UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Ministero dell' Istruzione, dell'Università e della Ricerca

PON RICERCA E INNOVAZIONE 2014 - 2020

Avviso 1735 del 13.07.2017 MIUR

Progetti di Ricerca Industriale e Sviluppo Sperimentale nelle 12 Aree di Specializzazione individuate dal PNR 2015-2020

Analisi di sistemi cogenerativi di piccola taglia per la valorizzazione energetica del biodiesel

---

Rapporto Tecnico di Ricerca Industriale D4.3

CoMESto
Community Energy Storage
Gestione Aggregata di Sistemi d'Accumulo dell'Energia in Power Cloud

Avviso	Avviso 1735 del 13.07.2017 MIUR
Codice progetto	ARS01_01259
Nome del progetto	Community Energy Storage Gestione Aggregata di Sistemi di Accumulo dell'Energia in Power Cloud
Acronimo	ComESto
Documento	D4.3
Tipologia	Rapporto Tecnico
Obiettivo Realizzativo	OR4
Attività Realizzativa	A4.3
Soggetti Beneficiari Proponenti	UNICAL
Elaborato (Nome, Cognome – Soggetto Beneficiario)	Anna Pinnarelli, Angelo Algieri, Pietropaolo Morrone, Giuseppe Barone, Vincenza Calabrò – UNICAL
Verificato (Nome, Cognome – Soggetto Beneficiario)	Anna Pinnarelli, Angelo Algieri, Vincenza Calabrò – UNICAL
Approvato (Nome, Cognome – Soggetto Beneficiario)	Membri del PEB

La riproduzione, anche parziale, di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta del Project Executive Board di progetto.

INDICE

Executive Summary 8
1. Soluzione di sistemi cogenerativi alimentati da biodiesel 9
1.1 Stato dell'arte 9
1.2 Stima sull'accumulo di energia sotto forma di Biodiesel e preliminare indagine di mercato 14
1.3 Previsione preliminare dei consumi energetici delle singole unità di un prototipo 24
2. Studio di una soluzione ottimale di un MCI integrato in una nanogrid 30
2.1 Individuazione della tipologia di motore 30
2.2 Allestimento del banco prova 32
2.3 Testing 33
3. Modello matematico dell'unità CHP 37
3.1 Definizione del modello matematico 37
3.2 Implementazione del modello matematico 38
3.3 Risultati numerici e validazione sperimentale 44
4. Primi test sperimentali dell'unità CHP gruppo elettrogeno MOSA GE15 YSXC integrato con la NANOGRID 51
4.1 Integrazione del Gruppo Elettrogeno con la Nanogrid 51
4.2 Test condotti per la validazione dell'integrazione del Gruppo Elettrogeno con la Nanogrid 54
4.2.1 Test 1: avvio nanogrid 56
4.2.2 Test 2: disconnessione rete 58
4.2.3 Test 3: disconnessione gruppo elettrogeno 60
4.2.4 Test 4: Set-point 62
5. Conclusioni 65
Bibliografia 65

Indice delle figure

Figura 1 Schema della produzione di Biodiesel da oli esausti 17
Figura 2 Schema del processo di produzione del biodiesel nella Smart Grid 17
Figura 3 Schema complessivo dell'impianto prototipale 1 con unità di reazione e separazione separate 27
Figura 4 Schema dell'impianto prototipale 1 con evidenziati i punti di utilizzo energia 28
Figura 5 Legenda per lo schema dell'impianto prototipale 1 28
Figura 6 Schema dell'impianto prototipale 2, alternativo con unità di reazione e separazione accorpati, con evidenziati i punti di utilizzo energia.....29
Figura 7 Legenda per lo schema dell'impianto prototipale 2 29
Figura 8 Schema del sistema di controllo parametri e metodiche analitiche.....30
Figura 9 Gruppo elettrogeno MOSA GE15 YSXC 31
Figura 10 Strumenti di misura installati sul motore: (a) Termoresistenza ingresso motore; (b) Termoresistenza uscita motore; (c) Termocoppia collettore di scarico; (d) Termocoppia condotto di scarico 33
Figura 11 Rendimento elettrico del motore alimentato con biodiesel (B100), gasolio (B0) e miscele biodiesel/gasolio in funzione del carico elettrico 35
Figura 12 Consumo specifico di combustibile del motore alimentato con biodiesel (B100), gasolio (B0) e miscele biodiesel/gasolio in funzione del carico elettrico 35
Figura 13 Rendimento termico ottenibile dai gas di scarico del motore alimentato con biodiesel (B100) in funzione del carico elettrico 36
Figura 14 Rendimento termico ottenibile dal circuito di raffreddamento del motore alimentato con biodiesel (B100) in funzione del carico elettrico 37
Figura 15 Layout del sistema micro-CHP 38
Figura 16 Modellazione del motore a combustione interna 39
Figura 17 Diagramma di flusso energetico per il sistema micro-CHP 42
Figura 18 Confronto numerico-sperimentale del rendimento globale e del consumo specifico di combustibile.45
Figura 19 Confronto numerico-sperimentale della curva di rilascio del calore (a) e della curva di pressione all'interno del cilindro (b).....46
Figura 20 Confronto numerico-sperimentale in termini di emissioni di ossidi di azoto. 47
Figura 21 Bilancio energetico per il sistema micro-CHP alimentato a biodiesel 47
Figura 22 Prestazioni cogenerative in termini di parametri normalizzati: efficienza elettrica (a) e consumo specifico di combustibile (b). Confronto con i risultati sperimentali estratti dalla letteratura [12, 21] 49
Figura 23 Confronto numerico-sperimentale del rendimento elettrico in funzione del carico elettrico 50
Figura 24 Confronto numerico-sperimentale della temperatura dei gas di scarico del motore in funzione del carico elettrico 50
Figura 25 Confronto numerico-sperimentale della potenza termica ottenibile dal circuito di raffreddamento del motore in funzione del carico elettrico 50
Figura 26 Schema semplificato di un sistema cogenerativo multi-sorgente.....51
Figura 27 Schema semplificato di un sistema integrato alimentato con biodiesel 51
Figura 28 Schema di principio di interconnessione tra gruppo elettrogeno e nanogrid 52
Figura 29 Set-up sperimentale per test funzionamento gruppo elettrogeno e nanogrid: con rete elettrica, accumulo al Pb, gruppo elettrogeno e carichi critici 53
Figura 30 Configurazione di nanogrid con gruppo elettrogeno, sono presenti: la rete elettrica, un accumulo al Litio, il gruppo elettrogeno, i carichi critici e un impianto fotovoltaico 54
Figura 31 "Test 1 Avvio": configurazione di test della nanogrid con gruppo elettrogeno, sono presenti: la rete elettrica, un accumulo al Pb, il gruppo elettrogeno e i carichi critici 57
Figura 32 "Test 1 Avvio": Nanogrid avviata con sistema di accumulo, rete e gruppo elettrogeno attivo, un carico è alimentato dall'inverter dedicato ai carichi critici 57
Figura 33 "Test 1 Avvio": tensione del DC bus (blu), tensione di rete (rosso), tensione carichi critici (viola)...58
Figura 34 "Test 2 disconnessione rete": test di disconnessione rete con gruppo elettrogeno, carichi critici e sistema di accumulo collegato.....59
Figura 35 "Test 2 disconnessione rete": disconnessione rete, intervento del gruppo elettrogeno per alimentare i carichi critici 59

Figura 36 “Test 2 disconnessione rete”: tensione del DC bus (blu), tensione sul condensatore del raddrizzatore gruppo elettrogeno (verde), tensione di rete (rosso) e tensione sui carichi critici (viola) 60
Figura 37 “Test 3 disconnessione gruppo elettrogeno”: test di disconnessione gruppo elettrogeno nella condizione di carichi critici alimentati e sistema di accumulo collegato 61
Figura 38 “Test 3 disconnessione gruppo elettrogeno”: distacco gruppo elettrogeno con rete scollegata e intervento del sistema di accumulo 61
Figura 39 “Test 3 disconnessione gruppo elettrogeno”: tensione del DC bus (blu), tensione sul condensatore del raddrizzatore gruppo elettrogeno (verde) e tensione sui carichi critici (viola).....62
Figura 40 “Test 4 Set-point”: Invio set-point alla nanogrid, con rete e gruppo elettrogeno connessi.....63
Figura 41 “Test 4 Set-point”: tensione del DC bus (blu), tensione sul condensatore del raddrizzatore gruppo elettrogeno (verde), tensione sui carichi critici (viola) e tensione di rete (rosso).....64

Indice delle tabelle

Tabella 1 Caratterizzazione del biodiesel secondo la norma UNI EN ISO 14214 15
Tabella 2 Confronto tra le principali proprietà del biodiesel e del diesel tradizionale 15
Tabella 3 Potere calorifico inferiore, PCI,del Biodiesel intervallo valori min-max 16
Tabella 4 Comuni materie prime usate per la produzione di biodiesel e resa dei rispettivi olii 16
Tabella 5 Produzione europea di Biodiesel nel periodo 2009-2016 20
Tabella 6 Dati generali sulla produzione europea di Biodiesel nel periodo 2009-2016 20
Tabella 7 Biodiesel totale, sostenibile e double counting immesso in consumo in Italia negli anni 2012-2017 e relativo contenuto energetico [1] 21
Tabella 8 Biodiesel sostenibile double counting immesso in consumo in Italia nell'anno 2017 per tipologia di materia prima. 21
Tabella 9 Biodiesel sostenibile double counting immesso in consumo in Italia nel 2017 e relativo contenuto energetico totale e specifico 22
Tabella 10 Potenza disponibile sul mercato del biodiesel partendo dai dati del Biodiesel sostenibile double counting immesso in consumo in Italia nell'anno 2017 per tipologia di materia prima 22
Tabella 11 Energia specifica e capacità energetica disponibile sul mercato del biodiesel partendo dai dati del Biodiesel sostenibile double counting immesso in consumo in Italia nell'anno 2017 23
Tabella 12 Ripartizione dei costi di produzione nelle singole voci, per unità di energia disponibile 23
Tabella 13 Dati di riferimento azienda produttrice di Biodiesel - valori riferiti alla produzione per il solo 2017 [5]. 24
Tabella 14 Fabbisogno in termini di Energia Elettrica per la produzione 24
Tabella 15 Fabbisogno in termini di Potenza Elettrica per la produzione 25
Tabella 16 Fabbisogno in termini di Energia Termica per la produzione 25
Tabella 17 Fabbisogno in termini di Potenza Termica per la produzione 25
Tabella 18 Specifiche gruppo elettrogeno 31
Tabella 19 Miscele di combustibile gasolio/biodiesel 34
Tabella 20 Caratteristiche motore diesel 44
Tabella 21 Proprietà biodiesel 44

Abbreviazioni ed acronimi

Abbreviazione/Acronimo	Testo Esteso
ASTM	American Society for Testing and Materials
AVR	Automatic Voltage regulator
BSFC	Brakes Specific fuel consumption
BTE	Brake thermal efficiency
CHP	Combined Heat and Power
CI	Compressione interna
EUF	Energetic Utilization Factor
FAEE	Fatty acid ethyl esters
FAME	Fatty acid methyl esters
FAS	Farm advisory system
GSE	Gestore dei Servizi Energetici
IPA	Idrocarburi policiclici aromatici
MCI	Motore a combustione interna
O&M	Operation and Maintainance
ORC	Organic Rankine Cycle
PCI	Potere calorifico inferiore
RME	Rapeseed methyl ester
WCO	Waste Cooking Oil

EXECUTIVE SUMMARY

Il presente documento, deliverable del progetto ComESto, sintetizza i risultati delle attività condotte nell'ambito dell'attività 4.3 ("Sistemi cogenerativi che utilizzano lo stoccaggio di biodiesel prodotto con l'apporto di energie da FER e loro integrazione nella nanogrid") dell'Obiettivo Realizzativo 4 (OR4).

L'attività A4.3 ha come obiettivo lo studio di sistemi energetici cogenerativi (CHP) di piccola taglia per la valorizzazione energetica del biodiesel prodotto dal processo di trans-esterificazione degli oli esausti. Allo stesso tempo, sarà preso in considerazione un motore a combustione interna (MCI) in assetto cogenerativo alimentato con biodiesel, in grado di integrarsi con la nanogrid. A tal fine sarà sviluppato un modello matematico per valutare le prestazioni dei differenti sistemi, definire le configurazioni più opportune e le relative condizioni operative, e analizzare l'integrazione con la nanogrid. In particolare, l'attività prevedeva:

• lo studio di sistemi energetici cogenerativi (CHP) di piccola taglia per la valorizzazione energetica del biodiesel prodotto dal processo di trans-esterificazione degli oli esausti;

• lo studio di un motore a combustione interna (MCI) in assetto cogenerativo alimentato con biodiesel, in grado di integrarsi con la nanogrid

• lo sviluppo di un modello matematico per valutare le prestazioni dei differenti sistemi e delle relative condizioni operative.

