAX6675_SCK 13

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  Serial.println(readThermocouple());
  delay(1000);
}

double readThermocouple() {

  uint16_t v;|
  pinMode(MAX6675_CS, OUTPUT);
  pinMode(MAX6675_SO, INPUT);
  pinMode(MAX6675_SCK, OUTPUT);
  digitalWrite(MAX6675_CS, LOW);
  delay(1);

  // Read in 16 bits,
  // 15 = 0 always
  // 14..2 = 0.25 degree counts MSB First
  // 2 = 1 if thermocouple is open circuit
  // 1..0 = uninteresting status

  v = shiftIn(MAX6675_SO, MAX6675_SCK, MSBFIRST);
  v <<= 8;
  v |= shiftIn(MAX6675_SO, MAX6675_SCK, MSBFIRST);

  digitalWrite(MAX6675_CS, HIGH);
  if (v & 0x4)
  {
    // Bit 2 indicates if the thermocouple is disconnected
    return NAN;
  }

  // The lower three bits (0,1,2) are discarded status bits
  v >>= 3;

  // The remaining bits are the number of 0.25 degree (C) counts
  return v*0.25;
}
```

Figura 28 – Codice sviluppato per l'acquisizione dei segnali di misura.

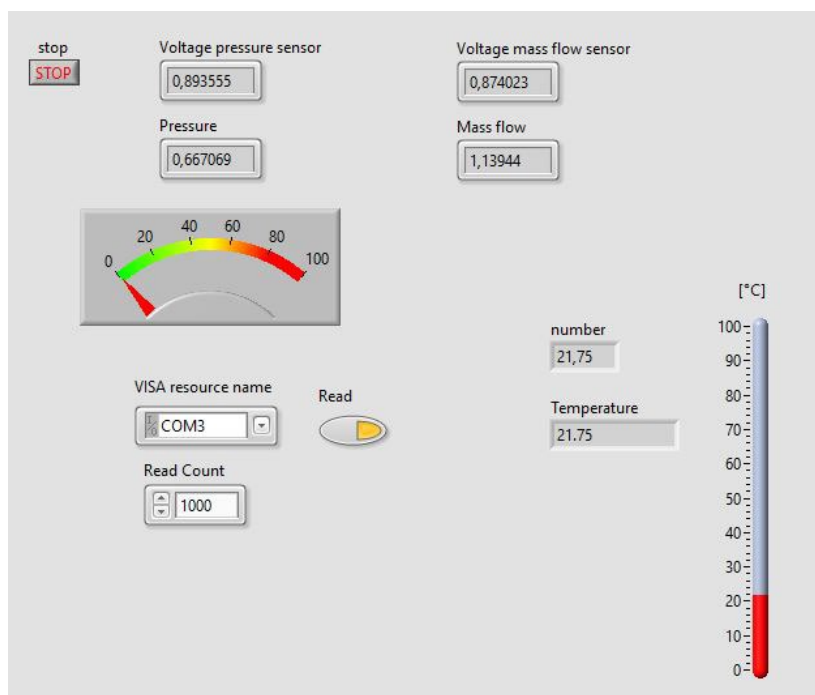


Figura 29 – Screenshot del pannello di controllo del sistema di acquisizione dai sensori di misura.

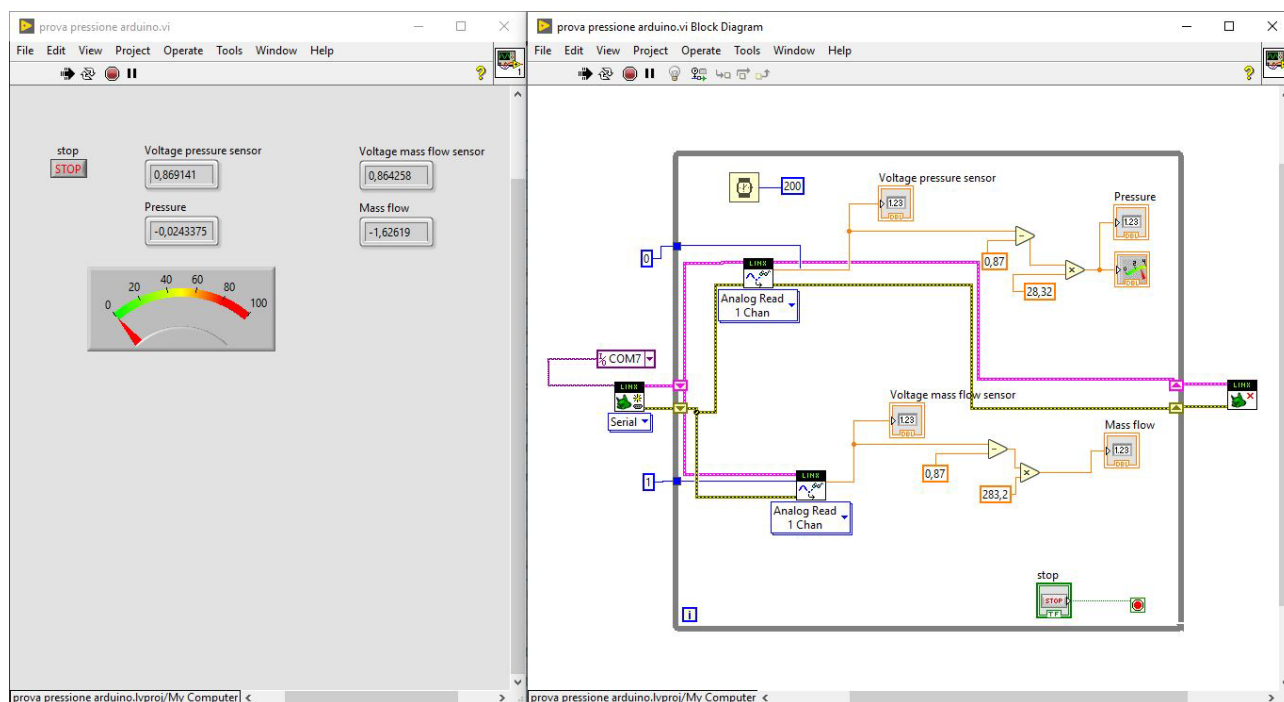


Figura 30 – Screenshot del pannello di controllo del sistema di acquisizione dai sensori di misura con un esempio di applicazione.

4.1.1 Prove preliminari per la caratterizzazione sperimentale del motore a combustione interna

Al fine di caratterizzare in maniera completa ed esaustiva il motore a combustione interna multi-fuel installato presso il Laboratorio di Meccanica dell'Alma Mater Studiorum Università di Bologna, in aggiunta alla specifica applicazione oggetto di analisi (accoppiamento con il digestore anaerobico e dunque

alimentazione con biogas), si è deciso di testare il suo funzionamento anche in condizioni di alimentazione con benzina e GPL. Nel dettaglio, si è proceduto come segue:

- set di prove con MCI alimentato a benzina al variare del carico elettrico, con motore operante in assetto non cogenerativo;
- set di prove con MCI alimentato a GPL al variare del carico elettrico, con motore operante in assetto non cogenerativo;
- set di prove con MCI alimentato a GPL al variare del carico elettrico, con motore operante in assetto cogenerativo.

Durante queste prove sono state riscontrate alcune criticità nel funzionamento del motore, in particolare in relazione alla regolazione dell'aria comburente al variare del carico del motore stesso. Non è infatti possibile effettuare un controllo sul rapporto aria-combustibile e il sistema di auto-regolazione del MCI ha mostrato alcune problematiche, non consentendo in diverse occasioni una corretta carburazione.

In seguito a tali criticità e in accordo con ENEA, si è pertanto deciso di effettuare un'analisi più approfondita del funzionamento del motore con benzina e GPL e di rinviare alla successiva annualità la caratterizzazione del motore nel caso di alimentazione con una miscela di CH_4 e CO_2 e con biogas.

I risultati delle prove sperimentali effettuate sono presentati da **Figura 31** a **Figura 33**, per quanto riguarda i set di prove con benzina e GPL sul motore operante in assetto non cogenerativo, e da **Figura 34** a **Figura 37**, per quanto riguarda il set di prove con GPL sul motore operante in assetto cogenerativo. Come si può notare, il comportamento del sistema risulta sensibilmente differente al variare del combustibile con cui viene alimentato, soprattutto in termini di consumo specifico (**Figura 31**): all'aumentare del carico, infatti, si nota un aumento del consumo specifico di benzina fino al raggiungimento di un punto di massimo, oltre il quale il consumo specifico torna a diminuire, seppure più lentamente; viceversa, alimentando il MCI con GPL si nota un iniziale decremento del consumo specifico con l'aumentare del carico, fino al raggiungimento di un punto di minimo oltre il quale se ne registra un aumento. In generale, la variazione di consumo specifico sembra essere più contenuta se il motore viene alimentato con GPL.

Inoltre, ai bassi carichi si osservano comportamenti differenti – tra benzina e GPL – anche in termini di temperatura dei fumi allo scarico (**Figura 33**); le temperature tendono invece a coincidere a carichi elevati. Il rendimento elettrico al variare del carico (**Figura 32**), al contrario, presenta un trend simile per i due combustibili e assume valori più alti alimentando il motore con GPL.

Per quanto riguarda il funzionamento del MCI in assetto cogenerativo, infine, si può notare come la potenza termica disponibile (**Figura 37**), ovvero la potenza termica massima recuperabile dai fumi del motore supponendo una temperatura ambiente pari a 25 °C, sia compresa tra circa 0.9 kW e 1.5 kW rendendo il sistema idoneo per applicazioni residenziali di produzione di acqua calda sanitaria per utenze monofamiliari.