Pertanto, l'attività ha visto in una prima fase l'analisi di letteratura di sistemi energetici cogenerativi (CHP) di piccola taglia per la valorizzazione energetica del biodiesel prodotto dal processo di trans-esterificazione degli oli esausti, in grado di integrarsi con il sistema ibrido poligenerativo a servizio della nano-grid. Particolare attenzione è stata rivolta ai sistemi cogenerativi basati sui cicli Rankine a fluido organico (ORC) e sui motori a combustione interna (MCI) alimentati mediante biodiesel puro oppure in miscela con gasolio. Per poi procedere allo studio del sistema di produzione di biodiesel, per valutarne le potenzialità come sistema di accumulo e per inquadrarlo nell'ambito dell'accumulo non convenzionale di energia. Si è partiti quindi con una analisi delle caratteristiche del biodiesel, come biofuels, in previsione di un suo utilizzo in un motore a combustione interna in assetto cogenerativo. Analisi che ha visto anche un'indagine, per valutare gli aspetti energetici, facendo riferimento al solo quantitativo di Biodiesel sostenibile double counting. Le valutazioni energetiche sono state svolte facendo riferimento ai valori del PCI inferiore, ritrovandosi perfettamente con quanto mediamente stimato dal GSE per il biodiesel immesso in Italia. Si è passati al calcolo dei consumi energetici medi necessari per la produzione del biodiesel da biomasse residuali. Contemporaneamente si è proceduto

allo sviluppo di un modello matematico di un motore a combustione interna in assetto cogenerativo alimentato con biodiesel al fine di valutare le prestazioni di sistemi energetici cogenerativi (CHP) di piccola taglia per la valorizzazione energetica del biodiesel prodotto dal processo di transesterificazione degli oli esausti, e la validazione dello stesso con dati sperimentali tratti dalla letteratura e dati reali di sperimentazione con il prototipo di laboratorio.
Pertanto, è possibile individuare quattro punti su cui si è focalizzata l'attività:

1) Analisi della letteratura e stima dell'accumulo di energia sotto forma di Biodiesel;
2) Definizione della soluzione ottimale di un MCI integrato in una Nanogrid;
3) Sviluppo di un modello matematico dell'unità CHP;
4) Prototipo di laboratorio del sistema integrato CHP-nanogrid.

1. SOLUZIONE DI SISTEMI COGENERATIVI ALIMENTATI DA BIODIESEL

1.1 Stato dell'arte

Numerosi lavori in letteratura sono focalizzati sull'analisi sperimentale di motori a combustione interna alimentati con biodiesel. L'obiettivo di questi lavori riguarda prevalentemente l'analisi e il confronto delle prestazioni e delle emissioni dei motori a combustione interna alimentati con biodiesel e con gasolio convenzionale. Nel lavoro di McCarty et al. [1] i biocombustibili impiegati sono: biodiesel "A" (80% grasso di bovino – 20% estere metilico di olio di canola) e biodiesel "B" (70% grasso di pollo – 30% olio vegetale esausto). Entrambe le miscele di biodiesel sono state miscelate con gasolio standard ottenendo miscele biodiesel-gasolio. Gli autori hanno dimostrato che le prestazioni di un motore ad accensione per compressione (CI), diminuiscono all'aumentare della percentuale di biodiesel nella miscela totale a causa del contenuto energetico inferiore rispetto al gasolio tradizionale. In particolare, le prove sperimentali hanno registrato una riduzione di coppia del 5% e un aumento del 7% del consumo di combustibile rispetto all'alimentazione con gasolio standard. Da un punto di vista delle emissioni, gli stessi autori concludono che le emissioni di monossido di carbonio (CO) sono significativamente inferiori se si utilizza biodiesel come combustibile, mentre le emissioni di idrocarburi (HC) aumentano. Le emissioni di ossidi di azoto dipendono dal tipo di biodiesel che si utilizza. All'aumentare del contenuto di biodiesel A nella miscela totale si ottiene una riduzione degli ossidi di azoto. Per quanto riguarda le miscele pure di biodiesel, il biodiesel A (B100) ha fornito una riduzione del 14% degli ossidi di azoto rispetto al gasolio standard, mentre il biodiesel B (B100) un aumento del 17%.
Özener et al. [2], attraverso test sperimentali su un motore diesel monocilindro ad iniezione diretta in condizioni stazionarie, hanno rilevato una riduzione delle prestazioni se il motore viene alimentato con

biodiesel rispetto all'impiego di gasolio convenzionale. In accordo con [1] l'utilizzo di biodiesel produce una riduzione delle emissioni di CO e HC e un aumento di NO_x rispetto all'alimentazione con gasolio convenzionale. Inoltre, attraverso un'analisi della combustione, si nota che l'aggiunta di biodiesel al gasolio convenzionale riduce i tempi di iniezione. Questo risultato indica che il biodiesel può essere utilizzato come combustibile ecologico senza alcuna modifica al motore.

Ndayishimiye et al. [3] hanno effettuato test sperimentali su un motore monocilindro ad accensione per compressione, sia alimentato singolarmente con olio di palma (PO) preriscaldato, miscelato con gasolio (PO/gasolio) che con miscele di olio di palma, con oli esausti di cottura (WCO) che vengono convertiti in esteri mediante processi di trans-esterificazione. I principali risultati che gli autori mostrano sono: tutti i combustibili testati hanno un potere calorifico inferiore rispetto al gasolio. Un'elevata concentrazione di olio di palma nel gasolio diminuisce il potere calorifico della miscela. Il rendimento termico aumenta all'aumentare della concentrazione di olio di palma nella miscela. Rispetto all'impiego di gasolio, tutti i combustibili ad eccezione delle miscele olio di palma/gasolio, presentano delle emissioni di HC inferiori, mentre le emissioni di CO aumentano per tutti i tipi di combustibili. Quando il motore è alimentato con olio di palma, le emissioni di NO_x sono più elevate a basso carico, ma inferiori a pieno carico. L'uso dell'olio di palma permette di ottenere una riduzione delle emissioni di NO_x inferiore rispetto al motore alimentato con esteri sia a carico parziale che a pieno carico.

Ozturk [4] ha indagato le prestazioni, le emissioni, le caratteristiche di combustione e di iniezione di un motore diesel alimentato con gasolio e miscele con biodiesel derivante da olio di canola/olio di nocciola. Il biodiesel da olio di nocciola è stato miscelato con il biodiesel da olio di canola per migliorare alcune proprietà del biocombustibile e ridurre il costo del carburante. Gli esperimenti sono stati condotti su un motore diesel a iniezione diretta monocilindrico funzionante con miscele aventi un contenuto di biodiesel pari al 5% (B5) e al 10% (B10). I risultati sperimentali hanno mostrato che i ritardi di iniezione e accensione e le velocità massime di rilascio del calore diminuiscono con l'aggiunta di biodiesel, mentre aumentano le durate di iniezione e combustione. Inoltre, è stato osservato che il contenuto di ossigeno di B5 ha migliorato la combustione con conseguente aumento delle emissioni di NO_x e riduzione delle emissioni di THC, CO e fumo. Tuttavia, il combustibile B10 ha deteriorato la combustione a causa della maggiore densità, viscosità e tensione superficiale. Pertanto, le emissioni di THC, CO e fumo sono aumentate mentre le emissioni di NO_x sono diminuite. Le emissioni di CO_2 per entrambe le miscele sono risultate molto simili a quelle del diesel.

Lahane et al [5] hanno effettuato uno studio comparativo dell'effetto di diverse miscele biodiesel-diesel (B5, B10, B15, B20, B25, B50 e B100) su iniezione, spray, combustione, prestazioni e emissioni di un motore diesel a iniezione diretta a velocità costante (1500 rpm). La distanza di penetrazione del getto

aumenta con l'aumento della percentuale di biodiesel a causa della maggiore pressione del carburante. Il periodo di ritardo dell'accensione è diminuito in presenza di biodiesel in virtù del maggior numero di cetano, con conseguente minor aumento della pressione e funzionamento regolare del motore. La coppia del motore non cambia in modo significativo con miscele caratterizzate da percentuali di biodiesel fino al 20% (B20). Tuttavia, la riduzione della coppia con B100 è di circa il 2,7% a carico nominale. Le emissioni di monossido di carbonio (CO), idrocarburi (HC) e fumo si riducono in presenza del biodiesel mentre le emissioni di ossidi di azoto (NO_x) a carico nominale aumentano fino al 22,8% a causa dell'ossigenazione del combustibile, dell'aumento dei tempi di iniezione, della maggiore penetrazione del getto e della più elevata temperatura nel cilindro.

Diversi lavori sono stati effettuati su motori diesel stazionari alimentati con biodiesel per la sola produzione di energia elettrica con lo scopo di valutare il consumo specifico di combustibile, l'efficienza termica e le emissioni dei gas di scarico.

Rosa et al. [6] hanno utilizzato un generatore diesel di potenza elettrica nominale pari a 5 kW e una tensione di uscita monofase di 120/240 V alimentato con due diversi combustibili: biodiesel (cavolo marino - B100) e gasolio standard (B0). Al fine di investigare il funzionamento del motore a carico parziale, sono stati applicati diversi carichi resistitivi da 1,0 kW a 5,0 kW. Nonostante non ci siano sostanziali differenze statistiche, il biodiesel ha mostrato un più elevato consumo specifico medio di combustibile dell'1,2% e un'efficienza elettrica media maggiore dello 0,8%. Il biodiesel permette di ottenere una riduzione per CO, NO, NO_x, e SO_2 rispettivamente del 43,4%, 38,6%, 9,1%, 65,7%. Il lavoro di Pereira et al. [7] descrive un'indagine sperimentale relativa alla generazione di energia elettrica utilizzando miscele di gasolio e biodiesel, prodotto da un processo di trans-esterificazione dell'olio di soia mediante metanolo in presenza di un catalizzatore (KOH). I risultati mostrano che la generazione elettrica è assicurata per tutte le miscele testate. È stato anche osservato che le emissioni di CO, HC e SO_2 diminuiscono nel caso di miscele biodiesel da soia, mentre la temperatura allo scarico e le emissioni di NO_x sono uguali o poco inferiori rispetto al gasolio.

Zhang et al. [8] hanno investigato l'effetto dell'aggiunta di butanolo in miscele di gasolio/biodiesel sulle prestazioni del motore e sulle proprietà fisiche, chimiche e tossicologiche delle emissioni di particolato. Il motore lavora a numero di giri costante a basso-medio e alto carico. I risultati hanno indicato una variazione marginale del consumo specifico di combustibile (BSFC) fino al 10% e un miglioramento dell'efficienza termica (BTE) a medio e alto carico del motore con l'aggiunta di butanolo. Rispetto al biodiesel, la massa di particolato è stata ridotta in modo significativo. L'aggiunta di butanolo ha mostrato, inoltre, una minore emissione totale di idrocarburi policiclici aromatici (IPA), un minore

potenziale cancerogeno e anche una minore tossicità degli estratti di particelle, rispetto a quelli del biodiesel.

Serdari et al. [9] hanno misurato il consumo di combustibile e le emissioni di sostanze inquinanti in un motore diesel stazionario monocilindrico. Il motore è stato alimentato con miscele di combustibile contenenti quattro diversi tipi di biodiesel e con l'aggiunta di particolari additivi. Gli autori mostrano che, a parità di carico, all'aumentare della percentuale di biodiesel nella miscela le emissioni di NO_x aumentano mentre quelle di particolato diminuiscono. Ciò è dovuto all'aumento del contenuto di ossigeno presente nel biodiesel rispetto al gasolio convenzionale. All'aumentare del contenuto di biodiesel nella miscela il consumo di combustibile aumenta leggermente.

Nel lavoro di Saravan et al. [10] sono state analizzate le caratteristiche della combustione della miscela di biodiesel da olio di crusca di riso - CRBME (20% di CRBME con 80% di gasolio in volume) come combustibile in un piccolo motore ad accensione spontanea ad iniezione diretta. La pressione nel cilindro è simile sia se si utilizza il CRBME che il gasolio, mentre la velocità massima di aumento della pressione è inferiore. Inoltre, la miscela CRBME richiede un maggior intervallo temporale per rilasciare il 50% e il 90% del calore rispetto al gasolio. Il consumo specifico di combustibile della miscela CRBME risulta solo leggermente diverso da quello del gasolio, mentre il suo costo orario risulta superiore. La miscela di CRBME ha un'intensità di fumo inferiore e un livello di emissioni di NO_x più elevata di quelle del gasolio.

I quattro tipi di biodiesel sembrano avere le stesse prestazioni e, indipendentemente dalla materia prima utilizzata per la loro produzione, la loro aggiunta al gasolio tradizionale ha migliorato le emissioni di particolato. I risultati migliorano ulteriormente quando sono utilizzate combinazioni additive specifiche.

Da quanto emerso il biodiesel, puro o miscelato, può essere usato nei motori ad accensione spontanea senza nessuna modifica tecnologica al motore. Ciò può essere confermato dal lavoro di Imran et al. [11], i quali hanno sperimentalmente indagato e comparato le prestazioni e le emissioni specifiche di emissioni inquinanti in differenti condizioni operative di un motore (CI) alimentato con gasolio ed estere metilico di colza (RME). Le efficienze termiche del gasolio e dell'RME sono comparabili in tutti i punti di funzionamento. Ad elevati carichi l'RME ha una maggiore efficienza termica rispetto al gasolio. L'RME fornisce un livello di emissioni di NO_x inferiore al gasolio, mentre a basso e medio carico le emissioni di HC sono superiori. Ciò è causato da una cattiva atomizzazione e da una scarsa volatilità dell'RME rispetto al gasolio. Infine, l'RME ha prodotto una riduzione di CO_2 poiché presenta un rapporto carbonio/idrogeno inferiore rispetto al gasolio.

In letteratura è stata riscontrata una limitata presenza di lavori riguardanti l'utilizzo di biodiesel in

motori a combustione interna in assetto cogenerativo. Di seguito verranno citati i principali lavori presenti ad oggi.

L'effetto dell'aggiunta di biodiesel al gasolio tradizionale in un motore diesel in assetto cogenerativo è stato investigato da Oberweis et al. in termini di prestazioni ed emissioni di sostanze inquinanti [12]. I risultati mostrano che l'efficienza del sistema aumenta all'aumentare del contenuto di biodiesel nella miscela biodiesel/gasolio. In particolare, un aumento dell'efficienza dal 15% al 25% può essere ottenuto con l'aggiunta di uno scambiatore di calore in grado di recuperare parte della potenza termica contenuta nei gas di scarico. Le emissioni di NO_x aumentano al crescere della percentuale di biodiesel nella miscela.

Caligiuri et al. [13] hanno investigato l'effetto dell'aggiunta di bioetanolo in miscele gasolio-biodiesel in termini di prestazioni dell'intero sistema di conversione dell'energia e di emissioni di sostanze inquinanti. Il motore in oggetto è un monocilindro aspirato ad accensione per compressione raffreddato ad acqua, della potenza elettrica nominale di 3,5 kW. Il sistema cogenerativo è stato progettato per recuperare una potenza termica massima di 15 kW. Gli autori mostrano che l'aggiunta di una piccola quantità di bioetanolo (pari a circa il 3%) garantisce un incremento delle prestazioni (circa il 13%) rispetto alla pura miscela biodiesel/gasolio. Una riduzione di emissioni inquinanti di CO è ottenuta a carichi elevati, mentre quella di NO_x a basso carico.

Magno et al. [14] hanno condotto test sperimentali su un motore con tre cilindri, alimentato a gasolio e una miscela di biodiesel (B20) al fine di investigare la distribuzione energetica e le caratteristiche del calore di scarto per applicazioni micro-cogenerative. Gli autori hanno dimostrato che l'aggiunta del 20% di estere metilico di colza (RME) al gasolio non influisce in modo significativo sull'efficienza di conversione del combustibile e sui flussi energetici. D'altra parte, la miscela di biodiesel ha permesso di ridurre il rumore di combustione e le emissioni di sostanze inquinanti nella maggior parte delle condizioni operative. Inoltre, una corretta strategia sui tempi di iniezione per la miscela di biodiesel potrebbe ridurre ulteriormente le emissioni, soprattutto a regimi elevati. Per quanto riguarda le emissioni di sostanze inquinanti, l'aggiunta del 20% di RME riduce le emissioni di CO e HC, mentre una riduzione di NO_x è stata osservata solo in alcune condizioni operative.

Un sistema di micro-trigenerazione basato su un motore ad accensione per compressione (CI) è stato progettato, realizzato e studiato da Khatri et al. [15]. Su tale sistema sono state condotte indagini sperimentali per valutare e confrontare le prestazioni e le emissioni del sistema di pura generazione elettrica con il sistema in assetto trigenerativo. I risultati dei test hanno mostrato che l'efficienza termica totale della trigenerazione raggiunge l'86,2% a pieno carico, dove il 33,7% è imputabile alla sola generazione elettrica. Nella stessa condizione operativa le emissioni di CO_2 sono di 0,121 kg_{CO2}/kWh e

di 0,308 kg_{CO2}/kWh rispettivamente in assetto trigenerativo e in assetto con sola generazione elettrica.

1.2 Stima sull'accumulo di energia sotto forma di Biodiesel e preliminare indagine di mercato

Le attività hanno avuto inizio a novembre 2019, con lo studio del sistema di produzione di biodiesel, secondo quanto descritto nel report relativo all'attività a3.3, per valutarne le potenzialità come sistema di accumulo e per inquadrarlo nell'ambito dell'accumulo non convenzionale di energia.

Si è partiti quindi con una analisi delle caratteristiche del biodiesel, come biofuels, in previsione di un suo utilizzo motore a combustione interna (MCI) in assetto cogenerativo. Le caratteristiche del biodiesel devono soddisfare la normativa, quale che sia la fonte o la metodologia ed il processo produttivo. La ASTM (American Society for Testing and Materials) definisce il biodiesel come esteri mono-alchilici di acidi grassi a lunga catena (FAME, fatty acid methyl esters o FAEE, fatty acid ethyl esters) derivati da fonti lipidiche rinnovabili, come ad esempio oli vegetali o grassi animali.
L'appellativo "Bio" si riferisce alle fonti di origine biologica e rinnovabile, in contrasto al tradizionale diesel prodotto dal petrolio. L'appellativo "diesel" invece si riferisce al fatto che esso può essere utilizzato nei motori diesel. Come combustibile alternativo, il biodiesel può essere utilizzato allo stato "puro" o in miscela. La classificazione standard per indicare biodiesel puro o sue miscele con il gasolio prevede l'utilizzo delle lettere BD (soltanto la B per gli USA) seguite da un numero che indica la percentuale in volume di biodiesel aggiunto al diesel tradizionale; ad esempio, BD100 per biodiesel puro e BD20 per una miscela al 20% di biodiesel e all'80% di gasolio.
Il biodiesel è una fonte energetica rinnovabile (FER), pulita e biodegradabile, che può essere utilizzato come carburante nel settore dei trasporti e come combustibile per il riscaldamento, senza la necessità di dover apportare modifiche a motori o caldaie, in parziale o totale sostituzione del gasolio. Come biofuel garantisce la riduzione delle emissioni inquinanti, in quanto non contiene zolfo e composti aromatici, e contribuisce alla riduzione del particolato emesso, [1].
Industrialmente il processo più comune di produzione è via trans esterificazione alcalina, ottenuta facendo reagire le materie prime oleaginose con un alcol, metanolo per ottenere i FAME, o etanolo per ottenere i FAEE, al fine di ottenere esteri e glicerolo.
Il biodiesel viene prodotto industrialmente mediante trans esterificazione alcalina, ottenuta facendo reagire le materie prime oleaginose (oli e grassi) con un alcol a catena corta, solitamente metanolo, al fine di ottenere esteri e glicerolo. Lo stoccaggio di energia è insito nel potere calorifico del biodiesel, come biocombustibile liquido, stoccabile ed utilizzabile quando e dove necessario.
In Tab. 1 vengono riportati alcuni parametri del biodiesel, secondo la normativa ISO 14214, [2] mentre

in Tab. 2 viene riportato un confronto tra le proprietà del diesel e del biodiesel, [2]. Un ulteriore dato largamente utilizzato per le analisi energetiche del biodiesel è il potere calorifico inferiore, PCI, riportato come intervallo valore minimo – valore massimo (PCImin – PCI max) in Tab.3

Tabella 1 Caratterizzazione del biodiesel secondo la norma UNI EN ISO 14214

Proprietà	Unità di misura	Limite infeiore	Limite superiore	Test-method
Contenuto di esteri	% (m/m)	96.5	-	EN 14103
Densità a 15°C	kg/m^3	860	900	EN ISO 3675 EN12185
Viscosità a 40°C	mm^2/s	3.5	5	EN ISO 3104
Flash point	°C	120	-	EN ISO 3679
Zolfo (contenuto di solfuri)	mg/kg	-	10	EN ISO 20846/20884
Residuo carbonioso	% (m/m)	-	0.3	EN ISO 10370
Ceneri solforate	% (m/m)	-	0.02	ISO 3987
Contenuto di acqua	mg/kg	-	500	EN ISO 12937
Contaminazione totale	mg/kg	-	24	EN 12662
Corrosione su rame	grad corrosion	Classe 1		EN ISO 2160
Stabilità all'ossidazione, 110°C	hr	6	-	EN 14112
Acidità	mg KOH/g	-	0.5	EN 14104
Numero di Iodio	-	-	120	EN 14111
Metil estere dell'acido linoleico	% (m/m)	-	12	EN 14103
Metil esteri polinsaturi	% (m/m)	-	1	
Metanolo	% (m/m)	-	0.2	EN 14110
Monogliceridi	% (m/m)	-	0.8	EN 14105
Digliceridi	% (m/m)	-	0.2	EN 14105
Trigliceridi	% (m/m)	-	0.2	EN 14105
Glicerolo libero	% (m/m)	-	0.02	EN 14105/14106
Glicerolo totale	% (m/m)	-	0.25	EN 14105
Metalli gruppo I (Na,K)	mg/kg	-	5	EN 14108/14109
Metalli gruppo II (Ca,Mg)	mg/kg	-	5	EN 14538
Fosforo	mg/kg	10	10	EN 14107

Tabella 2 Confronto tra le principali proprietà del biodiesel e del diesel tradizionale

Proprietà	Biodiesel	Diesel
Densità [kg/m^3]	0.875	0.85
Viscosità cinematica [40°, mm^2/s]	3.5-5	2 - 4.5
Numero di cetano	47	40
Flash point [°C]	93 - 120	38 - 52
Ceneri [m/m]	0.002 - 0.036	0.006 - 0.010
Zolfo [m/m]	0.006 - 0.020	0.020 - 0.050
Azoto [m/m]	0.002 - 0.007	0.0001 - 0.003
Aromatici [n/n]	0	28-38

Numero di Iodio	65 - 156	0
Intervallo di distillazione [°C]	200 - 330	280-340
Potere calorifico superiore [MJ/kg]	39.2 - 40.6	45.1 - 45.6

Tabella 3 Potere calorifico inferiore, PCI,del Biodiesel intervallo valori min-max

	PCI min	**PCI Max**
MJ/kg	**37**	**42**
kJ/kg	**37000**	**42000**
kWh/kg	**10,36**	**11,76**

La produzione avviene in modo prevalente a partire dagli oli di colza, di soia e di girasole. A titolo esemplificativo, per ottenere una tonnellata di biodiesel è necessaria una superficie di 1,2 ha coltivata a girasole. La tabella 4 [3] mostra le più comuni materie prime utilizzate in vari paesi per produrre biodiesel e il loro rendimento per ettaro all'anno.

Tabella 4 Comuni materie prime usate per la produzione di biodiesel e resa dei rispettivi olii

Olio	**Resa [tonn/ha/yr]**
Palma (Malesia)	3.93
Colza (UE)	1.33
Soia (USA)	0.46
Girasole (Argentina)	0.66
Jatropa (India)	1.44
Cocco (Filippine)	0.66

Il processo produttivo è detto "trans-esterificazione", un processo nel quale un olio vegetale è fatto reagire in eccesso di alcool metilico, in presenza di un catalizzatore alcalino, ottenendo il biodiesel. Dal processo produttivo si ottiene anche un coprodotto dall'elevato valore aggiunto: la glicerina.

Lo schema di produzione, con i punti di ingresso di energia elettrica è riportato in Fig. 1

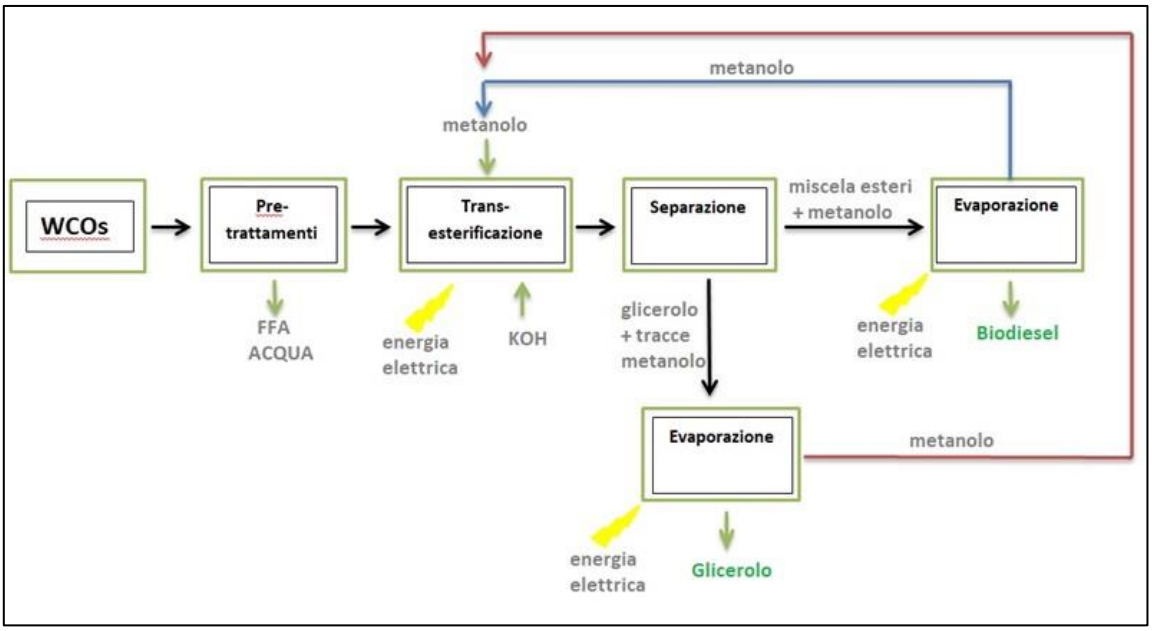


Figura 1 Schema della produzione di Biodiesel da oli esausti

In Fig. 2 è riportato lo schema della Smart Grid.