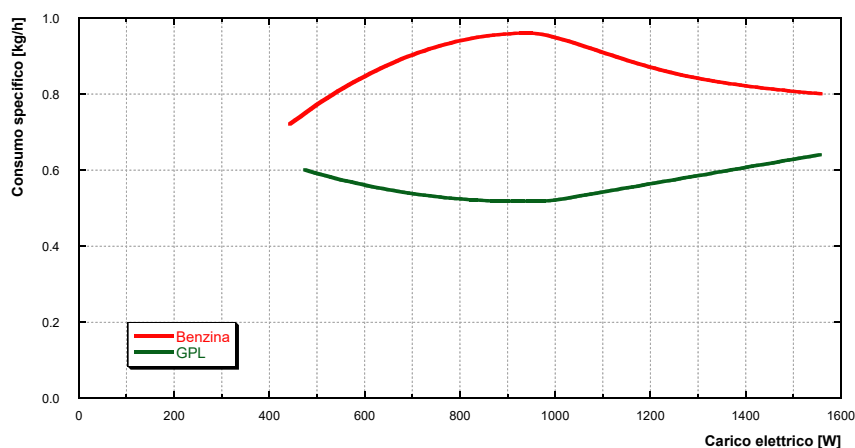


Figura 31 – Andamento del consumo specifico di combustibile del motore al variare del carico elettrico (set di prove con benzina e GPL in assetto non cogenerativo).

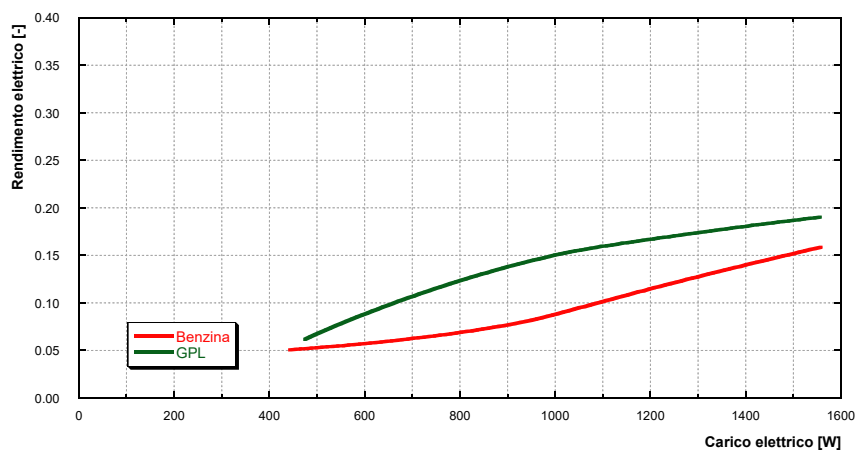


Figura 32 – Andamento del rendimento elettrico del motore al variare del carico elettrico (set di prove con benzina e GPL in assetto non cogenerativo).

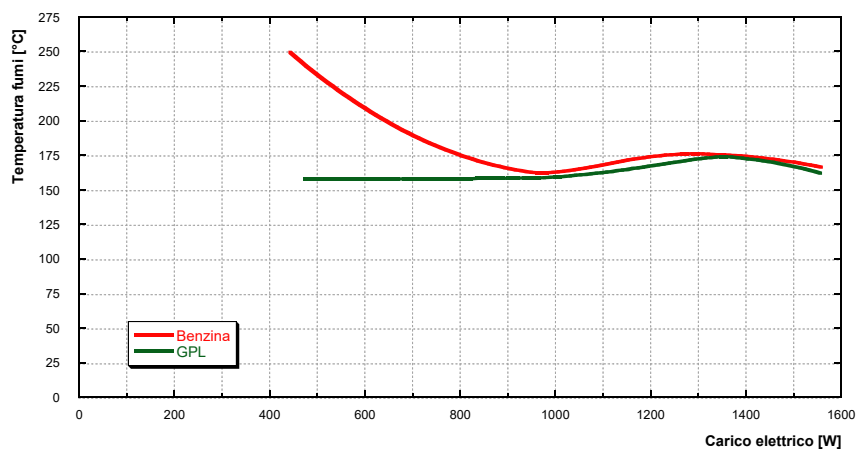


Figura 33 – Andamento della temperatura dei fumi allo scarico del motore al variare del carico elettrico (set di prove con benzina e GPL in assetto non cogenerativo).

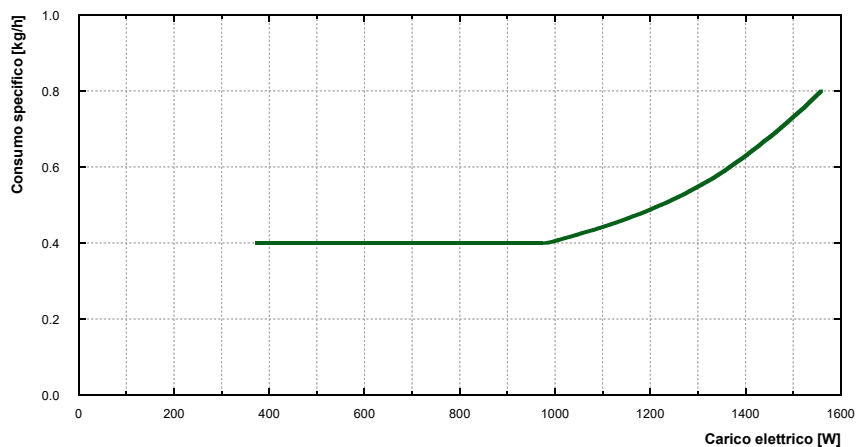


Figura 34 – Andamento del consumo specifico di combustibile del motore al variare del carico elettrico (set di prove con GPL in assetto cogenerativo).

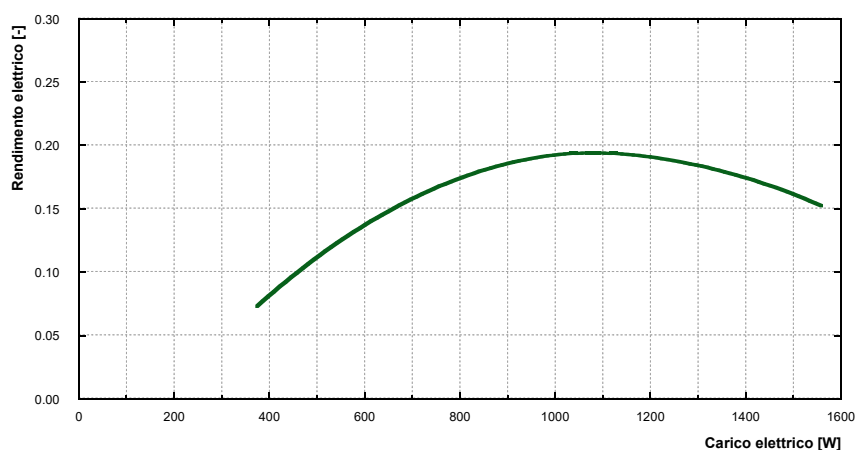


Figura 35 – Andamento del rendimento elettrico del motore al variare del carico elettrico (set di prove con GPL in assetto cogenerativo).

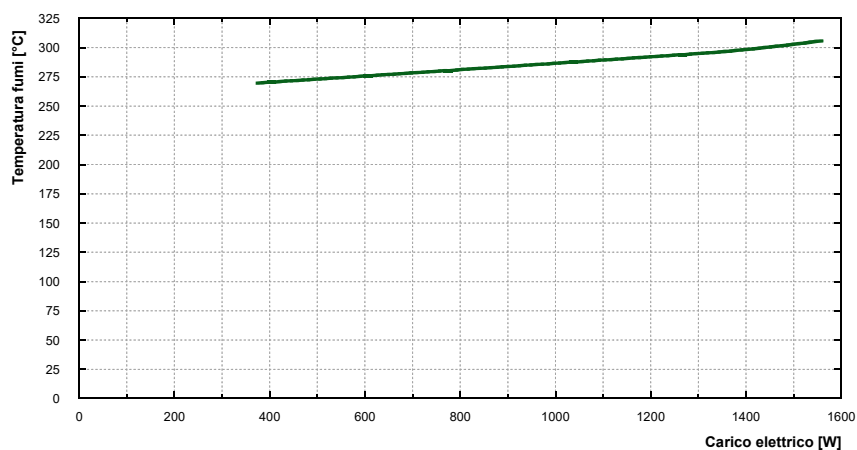


Figura 36 – Andamento della temperatura dei fumi in ingresso allo scambiatore acqua-fumi, al variare del carico elettrico (set di prove con GPL in assetto cogenerativo).

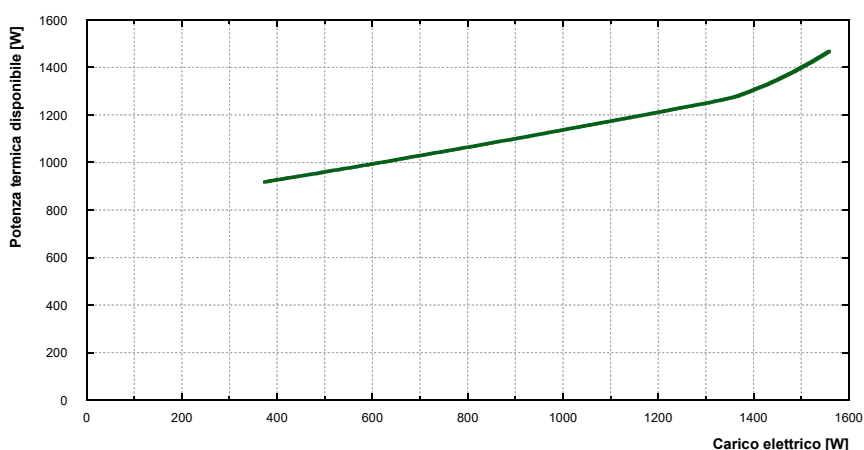


Figura 37 – Andamento della potenza termica massima disponibile per il recupero dai fumi del motore, al variare del carico elettrico (set di prove con GPL in assetto cogenerativo, potenza calcolata considerando una temperatura ambiente pari a 25 °C).