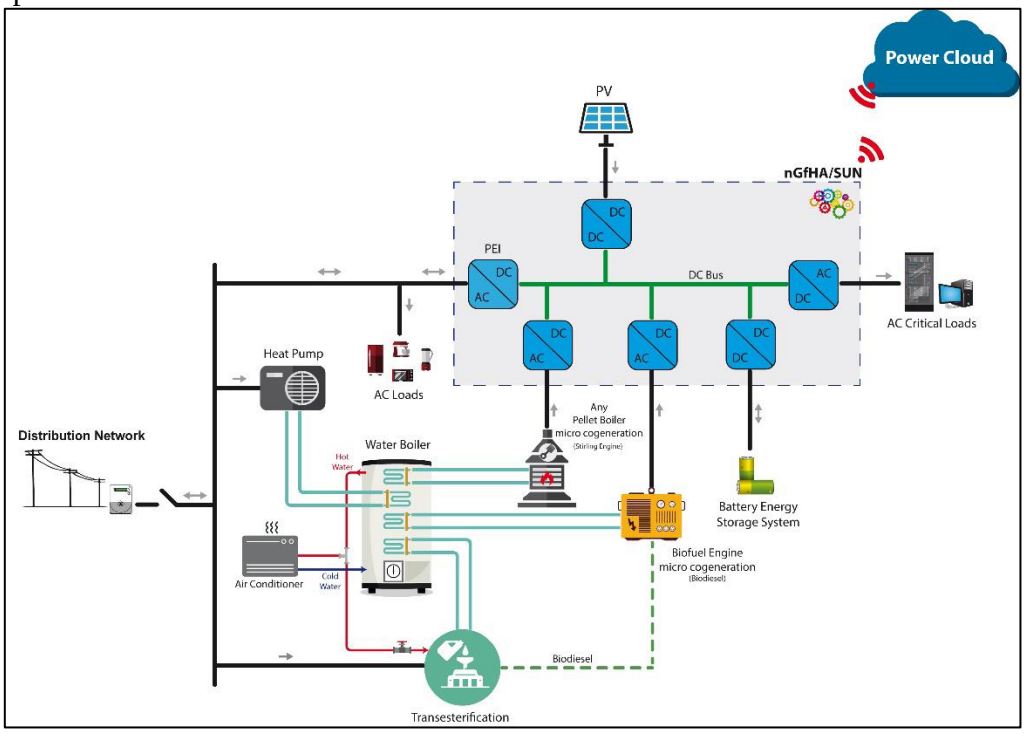


Figura 2 Schema del processo di produzione del biodiesel nella Smart Grid

La fonte di trigliceridi rappresenta l'elemento chiave del progetto, trattandosi di oli di scarto di origine alimentare, raccolti sia tra la popolazione, sia in esercizi dedicati alla ristorazione.

Per essere processato tale olio richiede una serie di pre-trattamenti così come a fine processo di trans-esterificazione, sono necessari dei post-trattamenti per separare e purificare il biodiesel dagli altri prodotti e sottoprodotti, come peraltro descritto nell'AR3.3

Di conseguenza, in questa specifica attività, è stato necessario analizzare gli elementi chiave per valutare le proprietà del biodiesel ottenibile da una materia prima non standard, sia le condizioni operative e, quindi, i consumi di energia termica ed elettrica necessari per la produzione del biodiesel stesso.

E' stata svolta una preliminare indagine di mercato finalizzata a capire l'evoluzione della produzione e dei consumi in ambito europeo ed in Italia. I risultati ottenuti sono sintetizzati nel successivo paragrafo ove vengono presentate e commentate le tabelle riepilogative (tab.5 e 6).

In Italia ci sono circa 20 produttori di biodiesel e la materia prima per la produzione dell'olio è per la quasi totalità importata. Analizzando la distribuzione regionale degli impianti, la Lombardia è la regione con il maggior numero di impianti.

I dati sugli impieghi di biocarburanti sono ricavati dagli archivi informativi GSE relativi alle certificazioni di immissione in consumo dei biocarburanti, in virtù degli obblighi introdotti dalla Legge 11 marzo 2006, n. 81, gestite dal MIPAAF fino all'anno d'obbligo 2011 e dal GSE stesso a partire dal 2012. Nel 2017 sono state immesse in consumo, complessivamente, circa 1,2 milioni di tonnellate di biocarburanti, in larghissima parte costituiti da biodiesel (96,8%); la quota restante si riferisce essenzialmente al bio-ETBE (3,2%).

Non tutti i biocarburanti immessi in consumo, tuttavia, possono essere contabilizzati e computati per il raggiungimento del target della Direttiva 2009/28/CE. Come precisato in tale Direttiva, infatti, ai fini del calcolo del target possono essere considerati i soli **biocarburanti sostenibili**, ovvero i biocarburanti che rispettano i criteri di sostenibilità di cui al provvedimento di attuazione della direttiva 2009/30/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009. Si tratta, in sostanza, di biocarburanti che garantiscono risparmi di emissioni di gas a effetto serra generate dall'intera catena di produzione, crescenti nel tempo, rispetto ai carburanti di origine fossile.

Al fine di favorire lo sviluppo dei biocarburanti prodotti a partire da rifiuti, residui, materie cellulosiche di origine non alimentare e materie ligno-cellulosiche, inoltre, la Direttiva 28 e la Direttiva ILUC consentono di contabilizzarne il relativo contributo energetico in misura pari al doppio di quello degli altri biocarburanti sostenibili. Per tale ragione, questi biocarburanti sono definiti **biocarburanti double counting**, [1].

Nel rapporto statistico del Gestore dei Servizi Energetici (GSE) "Energia nel settore Trasporti 2017" sono disponibili i dati sui consumi di biocarburanti aggiornati al 2017, elaborati sulla base delle autodichiarazioni fornite al GSE dagli operatori ai fini della certificazione degli obblighi di immissione in consumo, [1]. Nel successivo paragrafo vengono presentate e commentate le tabelle riepilogative (tab.7, e 8).

Nel 2017 sono stati consumati in Italia poco più di 1,2 milioni di tonnellate di biocarburanti, quasi esclusivamente sostenibili (99,9%). Poco meno del 97% di tali volumi è costituito da biodiesel. In termini di consumi fisici, nel 2017 si è rilevato un aumento del 2% circa rispetto all'anno precedente; se si guarda ai soli carburanti double counting l'incremento risulta significativamente maggiore (+12,8%).

E' stata svolta la seconda parte dell'indagine, per valutare gli aspetti energetici, facendo riferimento al solo quantitativo di Biodiesel sostenibile double counting. Le valutazioni energetiche sono state facendo riferimento ai valori del PCI inferiore, ritrovandosi perfettamente con quanto mediamente stimato dal GSE per il biodiesel immesso in Italia. I risultati sono riportati nel paragrafo successivo, tab. 9-11.

A seguire sono stati stimati i costi medi per la produzione, partendo dal dato che il costo di produzione /vendita all'ingrosso in Germania oscilla tra 0.86 € e 0.90€ per litro (escluse tasse) pari a 1,056 Euro/kg [6]. E' stato, quindi assunto un valore conservativo di 0.95 €/kg come ricavo per il produttore.

Dall'esame dei dati disponibili è stato stimato che il costo complessivo della produzione corrisponde al 72,38 dei ricavi. Il costo di produzione è stato ripartito considerando tra i più rilevanti i seguenti: i costi di gestione, manutenzione, approvvigionamento materie prime, personale, smaltimento rifiuti, oneri, racchiudendo tutto nella voce O&M costs. E' stato poi preso in considerazione il costo capitale (capital cost), stimato pari al 16,90% dei costi di produzione. Per svincolarsi dai quantitativi trattati, si è fatto riferimento ai costi specifici per unità di potenza disponibile, con riferimento alle precedenti citate tabelle 10-11

Nella Tabella 12 vengono sintetizzati i costi ripartiti per tipologia di materia prima. Si è passati al calcolo dei consumi energetici medi necessari per la produzione del biodiesel da biomasse residuali.

Sono stati analizzati i dati di diversi impianti industriali operanti in Italia, per la produzione di Biodiesel, e per quel che riguarda la stima dei consumi energetici per unità di prodotto, si è fatto riferimento a dati di produzione di aziende capaci di produrre oltre 5.000 t/anno di Biodiesel da oli esausti, [5]. Nella Tabella 13 – sono riassunti tutti i risultati.

In una prima fase è stata condotta una preliminare indagine bibliografica, finalizzata a definire le condizioni operative necessarie per realizzare il prototipo in scala di laboratorio ed a valutare gli aspetti energetici del processo produttivo, per stimare le potenzialità del biodiesel come tecnica di *energy storage* non convenzionale.

I principali risultati raggiunti sono relativi a:

- Formulazione di una **stima sull'accumulo di energia sotto forma di Biodiesel** nell'ambito dell'analisi di contesto e di una sintetica indagine di mercato, da condividere anche nell'ambito dell'OR1.

- **Previsione preliminare dei consumi energetici delle singole unità del prototipo**, sulla base dello schema del prototipo in scala di laboratorio formulato con riferimento all'attività A3.3 dell'OR3.
- Stima preliminare degli elementi di calcolo necessari per la valutazione degli aspetti energetici con riferimento all'utilizzo di **olio raccolto tal quale e di olio pre-trattato**. Tale attività utilizza ed utilizzerà i risultati ottenuti con le attività sperimentali in corso con riferimento alle attività 3.3, per la messa a punto di una metodica di pretrattamento degli oli esausti da introdurre nella fase di raccolta, e con la pianificazione delle attività necessarie per l'accettabilità sociale, con riferimento all'attività A1.2 e più in generale alle attività dell'OR 1

a1) Stima sull'accumulo di energia sotto forma di Biodiesel e preliminare indagine di mercato.

Nella Tabella 5 viene riportata una sintesi della produzione europea nel periodo 2009-2016, suddivisa per stato membro ed in Tabella 6 la distribuzione, nello stesso periodo 2009-2016, delle scorte iniziali, importazione, esportazione e consumo dell'intera area euro (fonte: FAS EU: European Union (EU) have a farm advisory system (FAS) [4]:

Tabella 5 Produzione europea di Biodiesel nel periodo 2009-2016

	Produzione di Biodiesel (milioni di litri)							
ANNI	***2009***	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***	***2014***	***2015***	***2016***
PAESE								
ITALIA	903	908	704	326	521	341	340	340
GERMANIA	2.598	3.181	3.408	2.954	3.067	3.408	3.180	3.180
BENELUX	840	912	1.084	1.881	2.102	2.102	2.100	2.100
FRANCIA	2.372	2.258	1.477	1.647	1.818	1.988	2.100	2.100
POLONIA	694	1.041	787	545	668	966	1.140	1.140
UK	398	227	261	364	648	648	650	650
FINLANDIA	290	375	253	320	399	409	410	410
PORTOGALLO	284	328	419	350	353	358	380	380
ALTRI PAESI UE	1.064	1.045	2.233	1.719	1.364	1.657	1.460	1.490
TOTALE	**9.857**	**10.707**	**11.041**	**10.778**	**11.676**	**12.661**	**12.560**	**12.590**

Tabella 6 Dati generali sulla produzione europea di Biodiesel nel periodo 2009-2016

	Biodiesel (milioni di litri)							
ANNI	***2009***	***2010***	***2011***	***2012***	***2013***	***2014***	***2015***	***2016***
Scorte Iniziali	1.102	807	528	562	820	523	525	525
Importazione	2.192	2.400	3.164	3.293	1.393	626	650	650
Esportazione	76	117	100	116	416	181	150	150
Consumo	12.269	13.268	14.070	13.698	12.950	13.104	13.060	13.090

La successiva Tabella 7 mostra le quantità fisiche ed il contenuto energetico del biodiesel immesso in

consumo in Italia negli anni 2012-2017, secondo le definizioni riportate nel rapporto statistico del Gestore dei Servizi Energetici (GSE) "Energia nel settore Trasporti 2017" [1].