4.2 Installazione del banco prova sperimentale – digestore anaerobico

Il banco prova sperimentale relativo al digestore anaerobico è stato installato nel contesto di un laboratorio situato presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroalimentari dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna. Alcune foto del digestore installato sono presentate in .



Figura 38 – Foto del digestore anaerobico installato in presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroalimentari dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.

In **Figura 39**, inoltre, vengono presentati alcuni dettagli relativi alla sezione di inserimento del rifiuto organico (a) e alle sezioni di uscita del biogas e del fertilizzante prodotto dal sistema come materiale di scarto, ma che – previo controllo sul contenuto di azoto – può essere reimpiegato nel settore agricolo. In **Figura 40**, è invece presentato un dettaglio del filtro a carboni attivi per l'H₂S, che viene posto in uscita dal digestore sulla corrente di biogas.



Figura 39 – Foto delle sezioni di ingresso della biomassa (a) e di uscita del biogas e del fertilizzante prodotti (b).



Figura 40 – Foto del sistema di filtraggio dell' H_2S installato.

In aggiunta, come già detto, per la successiva integrazione del MCI con il digestore anaerobico, è necessario prevedere un compressore che assicuri l'alimentazione al motore alla corretta pressione. Alcune foto del compressore acquisito sono presentate in **Figura 41**.

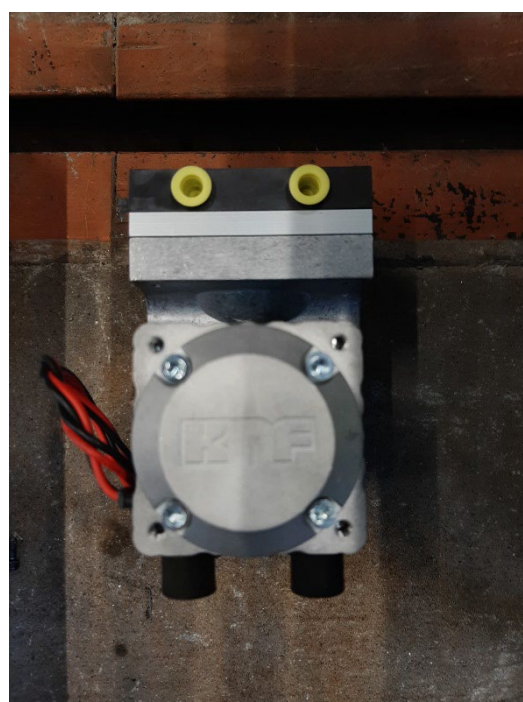
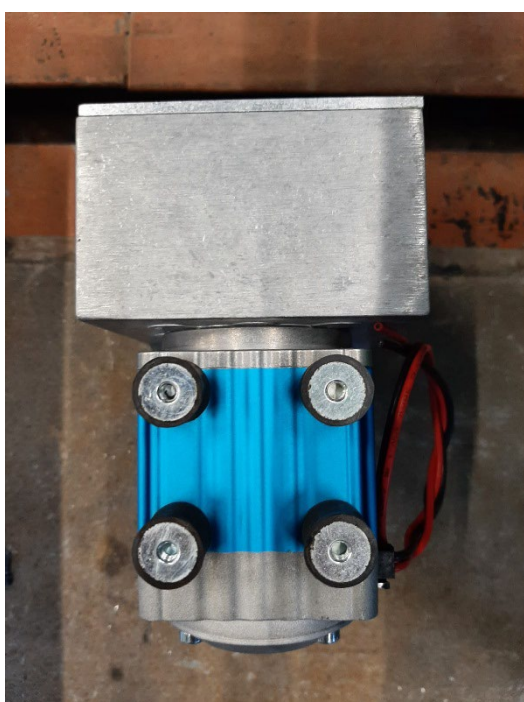


Figura 41 – Foto del compressore per biogas.

Per quanto riguarda la sensoristica, facendo riferimento ai test che verranno effettuati sul sistema integrato al MCI, i misuratori di portata del biogas e di pressione sono i medesimi presentati nel paragrafo precedente, mentre, per la contabilizzazione del recupero termico dai fumi del MCI (scambiatore acqua-fumi), si utilizzerà un contacalorie mostrato in **Figura 42** che verrà installato sul lato acqua dello scambiatore.



Figura 42 – Foto del contacalore per la contabilizzazione dello scambio termico acqua-fumi.

4.3 Banco prova sperimentale – ORC

In **Figura 43** sono mostrate alcune foto del banco prova ORC presente all'interno del Laboratorio di Tecnologie di Micro-generazione dell'Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Il sistema, come già detto nel Capitolo 3, è stato progettato per rispettare vincoli di compattezza con ingombri pari a 80x85x300 cm (larghezza x profondità x altezza).



Figura 43 – Foto del banco prova ORC installato presso il Laboratorio di Tecnologie di Micro-generazione dell'Alma Mater Studiorum Università di Bologna.

Una foto dell'espansore è invece presentata in [Figura 44](#).



Figura 44 – Foto dell'espansore del sistema ORC installato presso il Laboratorio di Tecnologie di Microgenerazione dell'Alma Mater Studiorum Università di Bologna [10].

L'architettura della pompa può essere osservata in [Figura 45](#). Il corpo pompa è composto da diversi elementi: guardando la [Figura 45a](#) e la [Figura 45c](#), da sinistra verso destra, è possibile osservare la prima flangia in acciaio, che contiene i cuscinetti dei due alberi, e successivamente la parete sinistra in bronzo; al centro c'è invece il case degli ingranaggi della pompa, in alluminio, in cui sono presenti i canali di ingresso e uscita. Il quarto elemento è la parete destra in bronzo, identica a quella sinistra; la flangia destra è simile a quella sinistra e contiene i due cuscinetti, ma presenta un foro per la trasmissione dell'albero della ruota motrice. Il sesto elemento è il case degli ingranaggi del riduttore di velocità, uno dei quali (il più piccolo) è direttamente collegato all'albero motore. Tutti gli elementi sono connessi al case centrale degli ingranaggi per mezzo di viti, e la tenuta è assicurata da diversi O-ring in gomma nitrilica interposti tra gli elementi.

L'albero motore è cavo per due scopi, ovvero al fine di permettere il passaggio dell'olio lubrificante nella scatola del riduttore e per lasciar passare il fluido nella carcassa del motore. Di conseguenza, il fluido organico stesso fornisce il raffreddamento per il motore elettrico. Questa soluzione implica che la tenuta debba essere assicurata in tutti i componenti della pompa, compreso il motore elettrico.

Il modello CAD 3D è stato ottenuto da un processo di reverse engineering, che ha permesso di valutare la cilindrata effettiva della pompa ad ingranaggi, stimata intorno ai 50 cm³, e le dimensioni caratteristiche dell'ingranaggio.

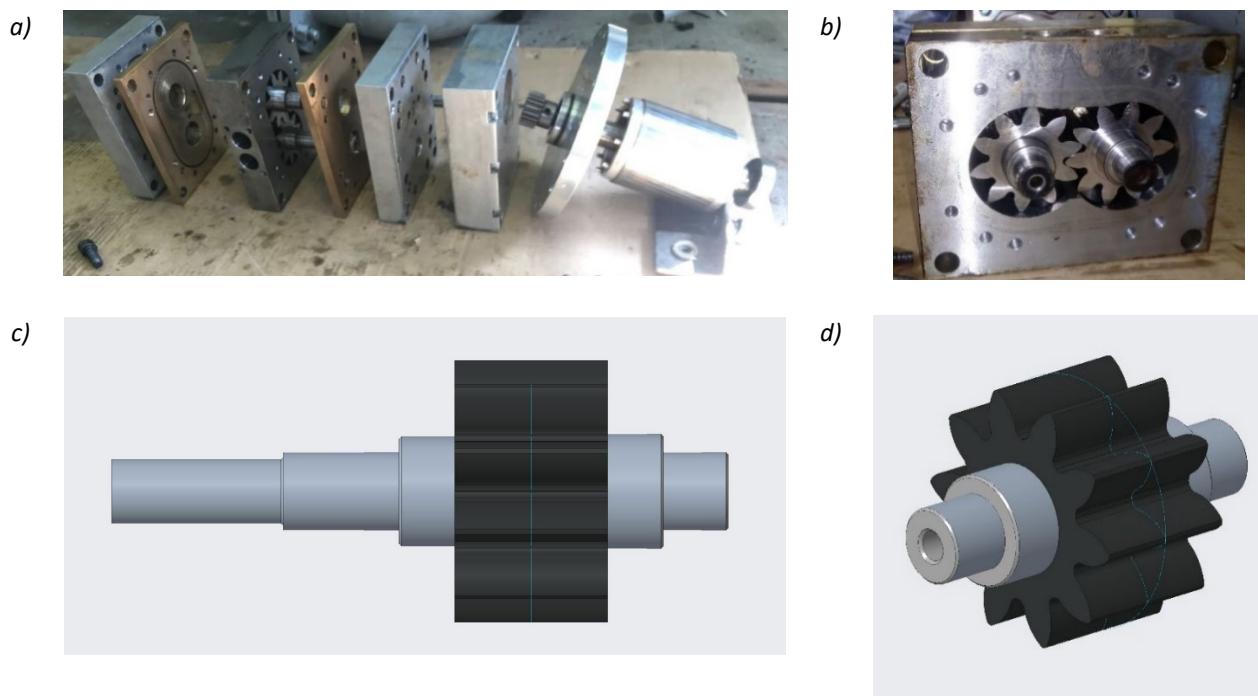


Figura 45 – Foto della pompa di alimentazione del sistema ORC e modello CAD 3D: a) foto degli elementi della pompa disassemblati; b) vista frontale degli ingranaggi della pompa; c) modello CAD di un ingranaggio (vista laterale); d) modello CAD dell’ingranaggio.