Tabella 7 Biodiesel totale, sostenibile e double counting immesso in consumo in Italia negli anni 2012-2017 e relativo contenuto energetico [1]

ANNO	**Biodiesel totale**		di cui **Biodiesel sostenibile**		di cui **Biodiesel double counting**	
	Quantità t	Energia ktep	Quantità t	Energia ktep	Quantità t	Energia ktep
2012	1.429.137	1.263	1.428.428	1.262	382.011	338
2013	1.332.748	1.178	1.332.733	1.178	128.806	114
2014	1.193.955	1.055	1.193.866	1.055	209.720	185
2015	1.292.079	1.142	1.292.866	1.142	508.667	450
2016	1.141.334	1.099	1.138.982	1.007	874.661	773
2017	1.164.023	1.029	1.162.429	874	988.593	874

(1 tep = 11630 kWh = 41868 MJ= 41,868 kJ)

Come si può vedere, con riferimento al 2017, a fronte di un totale di 1.164.023 t di biodiesel immesso in consumo nel 2017, il 99,86 % (pari a 1.162.429 t) è *Biodiesel sostenibile*, ed il 32,82 (988.593) è *Biodiesel double coun*ting, che rappresenta, fra l'altro il 32,86% del Biodiesel sostenibile.

L'aspetto più rilevante è rappresentato dal continuo incremento dal 2013 di questa aliquota, segno di una maggiore attenzione verso l'utilizzo di oli residuali per la produzione di biodiesel sostenibile.

Nella Tabella 8 vengono riportati i dati relativi alla distribuzione del biodiesel sostenibile double counting immesso in consumo in Italia nel 2017 per materia prima; tale classificazione consente di distinguere tra Biodiesel double counting avanzato e non avanzato.

Tabella 8 Biodiesel sostenibile double counting immesso in consumo in Italia nell'anno 2017 per tipologia di materia prima.

Fonte BIODIESEL sostenibile double counting		**Quantità prodotta nel 2017 t**
Biodiesel Double Counting Avanzati	Biodiesel da altri rifiuti agro-industriali	7.638
Biodiesel Double Counting Non Avanzati	Biodiesel da oli alimentari esausti immessi in consumo in Italia (UCO)	88.983
	Biodiesel da oli e grassi animali immessi in consumo in Italia	307.388
	Biodiesel da lavorazione di oli vegetali esausti immessi in consumo in Italia	584.583
BIODIESEL sostenibile double counting		**988.593**

Il biodiesel double counting è prodotto principalmente da derivati della lavorazione di oli vegetali e da oli e grassi animali; rimane ancora piuttosto limitato, invece, il contributo del biodiesel avanzato.

I dati raccolti sono stati rielaborati per calcolare le caratteristiche energetiche ed economiche del processo. Per le successive analisi si è fatto riferimento, al solo biodiesel sostenibile double counting immesso in Italia nel 2017, pari a 988.593 tonnellate ed al relativo contenuto energetico di 874 ktep (equivalente a 10,82 MWh/t), stimato sulla base del PCI inferiore per come sintetizzato nella successiva Tabella 9.

Tabella 9 Biodiesel sostenibile double counting immesso in consumo in Italia nel 2017 e relativo contenuto energetico totale e specifico

Contenuto energetico			
Quantità totale prodotta	tep	MWh	MJ
988593 t	874.000	10.164.620	36.592.632.000
Contenuto energetico specifico			
per unità di prodotto (riferimento ad 1t)	tep/t	MWh/t	MJ/t
	0,884	10,282	37014,861

Dalla rielaborazione di tali dati è stato poi svolto il calcolo per determinare sia la potenza disponibile sul mercato (tabella 10) sia la capacità energetica (tabella11) del biodiesel sostenibile double counting, valutando i quantitativi specifici per una ipotesi operativa su piccola scala. Tutti i calcoli sono stati svolti assumendo una produzione distribuita nel corso dell'intero anno, 365 giorni h 24.

Tabella 10 Potenza disponibile sul mercato del biodiesel partendo dai dati del Biodiesel sostenibile double counting immesso in consumo in Italia nell'anno 2017 per tipologia di materia prima

Fonte BIODIESEL sostenibile double counting	**Immesso in consumo in Italia nell'anno 2017**		**Potenza disponibile sul mercato**
			min - max ***rif. PCI 37 – 42 MJ/kg o MW/(kg/s)***
	t per anno	**kg/s**	**MJ/s = MW**
Biodiesel da oli alimentari esausti immessi in consumo in Italia (UCO)	88.983	2,82	**104,40 – 118,51**
Biodiesel da oli e grassi animali immessi in consumo in Italia	307.388	9,75	**360,65 – 409,38**
Biodiesel da lavorazione di oli vegetali esausti immessi in consumo in Italia	584.583	18,54	**685,87 - 778.56**
Biodiesel da altri rifiuti agro-industriali	7638	0,24	**8,96 – 10,17**
TOTALE	**988.593**	**31,35**	**1.159,88 - 1.316,62**

Tabella 11 Energia specifica e capacità energetica disponibile sul mercato del biodiesel partendo dai dati del Biodiesel sostenibile double counting immesso in consumo in Italia nell'anno 2017

	Immesso in consumo in Italia nell'anno 2017		Energia specifica disponibile	Capacità energetica disponibile sul mercato
			min - max *rif. PCI 10,36 – 11,76 kWh/kg*	min - max *rif. PCI 10,36 – 11,76 kWh/kg*
	t per anno	kg/h	kWh/kg anno	kWh
Totale BIODIESEL sostenibile double counting	**988.593**	**112,86**	**10,28 – 11,67**	**10.160.539.167 – 11.533.585.000**

Dal confronto con la Tabella 9 si vede come i valori di energia specifica e di capacità energetica riportati nel citato rapporto del GSE [1], siano di fatto corrispondenti al valore minimo prevedibile. Partendo dai dati di energia specifica e potenza disponibile, e dai dati relativi ai costi medi, di vendita e di produzione, è stata formulata la tabella 12, con il dettaglio del costo specifico per unità di potenza disponibile, sia per i costi capitale sia per gli O&M.

Tabella 12 Ripartizione dei costi di produzione nelle singole voci, per unità di energia disponibile

	Unità	**Valori**
Costo BIODIESEL	*Euro/kg*	**0,95**
Energia specifica disponibile su base annua	*kWh/kg per anno*	*10,28 – 11,67*
Energia disponibile sul mercato (dati annui)	*MJ/kg*	*37-42*
Costi di vendita per unità di energia disponibile	*Euro/kWh*	**0,081 – 0,092**
Costi di impianto *capital cost* (pari al 16,9 % del costo di produzione e all'12,23% del ricavo) per unità di energia disponibile	*Euro/kWh*	**0,010 – 0,011**
Costi di produzione *O&M* (pari al 72% del costo di vendita) per unità di energia disponibile	*Euro/kWh*	**0,059-0,067**
Costi di materie prime (pari al 56,75 % del costo di produzione) per unità di energia disponibile tale costo è incluso negli O&M	*Euro/kWh*	**0,033-0,038**

Sono stati analizzati, infine, i dati di diversi impianti industriali operanti in Italia, per la produzione di

Biodiesel, e per quel che riguarda la stima dei consumi energetici per unità di prodotto, si è fatto riferimento a dati di produzione di Biodiesel da oli esausti in scala da circa 10 – 15 t/giorno [5].
In Tabella 13 sono riportati i valori utilizzati.

Tabella 13 Dati di riferimento azienda produttrice di Biodiesel - valori riferiti alla produzione per il solo 2017 [5].

PRODOTTI		
Produzione Biodiesel	6.414.320	kg/anno
Produzione Glicerolo	1.274.280	kg/anno
MATERIE PRIME (OLI E GRASSI)		
Grassi Animali	4.465.701	kg/anno
Oli grezzi ed oli esausti	3.466.821	kg/anno
Metanolo	1.410.629	kg/anno
Atre materie prime	380.991	kg/anno
CONSUMI ENERGETICI		
Consumo Energia Elettrica	2.863	MWh/anno
Consumo Metano	864.249	m3/anno

1.3 Previsione preliminare dei consumi energetici delle singole unità di un prototipo

E' stato calcolato dapprima il fabbisogno di energia elettrica specifico, dividendo il consumo di energia elettrica per il totale di biodiesel prodotto. I dati sono stati confrontati con l'energia e la potenza disponibile dello stesso quantitativo di biodiesel, tab.14.
Di conseguenza l'energia richiesta di 2.863 MWh/anno è stata divisa per 6.414,32 t/anno di biodiesel prodotto, ricavando un consumo di 0,446 MWh/t.
Noto che la densità del Biodiesel è pari a 900 kg/m3, è possibile calcolare il consumo specifico anche pari a 1,446 MJ/m3. In tabella 14 sono riassunti i valori così stimati.
Dal dato di consumo in termini di energia elettrica per anno, pari a 2863 MWh/anno, si calcola la corrispondente potenza pari a 0,795 MW/anno che viene divisa nuovamente per il quantitativo di Biodiesel prodotto in un anno, considerando sempre la produzione continua, ottenendo un fabbisogno in termini di potenza pari a 0,124 kW/t ovvero 0,112 kW/m3. In tabella 15 sono riassunti i valori così stimati.

Tabella 14 Fabbisogno in termini di Energia Elettrica per la produzione
di 6.414.320 kg/anno (6.414,32 t/anno) di Biodiesel.

	MWh/anno	MJ/anno	MWh/t	MJ/t	MWh/ m3	MJ/m3
Consumi in termini di Energia Elettrica	2.863,00	10.306,80	0,446	1,607	0,402	1,446

Tabella 15 Fabbisogno in termini di Potenza Elettrica per la produzione di 6.414.320 kg/anno (6.414,32 t/anno) di Biodiesel.

	MW / anno	MW/t	W/m3
Consumi in termini di Potenza Elettrica	0,795	1,24E-04	1,12E-04

E' stato calcolato infine il fabbisogno termico specifico, calcolando la quantità di energia termica fornita con la combustione del metano. Vengono forniti 864.249 m3 di metano per produrre 6.414,320 kg di biodiesel, con un rapporto pari a 0,13 m3 metano/kg biodiesel. Utilizzando il dato del potere calorifero del metano, 34535 kJ/m3 ovvero 34,54 MJ/m3, è stato calcolato l'apporto termico totale fornito da 864.249 m3 di metano, risultato pari a 29.846.839 MJ/anno, Tab.16.

Dividendo, infine, per la produzione annua di biodiesel, pari a 6.414.320kg/anno, è stato calcolato l'apporto termico specifico risultato pari a 4.653,16 MJ/t ovvero a 4.187,84 MJ/m3 (densità biodiesel 900kg/m3), Tabella 17.

Tabella 16 Fabbisogno in termini di Energia Termica per la produzione di 6.414.320 kg/anno (6.414,32 t/anno) di Biodiesel

	MWh/anno	MJ/anno	MWh/t	MJ/t	MWh/ m3	MJ/m3
Consumi in termini di Energia Termica	8.290.789	29.846.839	1.292,54	4.653,16	1.163,29	4.187,84

Tabella 17 Fabbisogno in termini di Potenza Termica per la produzione di 6.414.320 kg/anno (6.414,32 t/anno) di Biodiesel.

	MW / anno	MW/t	W/m3
Consumi in termini di Potenza Termica	2302,997	3,59E-01	3,23E-04

E' stato quindi effettuato un raffronto tra i fabbisogni energetici per la produzione del Biodiesel e i corrispondenti valori di energia e potenza disponibili, utilizzando i dati delle Tabelle precedenti.

I risultati sono sintetizzati in Tabella 18.

Tabella 18 Efficienza energetica intesa come rapporto tra energia o potenza consumata su disponibile.

Efficienza Energia Elettrica (consumo/disponibile)	Potenza elettrica disponibile min - max *rif. PCI 37 – 42 MJ/kg o MW/(kg/s)*	Energia elettrica specifica disponibile min - max *rif. PCI 10,36 – 11,76 kWh/kg*

	7,526 MW – 8,543 MW	10,28 kWh/kg - 11,67 kWh/kg
	Fabbisogno di potenza elettrica per la produzione	Fabbisogno di energia elettrica per la produzione
	0,795 MW	0,446 kWh/kg
	Potenza elettrica consumata/ potenza disponibile	**Energia consumata/energia disponibile**
	9,31% - 10,57%	**3,83% – 4,34%**
Efficienza Potenza Termica (consumo/disponibile)	Potenza termica disponibile per unità di portata, ovvero energia termica specifica disponibile *rif. PCI*	
	37 – 42 MJ/kg	
	Fabbisogno di potenza termica per la produzione per unità di portata, ovvero energia termica specifica consumata	
	4,65 MJ/kg	
	Potenza elettrica consumata/ potenza disponibile	
	11,08% – 12,58%	

La produzione di biodiesel richiede una quantità di energia inferiore a quella che il biodiesel riesce a fornire nella combustione, pertanto il bilancio energetico della filiera di produzione del combustibile, risulta positivo.

E' stato necessario produrre un quantitativo di circa 5 litri di biodiesel. Come materie prime sono stati utilizzati oli di scarto e metanolo, come catalizzatore idrossido di potassio. La produzione del biodiesel è stata condotta nel laboratorio di fenomeni di trasporto e biotecnologie.

Per la produzione è stata seguita la metodica descritta e messa a punto nel corso dell'Attività a.3.3. In particolare, è stato utilizzato olio di semi di girasole, utilizzato e stoccato per periodi fino ad un mese. L'olio è stato sottoposto a pre-trattamento mediante adsorbimento degli acidi grassi liberi, peraltro presenti in misura inferiore al 5%.

La reazione di trans-esterificazione è stata ripetuta su campioni da 500 ml ed 1 l fino a raggiungere il quantitativo necessario.

Volta per volta il biodiesel grezzo prodotto è stato sottoposto a post trattamento, per separarlo dalla fase glicerolo-metanolo e per purificarlo dal residuo di metanolo presente. Il glicerolo è stato purificato anch'esso mediante rimozione del metanolo, avvenuta mediante evaporazione, condotta utilizzando un

sistema di riscaldamento e agitazione alimentato con energia elettrica.

Il biodiesel così ottenuto è stato stoccato in un serbatoio e successivamente fornito al gruppo del DIMEG per l'avvio delle prove sul motore.

Del biodiesel prodotto sono stati conservati campioni per circa 500 ml, al fine di svolgervi prove di caratterizzazione delle proprietà e caratteristiche del biodiesel, seguendo delle tecnologie alternative alla determinazione per via cromatografica.

La sperimentazione condotta è stata preliminare per la messa a punto del prototipo e delle metodiche di caratterizzazione che si intende proporre, per un sistema che possa fungere anche da dimostratore.

b.1 Schema del prototipo

Per la realizzazione del prototipo, si è dapprima proceduto con la realizzazione degli schemi operativi, riportati nelle figure successive.

In particolare, in Figura 3 si riporta lo schema relativo all'impianto basato su due unità distinte di reazione e separazione, di cui in Figura 4 si dettagliano i punti di fornitura dell'energia elettrica.

In Figura 5 è fornita la legenda per la lettura dello schema

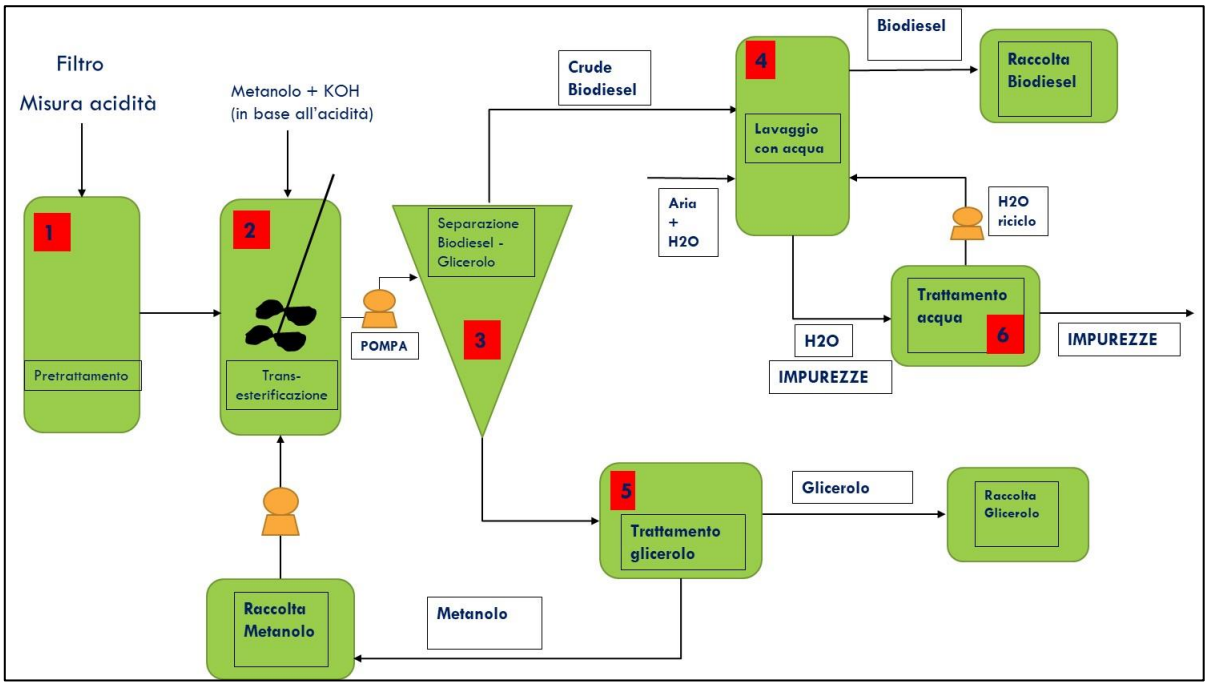


Figura 3 Schema complessivo dell'impianto prototipale 1 con unità di reazione e separazione separate

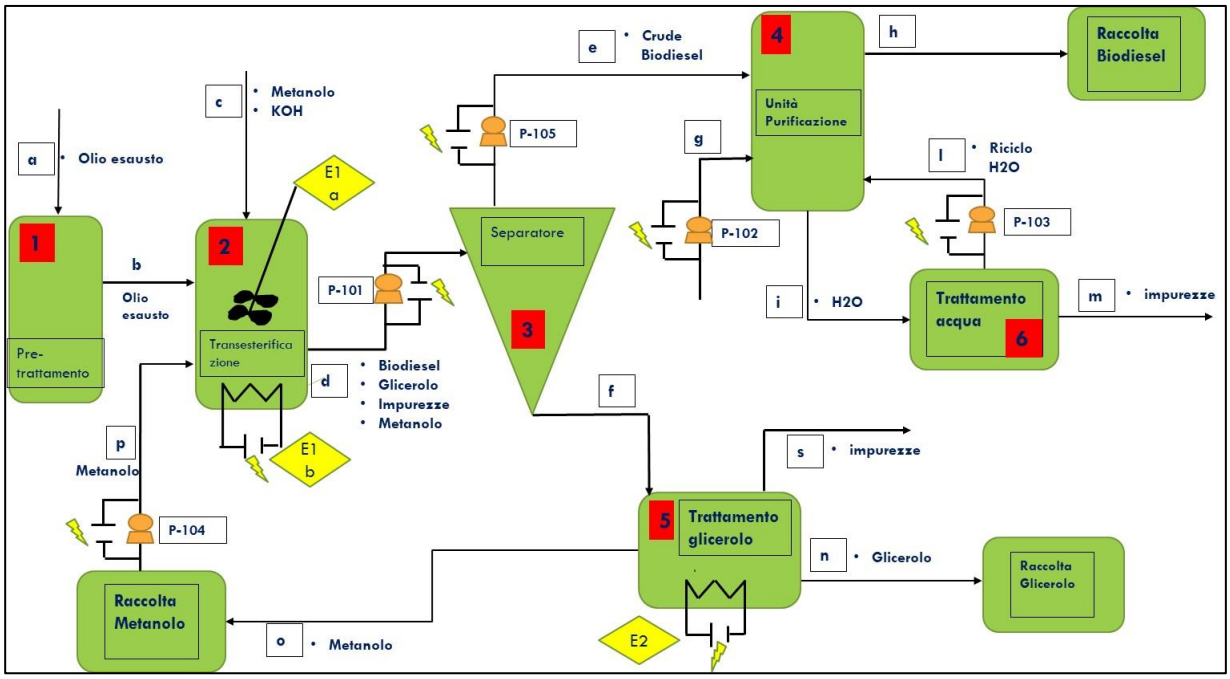


Figura 4 Schema dell'impianto prototipale 1 con evidenziati i punti di utilizzo energia

Figura 5 Legenda per lo schema dell'impianto prototipale 1

In Figura 6 si riporta invece lo schema, con dettaglio dei punti di fornitura energia elettrica, del sistema in cui le unità di reazione e separazione sono accoppiate in un unico reattore-separatore, di cui si sta valutando la fattibilità sia come realizzazione sia come utilizzo. La Figura 7 racchiude la legenda relativa a tale schema.

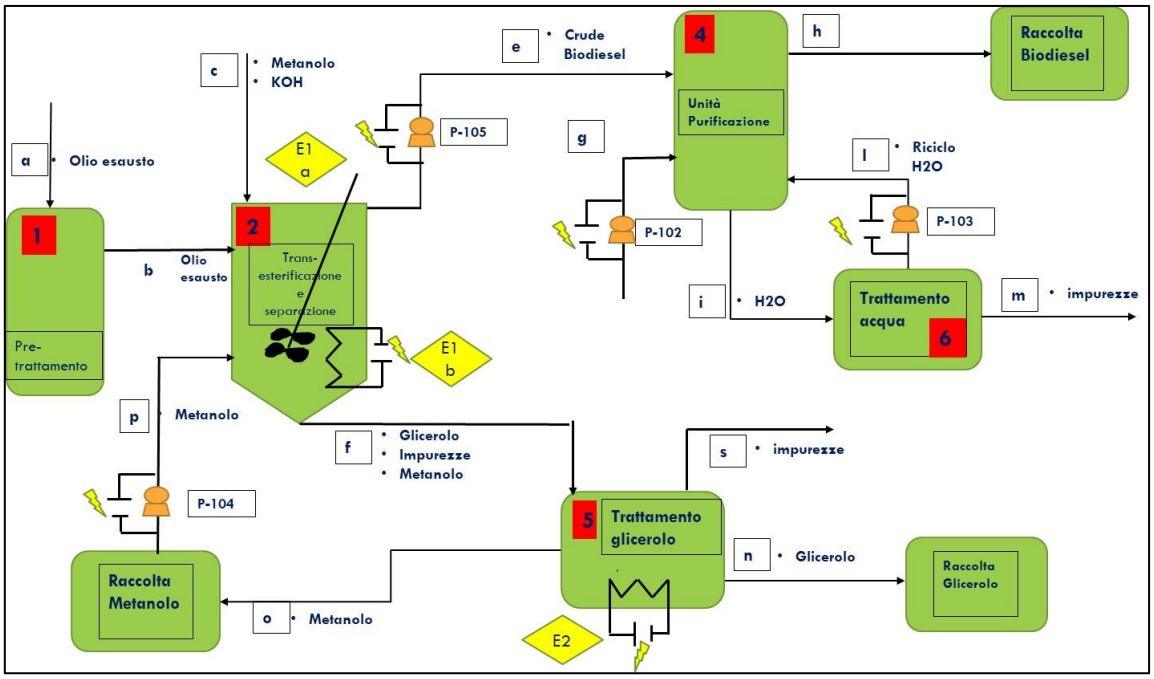


Figura 6 Schema dell'impianto prototipale 2, alternativo con unità di reazione e separazione accorpati, con evidenziati i punti di utilizzo energia

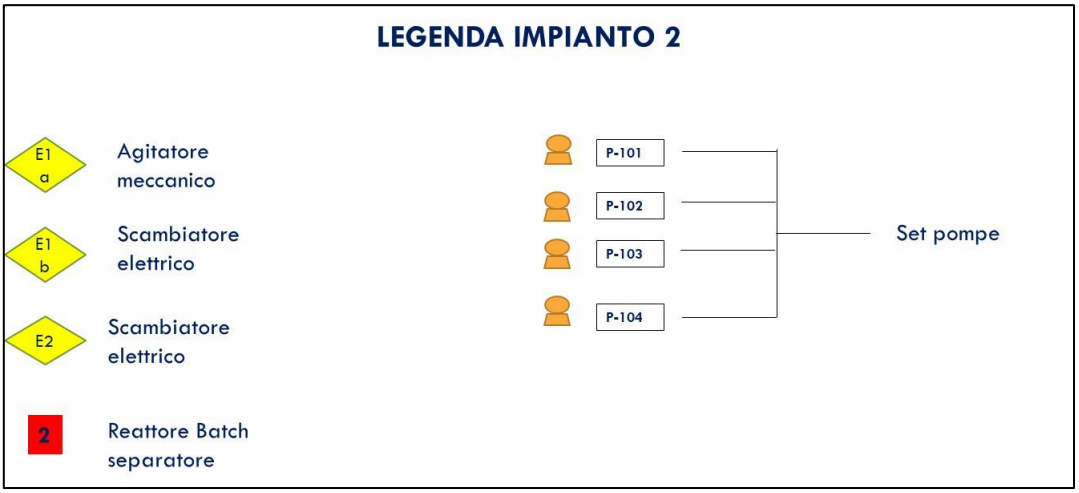


Figura 7 Legenda per lo schema dell'impianto prototipale 2

b2. Caratterizzazione ed analisi

Per la caratterizzazione e la determinazione delle proprietà del biodiesel nonché per seguire l'evolvere della reazione sono state previste delle analisi, il cui dettaglio è sintetizzato nella successiva Figura 8.