In **Figura 46** sono mostrate le fotografie del condensatore a fascio tubiero, mentre in **Figura 47** è mostrato il ricevitore di liquido.



Figura 46 – Fotografie del condensatore a fascio tubiero.



Figura 47 – Fotografia del ricevitore di liquido.

Inoltre, una foto del riscaldatore elettrico (o puffer), che alimenta con acqua calda l'evaporatore del sistema ORC, è mostrata in **Figura 48**, mentre carico e quadro elettrico sono presentati in **Figura 49**.

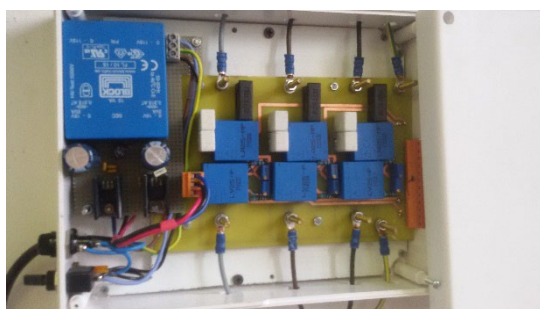


Figura 48 – Fotografia del puffer (riscaldatore elettrico).



Figura 49 – Fotografia del quadro elettrico e del carico.

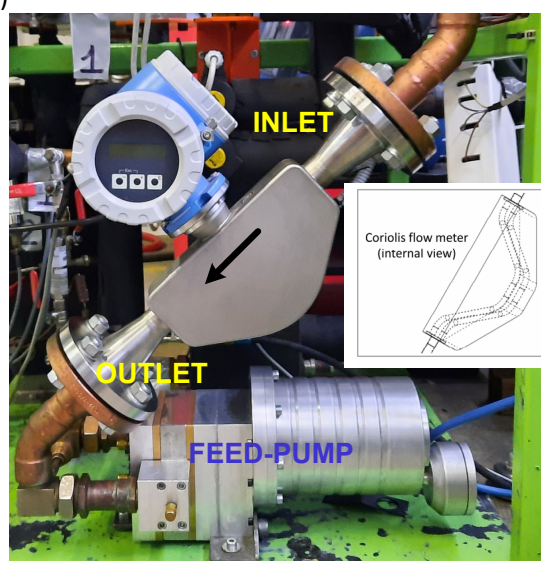
Infine, alcune foto relative ai sensori di misura installati nel banco prova del sistema ORC sono mostrate in **Figura 50**.



a)



b)



c)

Figura 50 – Fotografie dei sensori installati: a) circuito con sensori di tensione e corrente; b) raccordo a T con termocoppia e trasduttore di pressione; c) misuratore di portata di tipo Coriolis.

4.3.1 Risultati sperimentali preliminari

Nel seguito sono riportati alcuni risultati registrati durante la caratterizzazione sperimentale svolta sul banco prova ORC. I dati presentati sono valori medi riferiti a prove di funzionamento off-design in regime stazionario, in diverse condizioni di temperatura e portata di acqua calda e fredda, velocità della pompa di alimento del fluido organico e carico elettrico connesso all'espansore. Tali condizioni sono ottenute attraverso i diversi dispositivi di controllo citati in precedenza, e mantenute circa costanti per intervalli superiori a 1000 s.

La **Figura 50** raccoglie le condizioni operative, in termini di temperatura di sorgente calda e fredda (T_{Hin} e T_{Cin}) e portata in massa di fluido organico ($\dot{m}_{ORC}$), analizzate nel corso della campagna sperimentale svolta sul sistema micro-ORC. Come si vede, la temperatura dell'acqua calda in ingresso all'evaporatore è stata variata fra 65 °C e 85°C, mentre la temperatura dell'acqua al condensatore varia fra 18 °C e 30 °C, a seconda delle condizioni ambiente. La portata in massa di fluido organico, proporzionale alla frequenza (regolabile) della pompa di alimento, varia fra 70 g/s e 270 g/s. Un aumento del valore di portata di fluido organico incrementa la pressione di evaporazione (che dipende anche dal carico elettrico connesso all'espansore, e varia all'interno del range 13-23 bar, **Figura 52**), e, in maniera più lieve, anche quella di condensazione, che tuttavia è influenzata principalmente dalla temperatura dell'acqua nel circuito di raffreddamento del condensatore (**Figura 53**), e varia fra 6 bar e 10 bar.

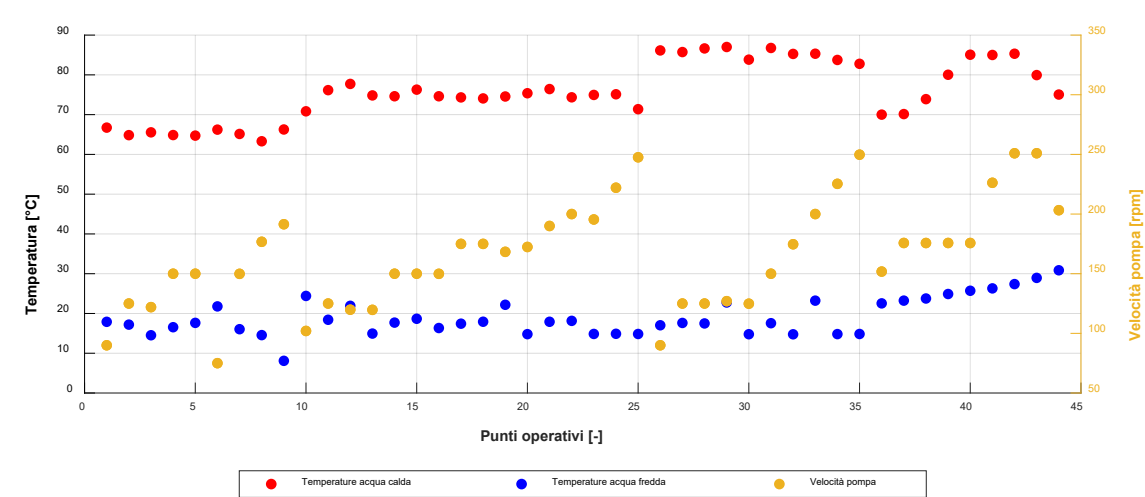


Figura 51 – Condizioni operative analizzate sperimentalmente.

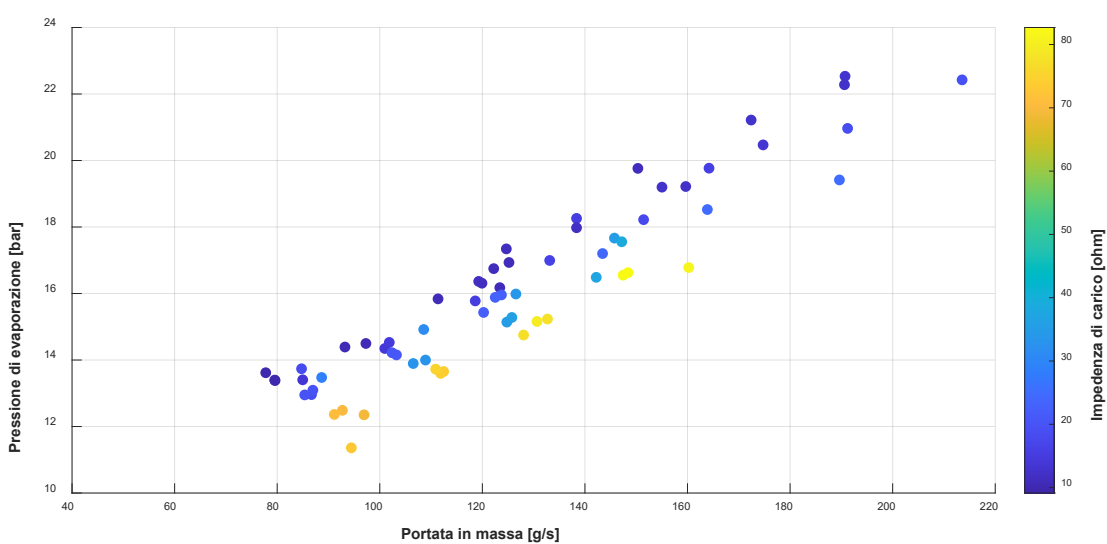


Figura 52 – Pressione di evaporazione in funzione della portata in massa di fluido organico, al variare del carico elettrico all’espansore.

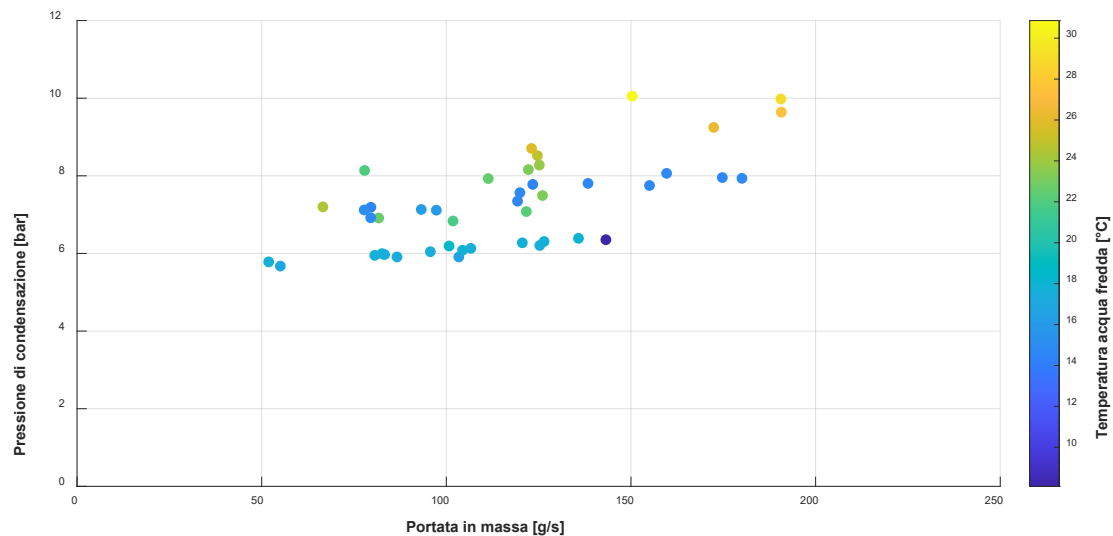


Figura 53 – Pressione di condensazione in funzione della portata in massa di fluido organico, al variare della temperatura dell’acqua al condensatore.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti, come mostrato in **Figura 54**, la potenza elettrica prodotta cresce linearmente con la differenza di pressione fra l’ingresso e l’uscita dell’espansore, Δp_{exp} . Con il Δp_{exp} che varia da 4 bar a 15 bar, la potenza aumenta da circa 200 W a più di 1600 W. In **Figura 54** è indicato anche il livello di temperatura di sorgente: come si vede, i valori più alti di Δp_{exp} , e dunque anche di potenza in uscita, sono ottenuti con temperature di sorgente più alte (> 75 °C), che consentono di raggiungere pressioni di evaporazione maggiori. Questo aspetto è evidenziato anche in **Figura 55**, dove la potenza elettrica è mostrata in funzione del grado di surriscaldamento in ingresso all’espansore. Quest’ultimo è definito come la differenza fra la temperatura misurata in ingresso all’espansore e la temperatura di saturazione corrispondente alla pressione di evaporazione. Per data temperatura di sorgente, un valore più basso del grado di surriscaldamento implica una pressione di evaporazione più alta, dunque un salto di pressione maggiore. Si può notare che per valori di temperatura di sorgente prossimi a 85 °C non sono presenti dati sperimentali con grado di surriscaldamento inferiore a 10 °C. Tale mancanza è legata, da un lato, alla pressione di vaporizzazione corrispondente a valori di surriscaldamento inferiori, vicina al limite previsto per l’impianto in oggetto (26 bar), dall’altro a problemi di cavitazione all’aspirazione della pompa di alimento, che si verificano per alti valori della velocità di rotazione della pompa stessa.

L’andamento della potenza termica in ingresso all’evaporatore dell’impianto ORC è riportato in **Figura 56**. Il grafico evidenzia che il valore della potenza termica scambiata all’evaporatore ($\dot{Q}_{ev}$) dipende principalmente dalla portata in massa di fluido organico nel circuito ORC, la quale determina la richiesta di potenza dalla sorgente di calore. La potenza varia fra 10 kW e 35 kW con la portata che aumenta da circa 50 g/s a 220 g/s.

La temperatura dell’acqua in uscita dall’evaporatore, disponibile per alimentare l’utenza termica, è riportata in **Figura 57** in funzione della temperatura di sorgente e della portata in volume di acqua calda. Come si vede, l’effetto principale è dato dalla temperatura di sorgente, mentre la portata $\dot{m}_{ORC}$ presenta un’influenza minore. In **Figura 58** è inoltre riportato il salto di temperatura dell’acqua fra ingresso e uscita dall’evaporatore, che mostra un incremento all’aumentare della portata di fluido organico, ed è più alto per basse portate di acqua calda. Per alte portate di acqua (> 2.4 L/s), la differenza di temperatura rimane sempre al di sotto dei 3 °C.

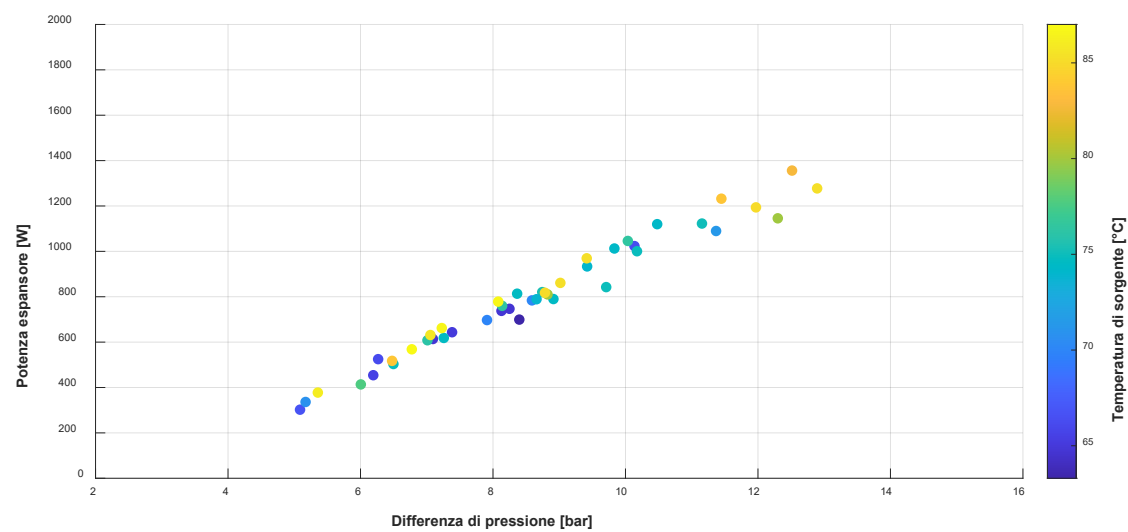


Figura 54 – Potenza elettrica espansore in funzione della differenza di pressione, al variare della temperatura di sorgente.

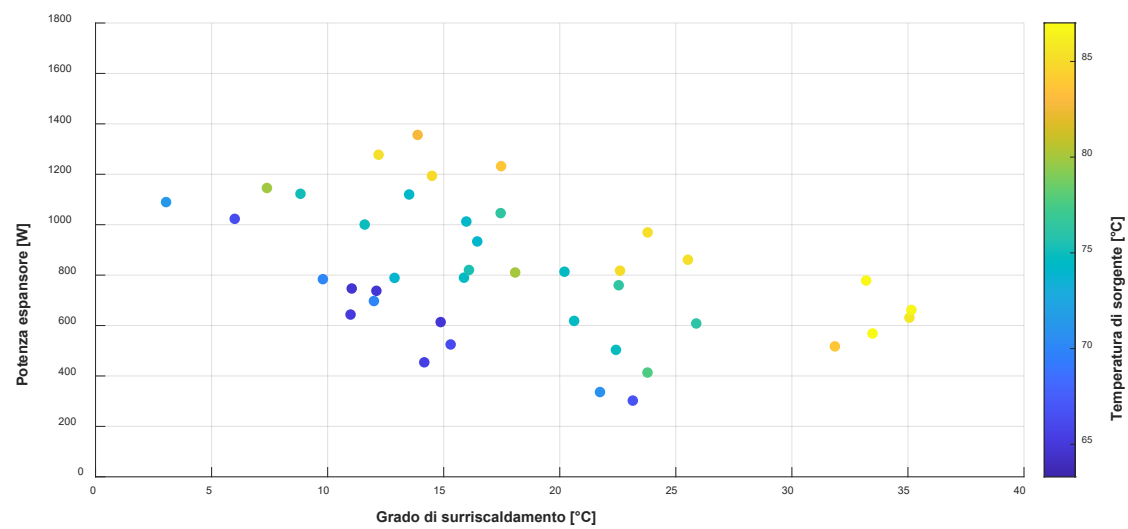


Figura 55 – Potenza elettrica espansore in funzione del grado di surriscaldamento, al variare della temperatura di sorgente.

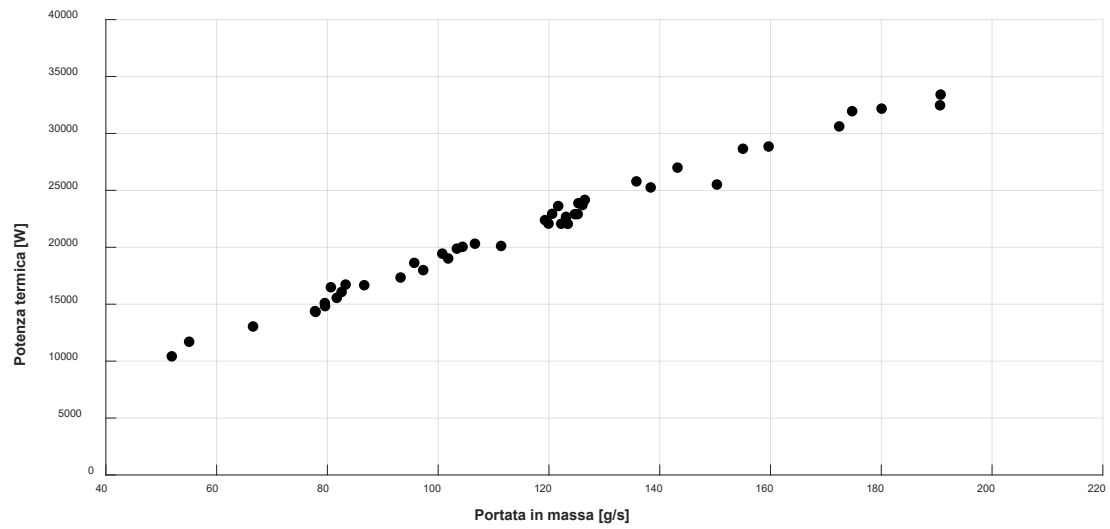


Figura 56 – Potenza termica evaporatore in funzione della portata in massa di fluido organico.