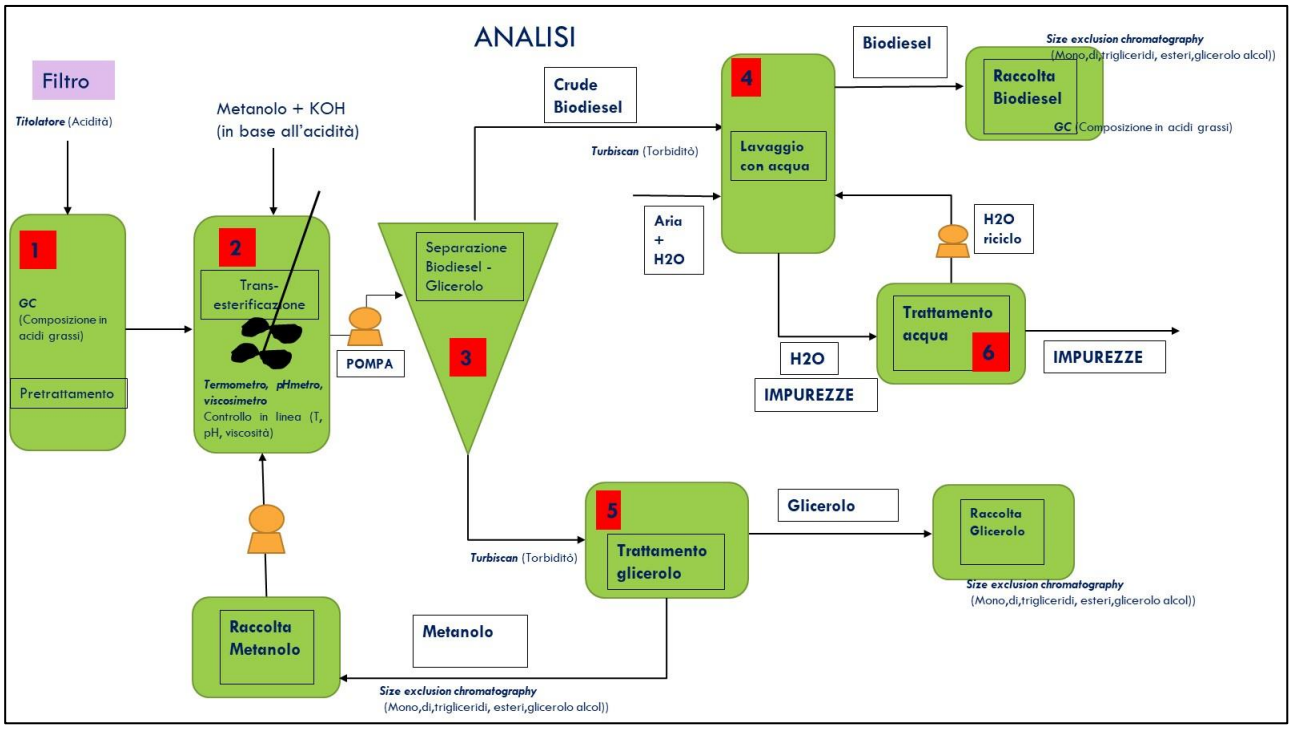


Figura 8 Schema del sistema di controllo parametri e metodiche analitiche

Sono allo studio metodi di caratterizzazione basati su proprietà come viscosità, consistenza, stabilità, indice di rifrazione, per fornire anche altri parametri di valutazione, di più immediata ed agevole determinazione, (*Biodiesel Tech Notes, anni 2017-2019*).

Per la determinazione dei consumi di energia elettrica l'impianto verrà dotato di misuratore di potenza e, successivamente, corredato del sistema di valutazione in rete con gli altri impianti.

2. STUDIO DI UNA SOLUZIONE OTTIMALE DI UN MCI INTEGRATO IN UNA NANOGRID

2.1 Individuazione della tipologia di motore

È stata condotta un'estesa indagine di mercato volta ad individuare le unità di piccola taglia in grado di consentire la valorizzazione energetica del biodiesel prodotto mediante il processo di trans-esterificazione di oli esausti. A tal fine, sono state acquisite le caratteristiche tecniche di differenti unità commerciali basate su motori a combustione interna. Particolare attenzione è stata rivolta alla potenza elettrica, all'efficienza, alle emissioni ed ai consumi dichiarati dai differenti costruttori, nonché agli ingombri, ai pesi e all'accessibilità delle parti del motore per le misure sperimentali, allo scopo di valutare la migliore soluzione per l'integrazione in sistemi ibridi poligenerativi.

Per la caratterizzazione sperimentale è stato individuato, quindi, il gruppo elettrogeno MOSA GE15 YSXC, super silenziato, con un serbatoio di 60 litri di capacità e un'autonomia stimata pari a 23 ore con funzionamento continuo. Il gruppo elettrogeno trasforma l'energia meccanica generata da un motore a

combustione interna ad accensione per compressione in energia elettrica attraverso un alternatore. Il sistema, mostrato in Figura 9, è composto da un basamento, un serbatoio, un gruppo motore-alternatore fissato sul basamento da ammortizzatori elastici, un roll-bar con ganci per un facile e sicuro sollevamento, una cofanatura per un accesso rapido al motore, al filtro dell'aria e alla batteria. Il gruppo selezionato consente di valorizzare efficacemente per scopi cogenerativi il calore di scarto derivante dai gas di scarico e dal circuito di raffreddamento.

Il sistema comprende, inoltre, un quadro elettrico dove sono presenti le protezioni e gli strumenti di misura. Il pannello di controllo ospita le prese e i comandi della macchina, tra cui l'interruttore differenziale, l'interruttore magnetotermico e la protezione motore. Quando il sistema di regolazione della tensione d'uscita "compound" si combina con il sistema "AVR", quest'ultimo viene sostituito dal compound nel momento in cui viene richiesta una quantità di corrente maggiore rispetto al valore nominale (ad esempio durante la fase di avviamento del motore). La doppia regolazione è in grado di funzionare sia con il compound, sia con il solo AVR, aumentando il grado di affidabilità in caso di guasto di uno dei due sistemi.

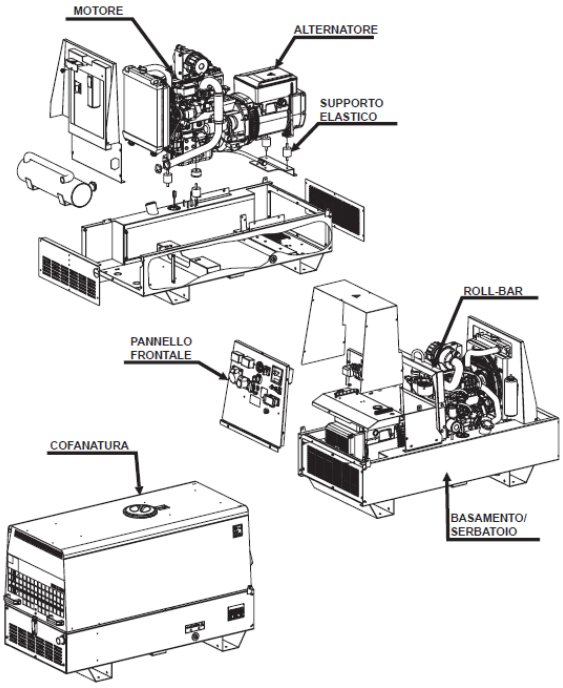


Figura 9 Gruppo elettrogeno MOSA GE15 YSXC

Le principali specifiche del gruppo elettrogeno sono riportate nella Tabella 18:

Tabella 18 Specifiche gruppo elettrogeno

Potenza Elettrica Nominale (Trifase)	11.2 kW (400 V -20.2 A)

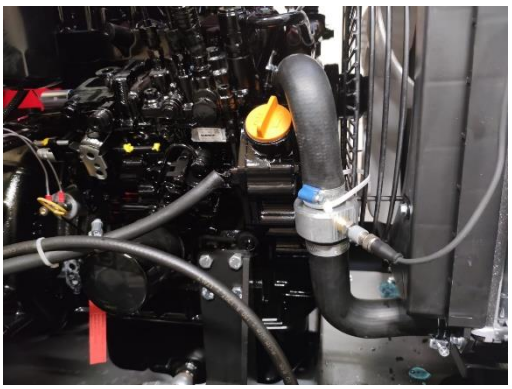
Cilindri/Cilindrata	3/1642 cm^3 (1.6 l)
Alesaggio/Corsa	88/90 (mm)
Rapporto di Compressione	20:1
Consumo Combustibile 100% Carico	230 g/kWh (3.4 l/h)
Consumo Combustibile 75% Carico	237 g/kWh (2.6 l/h)
Consumo Combustibile 50% Carico	262 g/kWh (1.9 l/h)

2.2 Allestimento del banco prova

Al fine di valutare sperimentalmente le performance del motore a combustione interna alimentato con biodiesel, è stato allestito un banco prova in grado di monitorare il consumo di combustibile, l'energia elettrica e termica scambiata, i regimi termici del motore e i rendimenti elettrici e termici in differenti condizioni operative.

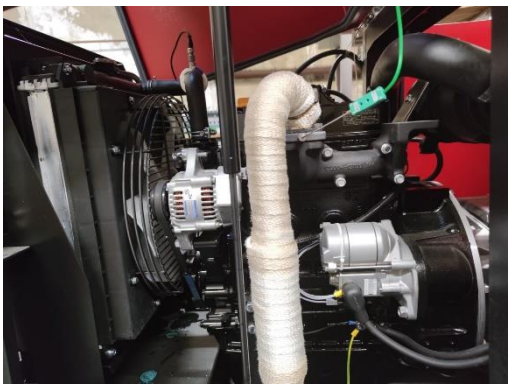
Il banco prova si compone del gruppo elettrogeno e di una serie di misuratori (termocoppie, termoresistenze, contatori di energia, misuratori di portata, bilancia gravimetrica) idonei all'acquisizione delle grandezze di maggiore interesse. In particolare, gli strumenti di misura installati permettono di valutare la temperatura del fluido refrigerante in ingresso e in uscita dal motore, la temperatura dei gas di scarico, il consumo di combustibile e l'energia elettrica erogata per ogni condizione operativa. Inoltre, è stato sviluppato un sistema di acquisizione dati in ambiente LabView al fine di acquisire, registrare ed elaborare i differenti segnali.

Nella Figura 10 sono mostrati alcuni degli strumenti di misura installati sul motore.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 10 Strumenti di misura installati sul motore: (a) Termoresistenza ingresso motore; (b) Termoresistenza uscita motore; (c) Termocoppia collettore di scarico; (d) Termocoppia condotto di scarico

2.3 Testing

La prima parte dell'attività sperimentale si è focalizzata sulla preparazione delle miscele di combustibile gasolio/biodiesel per l'alimentazione del motore a combustione interna. In particolare, nella Tabella 19 sono riportate le composizioni delle miscele adottate:

Tabella 19 Miscele di combustibile gasolio/biodiesel

Miscela	Gasolio (% vol.)	Biodiesel (% vol.)
B0	100	0
B20	80	20
B40	60	40
B60	40	60
B80	20	80
B100	0	100

Le prove sperimentali sono state condotte in condizioni stazionarie, alimentando il motore con biodiesel, gasolio e diverse miscele dei due combustibili.

Le prestazioni del motore sono valutate in termini di efficienza elettrica η_{el}, efficienza termica η_{th} e consumo specifico di combustibile SFC:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_f LHV_{fuel}} \tag{1}$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{m}_f LHV_{fuel}} = \frac{\dot{Q}_{cool} + \dot{Q}_{exh}}{\dot{m}_f LHV_{fuel}} = \eta_{cool} + \eta_{exh} \tag{2}$$

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P_{el}} \tag{3}$$

dove P_{el} è la potenza elettrica erogata, $\dot{m}_f$ è la portata massica di combustibile in alimentazione al motore, mentre LHV_{fuel} è il potere calorifico inferiore del combustibile.

La potenza termica $\dot{Q}_{th}$ fornita dal motore può essere valutata come somma della potenza termica ottenibile dal circuito di raffreddamento $\dot{Q}_{cool}$ e dai gas di scarico $\dot{Q}_{exh}$:

$$\dot{Q}_{cool} = \dot{m}_{cool} c_{p,cool} \left(T_{in,cool} - T_{out,cool}\right) \tag{4}$$

$$\dot{Q}_{exh} = \dot{m}_{exh} c_{p,exh} \left(T_{exh,out} - T_{exh,ref}\right) \tag{5}$$

dove $\dot{m}_{cool}$ e $c_{p,cool}$ sono rispettivamente la portata massica e il calore specifico a pressione costante del fluido refrigerante, $T_{in,cool}$ e $T_{out,cool}$ sono rispettivamente la temperatura del fluido refrigerante in ingresso e in uscita dal motore, $\dot{m}_{exh}$ e $c_{p,exh}$ sono la portata massica e il calore specifico a pressione

costante dei gas di scarico mentre $T_{exh,out}$ è la temperatura dei gas di scarico in uscita dal motore e $T_{exh,ref}$ è la temperatura di riferimento in base alla quale si valuta la potenza termica dei gas di scarico. Le Figure 11 e 12 mostrano le prestazioni del motore a combustione interna registrate durante la campagna sperimentale in termini di rendimento elettrico e consumo specifico di combustibile per le differenti miscele di biodiesel e gasolio (Tabella 2).