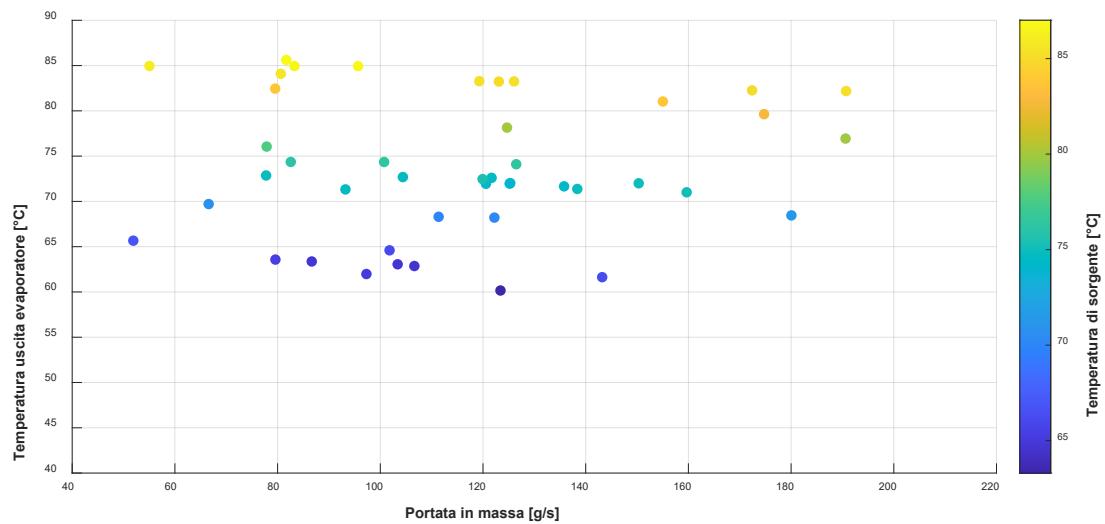


Figura 57 – Temperature in uscita dall'evaporatore in funzione della portata in massa di fluido organico al variare della temperatura di sorgente.

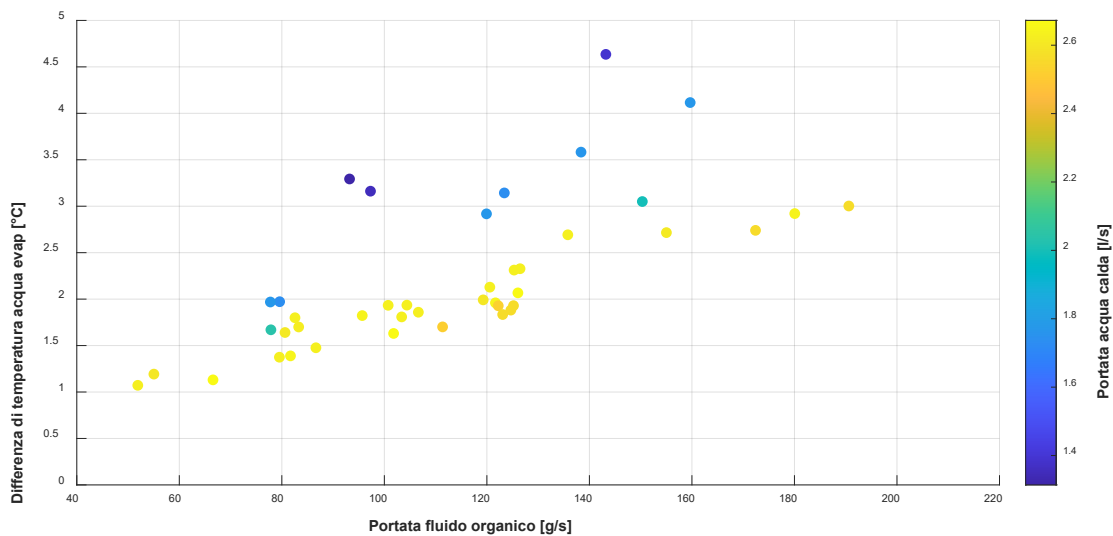


Figura 58 – Differenza di temperatura acqua calda all’evaporatore in funzione della portata in massa di fluido organico al variare della portata dell’acqua calda.

Infine, in **Figura 59** ed in **Figura 60**, sono presentate la potenza elettrica prodotta dall’espansore dell’ORC e la potenza termica residua (ovvero disponibile a valle dell’evaporatore del sistema ORC per la produzione di acqua calda sanitaria), rispettivamente in funzione della potenza assorbita dall’evaporatore e della temperatura di sorgente. Si sottolinea che la potenza termica residua è stata calcolata immaginando una temperatura ambiente pari a 25 °C. Come si può osservare, tali risultati garantiscono che – nell’intero range operativo del sistema ORC – la potenza termica residua a valle dell’evaporatore sia sempre compatibile con la richiesta termica per la produzione di acqua calda sanitaria di un’utenza residenziale.

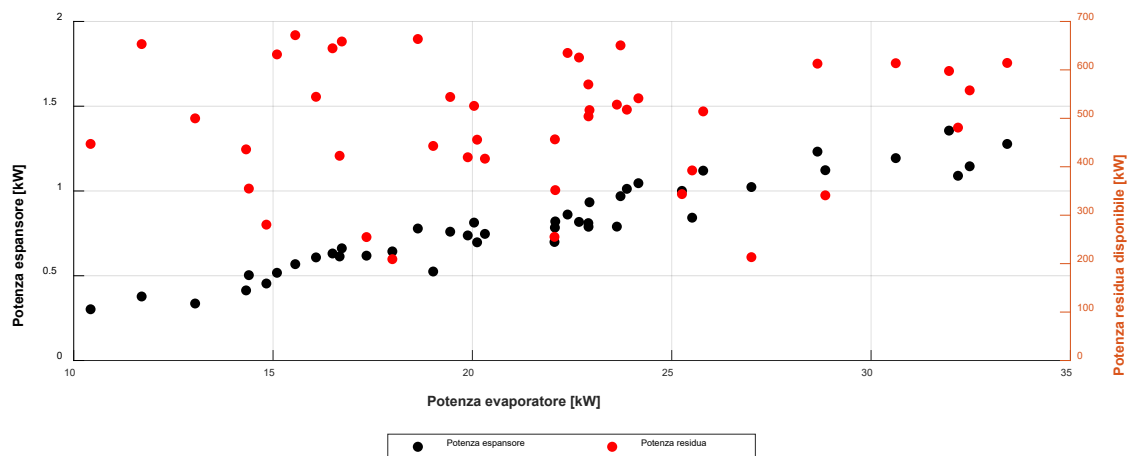


Figura 59 – Potenza elettrica prodotta dall’espansore dell’ORC e potenza termica residua disponibile a valle dell’evaporatore (supponendo una temperatura ambiente pari a $T = 25\text{ °C}$), in funzione della potenza in ingresso all’evaporatore.

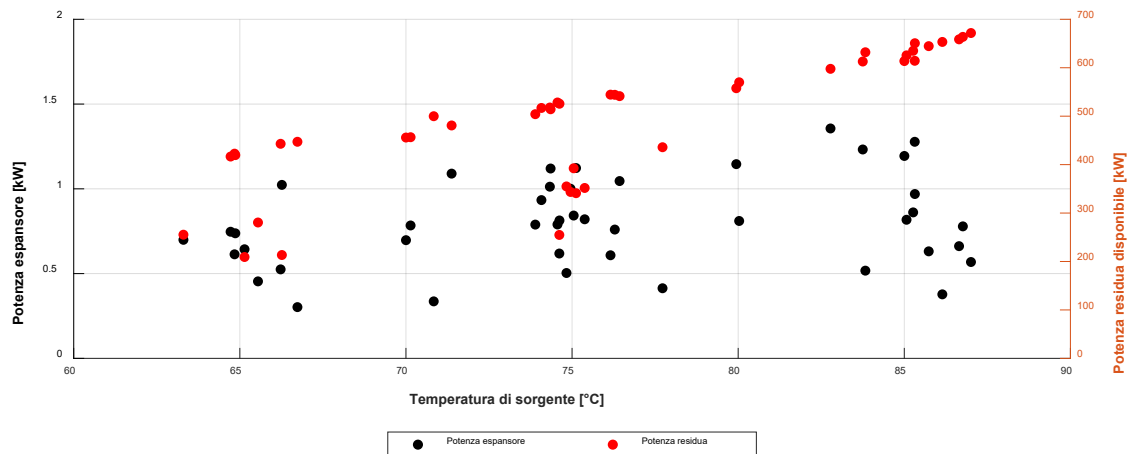


Figura 60 – Potenza elettrica prodotta dall’espansore dell’ORC e potenza termica residua disponibile a valle dell’evaporatore (supponendo una temperatura ambiente pari a $T = 25\text{ °C}$), in funzione della temperatura di sorgente.

5 Conclusioni

Il presente documento è il risultato della collaborazione tra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, avente l'obiettivo di condurre l'analisi di *Sistemi di microcogenerazione per lo sfruttamento di biogas finalizzati alla produzione di acqua calda sanitaria nelle piccole isole*. Tale collaborazione nasce all'interno dell'Accordo di Programma che il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato nel 2019 finalizzato all'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2019-2021 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

L'accordo di collaborazione tra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna si riferisce al Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021. Il presente documento descrive la ricerca svolta durante la seconda annualità.

L'attività è finalizzata allo studio della possibilità di impiegare biogas prodotto da digestori anaerobici di piccola taglia per la produzione di energia elettrica e acqua calda sanitaria nelle piccole isole non raggiunte dalla rete gas. Il sistema proposto è pertanto basato sulla tecnologia della digestione anaerobica, integrata con un micro-cogeneratore. Inoltre, il sistema in oggetto ha la finalità di ridurre i consumi di energia elettrica (importata dal continente mediante le connessioni sottomarine esistenti) attualmente finalizzati al soddisfacimento dei fabbisogni termici per produzione di acqua calda sanitaria.

La linea di attività del secondo anno è dedicata alla progettazione ed all'installazione dei banchi prova per test sperimentali su digestore anaerobico, motore a combustione interna e sistema ORC. Più in dettaglio, lo studio svolto è suddiviso in due fasi, così come di seguito illustrato.

FASE I – Progettazione del banco prova

In questa fase si è, innanzitutto, proceduto a definire due possibili alternative di sistema integrato digestore anaerobico + cogeneratore, per l'installazione presso utenze domestiche site in piccole isole (non raggiunte dalla rete gas e con connessione limitata alla rete elettrica nazionale) e volto a soddisfare i fabbisogni elettrico e termico per acqua calda sanitaria delle utenze stesse. Sulla base delle tecnologie scelte, sono stati quindi progettati i banchi prova per test sperimentali sui sistemi oggetto di analisi: in particolare sono stati progettati un banco prova per test su motori a combustione interna ed un banco prova per test su digestori anaerobici. Inoltre, un banco prova per test su sistemi ORC, già presente in Laboratorio, è stato scelto come secondo sistema cogenerativo da analizzare per l'applicazione oggetto di studio. Per ciascun banco prova, è stato elaborato un P&I che include tutti i principali sistemi, la componentistica idraulica, la strumentazione di misura ed il sistema di acquisizione delle misure. Per ciascun sistema, componente e sensore di misura sono state definite la tipologia e le specifiche richieste per l'applicazione oggetto del presente studio, consentendo la successiva selezione sul mercato del materiale da acquistare, di cui nel presente report sono presentate le schede tecniche.

FASE II – Installazione del banco prova

In tale fase si è proceduto all'installazione dei banchi prova presso laboratori dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna. In particolare, il banco prova per la caratterizzazione del motore a combustione interna e il banco prova ORC si trovano presso il Laboratorio di Meccanica, mentre il banco prova per la caratterizzazione del digestore anaerobico è stato installato presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroalimentari dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna. Inoltre, in questa fase sono state condotte alcune prime attività sperimentali per la caratterizzazione del motore a combustione interna, operante con diversi combustibili, e vengono presentate alcune prove svolte per la caratterizzazione del sistema ORC. Più in dettaglio, il motore è stato testato con benzina e GPL, in assetto cogenerativo e non, consentendo di determinare l'andamento delle principali grandezze di interesse al variare del carico elettrico (consumo specifico di combustibile, rendimento elettrico, temperatura dei fumi, massima potenza termica recuperabile) e di evidenziare alcune prime criticità legate alla regolazione del rapporto aria-combustibile, che saranno oggetto di analisi approfondita durante la fase sperimentale prevista nella successiva annualità. Per quanto riguarda il sistema ORC, invece, vengono presentati della caratterizzazione

ottenuti tramite prove di funzionamento off-design in regime stazionario, in diverse condizioni di temperatura e portata di acqua calda e fredda, velocità della pompa di alimento del fluido organico e carico elettrico connesso all'espansore.

6 Riferimenti Bibliografici

- [1] Ancona, M. A., Branchini, L., De Pascale, A., Melino, F. "Sistemi di microcogenerazione per lo sfruttamento di biogas finalizzati alla produzione di acqua calda sanitaria nelle piccole isole – (anno 1 di 3)". Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – I annualità, dicembre 2019.
- [2] Bianchi, M., Branchini, L., Casari, N., De Pascale, A., Melino, F., Ottaviano, S., Pinelli, M., Spina, P.R., Suman, A. (2019). Experimental analysis of a micro-ORC driven by piston expander for lowgrade heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 148, 1278-1291.
- [3] Gretech, available at: https://www.alibaba.com/product-detail/Gretech-power-own-patent-home-use_62218898448.html
- [4] Wiltec, available at: <https://www.wiltec.de/hrle-stainless-steel-heat-exchanger-10-plates-plate-heat-exchanger-max-22kw.html>.
- [5] dpPerformance, available at: <https://www.dppperformance.de/Ladeluftkuehler>.
- [6] Voegtlin, available at: <https://www.voegtlin.com/en/mass-flow-meters-and-controllers-for-gases/red-y-smart-series/#types>.
- [7] Jumo, available at: <http://www.jumo.it/prodotti/pressione/trasduttore-di-pessione/404327/jumo-trasduttore-di-pessione-per-piccoli-campi-di-misura-404327.html?parentId=2942>.
- [8] HomeBiogas, <https://www.homebiogas.com/Products/HomeBiogas2>.
- [9] Isoil, available at: <https://www.isoil.it/prodotto/isoflux-contabilizzatore-di-energia-ifx-serie-03/>.
- [10] Zampieri, G. "CLOSED-CYCLE PLANT." U.S. Patent No. 20,160,032,786. 4 Feb. 2016.
- [11] Declaye, S., Quoilin, S., Guillaume, L., Lemort, V. Experimental study on an open-drive scroll expander integrated into an ORC (Organic Rankine Cycle) system with R245fa as working fluid. *Energy*, 55 (2013) 173-183. DOI: 10.1016/j.energy.2013.04.003.

7 Abbreviazioni ed acronimi

H	entalpia [kJ/kg]
$\dot{m}$	portata in massa [kg/s]
p	pressione [bar]
Q	potenza termica [kW]
T	temperatura [°C]

Simboli greci

Δ	differenza [-]
----------	----------------

Acronimi

ACS	Acqua Calda Sanitaria
BP	by-pass
C	Compressore
M	Mixer
MCI	Motore a Combustione Interna
ORC	Organic Rankine Cycle
R	Recuperatore
RP	Riduttore di Pressione
SC	Scambiatore di Calore

Pedici e apici

acc	accumulo
C	cold
el	elettrico
ev	evaporatore
exp	espansore
H	hot
in	inlet
out	outlet
th	termico
ut	utenza

8 Indice delle figure

Figura 1 – Architettura del sistema integrato digestore anaerobico + motore a combustione interna, elaborato come ipotesi di installazione presso utenze domestiche site nel contesto delle piccole isole e volto al soddisfacimento dei fabbisogni energetici di tipo elettrico e termico per la produzione di acqua calda sanitaria delle utenze stesse.	8
Figura 2 – Architettura del sistema integrato digestore anaerobico + ORC, elaborato come ipotesi di installazione presso utenze domestiche site nel contesto delle piccole isole e volto al soddisfacimento dei fabbisogni energetici di tipo elettrico e termico per la produzione di acqua calda sanitaria delle utenze stesse.	9
Figura 3 – P&I del banco prova progettato per la caratterizzazione del motore a combustione interna cogenerativo.	11
Figura 4 – Disegno dello scambiatore a piastre acqua-fumi per il recupero termico e la produzione di acqua calda [4].	13
Figura 5 – Schematizzazione dei flussi termici all'interno dello scambiatore a piastre acqua-fumi per il recupero termico e la produzione di acqua calda [4].	13
Figura 6 – Immagine dello scambiatore di calore a fascio tubiero e mantello selezionato [5].	14
Figura 7 – Layout del circuito dell'acqua di raffreddamento per il recupero di calore dai fumi del MCI (che simula l'utenza termica).	15
Figura 8 – Schema elettrico equivalente dei collegamenti realizzati per una corretta acquisizione dei segnali.	16
Figura 9 – Schema di connessione tra il sensore di temperatura e la scheda Arduino.	16
Figura 10 – P&I del banco prova relativo al digestore anaerobico (laboratorio dall'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna).	17
Figura 11 – Immagini relative al digestore <i>plug&play</i> "HomeBiogas 2.0".	19
Figura 12 – Immagine di dettaglio delle principali parti che compongono il digestore <i>plug&play</i> "HomeBiogas 2.0".	20
Figura 13 – Vincoli sulle condizioni climatiche del sito di installazione del biodigestore [9].	21
Figura 14 – P&I del banco prova per la caratterizzazione del sistema ORC.	23
Figura 15 – Diagramma termodinamico del fluido operativo (HFC-134a) impiegato all'interno del sistema ORC sperimentale installato.	24
Figura 16 – Modello CAD 3D del sistema ORC.	25
Figura 17 – Disegno dell'espansore del sistema ORC progettato [10].	26
Figura 18 – Disegno dell'evaporatore a piastre saldobrasate riportante le principali dimensioni.	28
Figura 19 – Disegno del condensatore a fascio tubiero.	28
Figura 20 – Layout del circuito di acqua calda che alimenta l'evaporatore dell'ORC.	30
Figura 21 – Foto del MCI installato presso il Laboratorio di Meccanica dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.	32
Figura 22 – Foto dello scambiatore di calore a fascio tubiero e mantello installato presso il Laboratorio di Meccanica dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.	33
Figura 23 – Foto dello scambiatore a piastre installato presso il Laboratorio di Meccanica dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.	33
Figura 24 – Foto del serbatoio dell'acqua di raffreddamento installato in Laboratorio e di parte del circuito relativo.	34
Figura 25 – Foto di uno dei due misuratori di portata (identici) installati.	34
Figura 26 – Foto del sensore di pressione installato.	35
Figura 27 – Foto del sistema di acquisizione dai sensori di misura.	36
Figura 28 – Codice sviluppato per l'acquisizione dei segnali di misura.	36
Figura 29 – Screenshot del pannello di controllo del sistema di acquisizione dai sensori di misura.	37

Figura 30 – Screenshot del pannello di controllo del sistema di acquisizione dai sensori di misura con un esempio di applicazione.	37
Figura 31 – Andamento del consumo specifico di combustibile del motore al variare del carico elettrico (set di prove con benzina e GPL in assetto non cogenerativo).	38
Figura 32 – Andamento del rendimento elettrico del motore al variare del carico elettrico (set di prove con benzina e GPL in assetto non cogenerativo).	39
Figura 33 – Andamento della temperatura dei fumi allo scarico del motore al variare del carico elettrico (set di prove con benzina e GPL in assetto non cogenerativo).	39
Figura 34 – Andamento del consumo specifico di combustibile del motore al variare del carico elettrico (set di prove con GPL in assetto cogenerativo).	39
Figura 35 – Andamento del rendimento elettrico del motore al variare del carico elettrico (set di prove con GPL in assetto cogenerativo).	40
Figura 36 – Andamento della temperatura dei fumi in ingresso allo scambiatore acqua-fumi, al variare del carico elettrico (set di prove con GPL in assetto cogenerativo).	40
Figura 37 – Andamento della potenza termica massima disponibile per il recupero dai fumi del motore, al variare del carico elettrico (set di prove con GPL in assetto cogenerativo, potenza calcolata considerando una temperatura ambiente pari a 25 °C).	40
Figura 38 – Foto del digestore anaerobico installato in presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroalimentari dell’Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.	41
Figura 39 – Foto delle sezioni di ingresso della biomassa (a) e di uscita del biogas e del fertilizzante prodotti (b).	42
Figura 40 – Foto del sistema di filtraggio dell’H ₂ S installato.	42
Figura 41 – Foto del compressore per biogas.	43
Figura 42 – Foto del contacalorie per la contabilizzazione dello scambio termico acqua-fumi.	44
Figura 43 – Foto del banco prova ORC installato presso il Laboratorio di Tecnologie di Micro-generazione dell’Alma Mater Studiorum Università di Bologna.	45
Figura 44 – Foto dell’espansore del sistema ORC installato presso il Laboratorio di Tecnologie di Micro-generazione dell’Alma Mater Studiorum Università di Bologna [10].	46
Figura 45 – Foto della pompa di alimentazione del sistema ORC e modello CAD 3D: a) foto degli elementi della pompa disassemblati; b) vista frontale degli ingranaggi della pompa; c) modello CAD di un ingranaggio (vista laterale); d) modello CAD dell’ingranaggio.	47
Figura 46 – Fotografie del condensatore a fascio tubiero.	47
Figura 47 – Fotografia del ricevitore di liquido.	47
Figura 48 – Fotografia del puffer (riscaldatore elettrico).	48
Figura 49 – Fotografia del quadro elettrico e del carico.	48
Figura 50 – Fotografie dei sensori installati: a) circuito con sensori di tensione e corrente; b) raccordo a T con termocoppia e trasduttore di pressione; c) misuratore di portata di tipo Coriolis.	49
Figura 51 – Condizioni operative analizzate sperimentalmente.	50
Figura 52 – Pressione di evaporazione in funzione della portata in massa di fluido organico, al variare del carico elettrico all’espansore.	50
Figura 53 – Pressione di condensazione in funzione della portata in massa di fluido organico, al variare della temperatura dell’acqua al condensatore.	51
Figura 54 – Potenza elettrica espansore in funzione della differenza di pressione, al variare della temperatura di sorgente.	52
Figura 55 – Potenza elettrica espansore in funzione del grado di surriscaldamento, al variare della temperatura di sorgente.	52
Figura 56 – Potenza termica evaporatore in funzione della portata in massa di fluido organico.	53
Figura 57 – Temperature in uscita dall’evaporatore in funzione della portata in massa di fluido organico al variare della temperatura di sorgente.	53
Figura 58 – Differenza di temperatura acqua calda all’evaporatore in funzione della portata in massa di fluido organico al variare della portata dell’acqua calda.	54

Figura 59 – Potenza elettrica prodotta dall’espansore dell’ORC e potenza termica residua disponibile a valle dell’evaporatore (supponendo una temperatura ambiente pari a $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$), in funzione della potenza in ingresso all’evaporatore.....	54
Figura 60 – Potenza elettrica prodotta dall’espansore dell’ORC e potenza termica residua disponibile a valle dell’evaporatore (supponendo una temperatura ambiente pari a $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$), in funzione della temperatura di sorgente.....	55

9 Indice delle tabelle

Tabella 1 – Scheda tecnica del MCI scelto per l’installazione all’interno del Laboratorio di Meccanica dell’Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.....	12
Tabella 2 – Scheda tecnica dello scambiatore di calore a piastre per il recupero termico dai fumi del MCI scelto per l’installazione all’interno del Laboratorio di Meccanica dell’Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.....	12
Tabella 3 – Scheda tecnica dello scambiatore di calore a fascio tubiero e mantello per il recupero termico dai fumi del MCI scelto per l’installazione all’interno del Laboratorio di Meccanica dell’Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.....	14
Tabella 4 – Caratteristiche sensori di misura previsti per il banco prova sperimentale – MCI.....	15
Tabella 5 – Scheda tecnica del digestore “HomeBiogas 2.0” [8].	20
Tabella 6 – Specifiche tecniche del compressore di biogas.	22
Tabella 7 – Caratteristiche sensori di misura previsti per il banco prova sperimentale – digestore anaerobico.....	22
Tabella 8 – Principali proprietà del fluido operativo HFC-134a.	23
Tabella 9 – Principali specifiche dell’espansore ORC.....	26
Tabella 10 – Principali specifiche della pompa di alimentazione.....	26
Tabella 11 – Principali specifiche degli scambiatori di calore.....	28
Tabella 12 – Principali specifiche del generatore elettrico.....	29
Tabella 13 – Principali caratteristiche di sensori ed attuatori installati nel banco prova.....	31

10 Curriculum del gruppo di lavoro

Il gruppo di lavoro del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna che ha partecipato alla presente ricerca è composto da: Prof. Francesco Melino (responsabile scientifico dell'attività), dal Prof. Andrea De Pascale (membro del gruppo di lavoro), dall'Ing. Lisa Branchini (membro del gruppo di lavoro), dall'Ing. Maria Alessandra Ancona (membro del gruppo di lavoro), dall'Ing. Saverio Ottaviano (membro del gruppo di lavoro) e dall'Ing. Federico Ferrari (membro del gruppo di lavoro).

In breve:

Francesco Melino, Professore Associato di Macchine a Fluido (ING/IND08) responsabile del Laboratorio di Microreti di Generazione ed Accumulo dell'Università di Bologna, Vicedirettore del Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale su Fonti Rinnovabili, Ambiente, Mare ed Energia (CIRI-FRAME) dell'Università di Bologna e Chair dell'Industrial & Cogeneration Committee dell'American Society of Mechanical Engineering (ASME). Autore di oltre cento pubblicazioni scientifiche prevalentemente su riviste e congressi internazionali, svolge attività di ricerca sui temi delle reti complesse di trasporto dell'energia elettrica, termica frigorifera e del combustibile.

Andrea De Pascale, Professore Associato di Macchine a Fluido (ING/IND08), responsabile del Laboratorio di Tecnologie di Micro-Generazione del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Bologna. Vice Direttore del Corso di Dottorato In Meccanica e Scienze Avanzate dell'Ingegneria. Autore di oltre 100 pubblicazioni scientifiche, prevalentemente su riviste e congressi internazionali, svolge attività di ricerca sui temi del recupero energetico di cascami termici a bassa entalpia.

Lisa Branchini, Ricercatrice Senior di Sistemi per l'Energia e l'Ambiente (ING/IND09), svolge attività di ricerca – sia analitica che sperimentale – nel settore dei sistemi micro-cogenerativi innovativi oltre che nel campo dell'integrazione tra generatori rinnovabili e dispositivi di accumulo dell'energia elettrica e termica. Autrice di oltre 50 pubblicazioni scientifiche, prevalentemente su riviste e congressi internazionali.

Maria Alessandra Ancona, Ricercatrice Junior di Sistemi per l'Energia e l'Ambiente (ING/IND09), svolge attività di ricerca nel campo delle smart grid con particolare riferimento ai metodi e alle strategie di integrazione tra sistemi di accumulo dell'energia e generatori elettrici e termici rinnovabili non programmabili. Autrice di oltre 30 pubblicazioni scientifiche, prevalentemente su riviste e congressi internazionali.

Saverio Ottaviano, Assegnista di Ricerca, svolge attività di ricerca sperimentale su sistemi di micro-generazione basati sul recupero di cascami termici a bassa entalpia. Autore di diverse pubblicazioni scientifiche prevalentemente su riviste e congressi internazionali.

Federico Ferrari, Assegnista di Ricerca, svolge attività di ricerca – sia sperimentale che analitica – nell'ambito delle micro-reti energetiche, in particolare su sistemi per la produzione, l'accumulo e la riconversione dell'idrogeno.