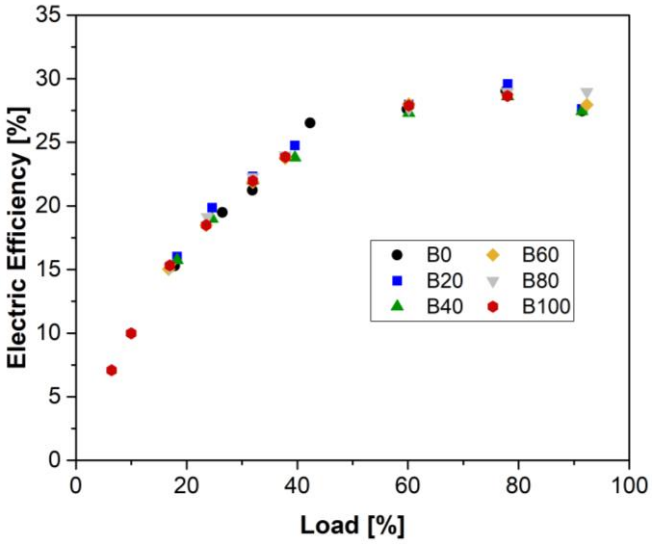


Figura 11 Rendimento elettrico del motore alimentato con biodiesel (B100), gasolio (B0) e miscele biodiesel/gasolio in funzione del carico elettrico

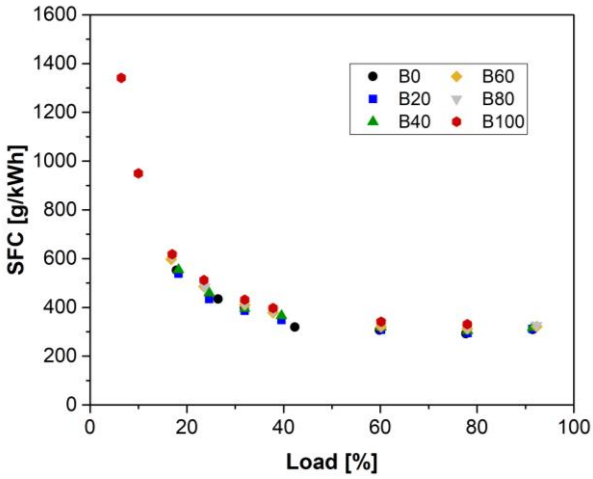


Figura 12 Consumo specifico di combustibile del motore alimentato con biodiesel (B100), gasolio (B0) e miscele biodiesel/gasolio in funzione del carico elettrico

Le figure mostrano risultati simili indipendentemente dalle caratteristiche delle miscele adoperate durante la sperimentazione. La differenza massima sul rendimento elettrico e sul consumo di combustibile è, infatti, pari al 3,4% e si registra tra la miscela B40 e la miscela B80 in corrispondenza del 92% del carico. Il rendimento elettrico aumenta fino a circa l'80% della potenza nominale mentre il consumo specifico di combustibile presenta un andamento complementare. È interessante notare che le

prestazioni registrate con i differenti combustibili sono confrontabili tra di loro, nonostante il biodiesel presenti un minore potere calorifico inferiore, una maggiore viscosità e una maggiore densità rispetto al gasolio.

L'attività sperimentale ha consentito, inoltre, di valutare l'efficienza termica derivante dalla valorizzazione energetica dei gas di scarico e dal circuito di raffreddamento. A titolo di esempio nella Figura 13 e nella Figura 14 sono mostrati i rendimenti termici corrispondenti alla valorizzazione dei gas di scarico η_{exh} e del fluido refrigerante η_{cool} registrati quando il gruppo elettrogeno è alimentato con biodiesel puro (B100). Si rileva un continuo incremento dell'efficienza termica η_{exh} al crescere della potenza elettrica garantita dal motore a combustione interna, in virtù dei corrispondenti incrementi della portata e della temperatura dei gas di scarico. Viceversa, l'efficienza termica legata al circuito di raffreddamento diminuisce all'aumentare del carico elettrico.

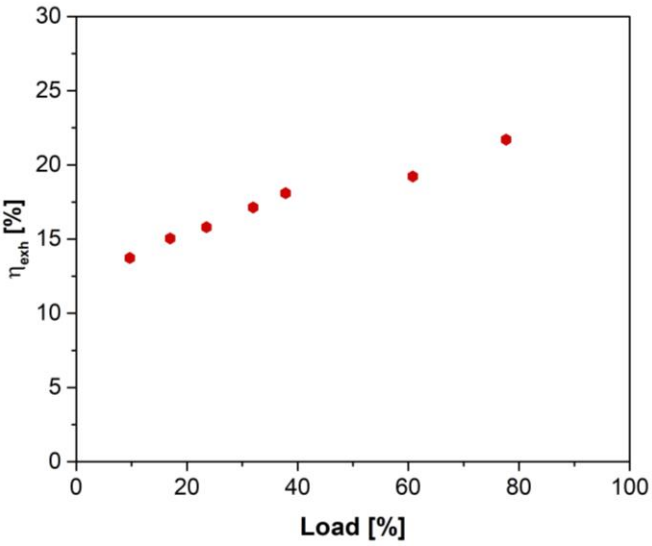


Figura 13 Rendimento termico ottenibile dai gas di scarico del motore alimentato con biodiesel (B100) in funzione del carico elettrico

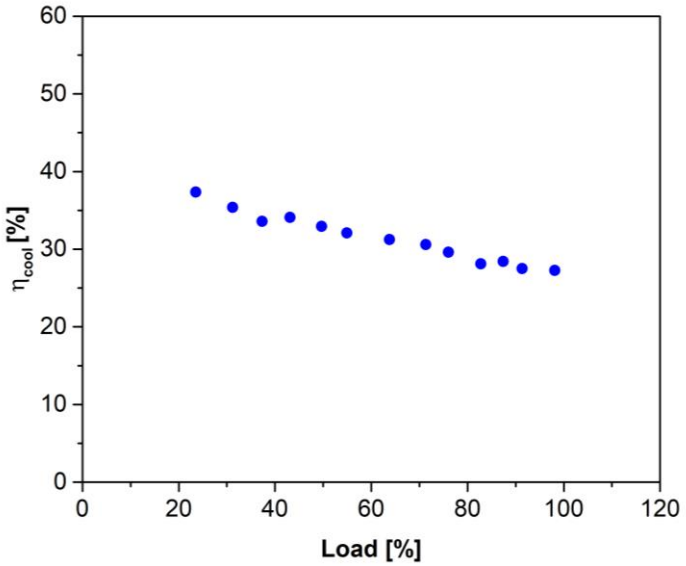


Figura 14 Rendimento termico ottenibile dal circuito di raffreddamento del motore alimentato con biodiesel (B100) in funzione del carico elettrico

3. MODELLO MATEMATICO DELL'UNITÀ CHP

3.1 Definizione del modello matematico

Al fine di valutare le prestazioni di sistemi energetici cogenerativi (CHP) di piccola taglia per la valorizzazione energetica del biodiesel prodotto dal processo di trans-esterificazione degli oli esausti, è stato sviluppato un modello matematico di un motore a combustione interna in assetto cogenerativo alimentato con biodiesel. Una possibile configurazione semplificata del sistema micro-CHP nonché i principali flussi energetici sono mostrati nella Figura 15. In particolare, il recupero dell'energia termica avviene sia dal fluido refrigerante che dai gas di scarico del motore.

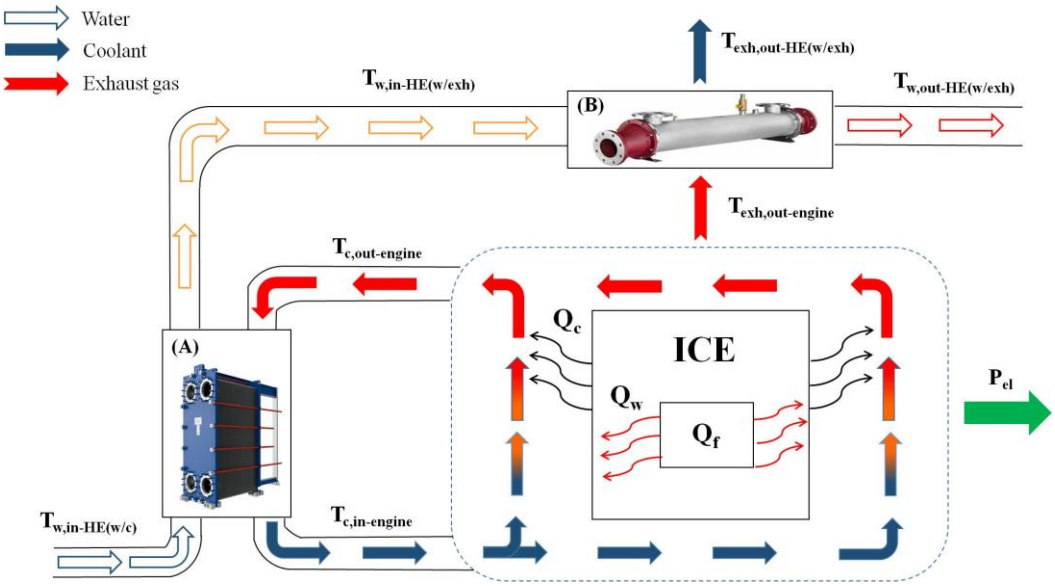


Figura 15 Layout del sistema micro-CHP

Il modello matematico, implementato in ambiente Matlab, permette di valutare le prestazioni del sistema cogenerativo in termini di rendimento elettrico, rendimento termico e consumo specifico di combustibile, nonché di valutare la pressione all'interno del cilindro, la temperatura dei gas di scarico, la temperatura del fluido refrigerante e i principali parametri motoristici per ogni condizione di funzionamento.

Gli input del modello sono le specifiche del motore (alesaggio, corsa del pistone, rapporto di compressione, ecc.), le condizioni operative (carico e numero di giri) e le caratteristiche del combustibile (potere calorifico inferiore, rapporto aria/combustibile stechiometrico, densità e numero di cetano).

3.2 Implementazione del modello matematico

Il modello si basa sul principio di conservazione dell'energia applicato ad un motore a combustione interna (Figura 16).

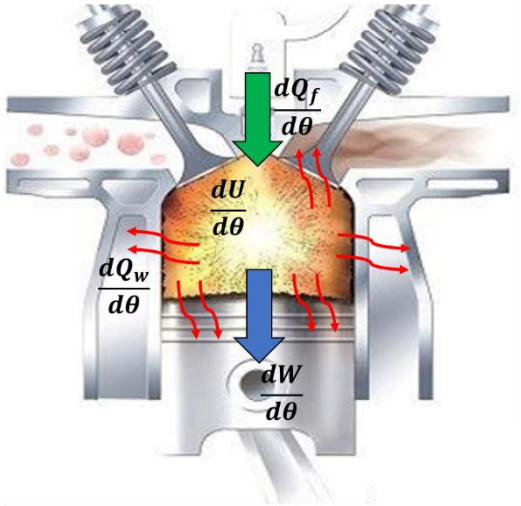


Figura 16 Modellazione del motore a combustione interna

Il principio di conservazione può essere espresso in funzione dell'angolo di manovella θ secondo la seguente formulazione:

$$\frac{dQ_f}{d\theta} - \frac{dQ_h}{d\theta} = \frac{dU}{d\theta} + \frac{dW}{d\theta} \tag{6}$$

dove, $\frac{dQ_f}{d\theta}$ è la variazione di energia dovuta alla ossidazione del combustibile, $\frac{dQ_h}{d\theta}$ rappresenta la variazione di energia termica trasferita alle pareti del cilindro, $\frac{dU}{d\theta}$ è la variazione di energia interna, mentre $\frac{dW}{d\theta}$ corrisponde alla variazione del lavoro indicato, θ è l'angolo di manovella. L'equazione (6) può essere riscritta nel seguente modo:

$$\frac{dQ_f}{d\theta} - \frac{dQ_h}{d\theta} = mc_v\frac{dT}{d\theta} + p\frac{dV}{d\theta} \tag{7}$$

dove m è la massa della miscela, c_v rappresenta il calore specifico a volume costante e p è la pressione all'interno del cilindro.

Facendo uso dell'equazione di stato dei gas perfetti è possibile esprimere la (7) come segue:

$$\frac{dp}{d\theta} = \frac{\gamma - 1}{V}\left(\frac{dQ_f}{d\theta} - \frac{dQ_h}{d\theta}\right) - \gamma\frac{p}{V}\frac{dV}{d\theta} \tag{8}$$

dove V è il volume istantaneo del cilindro, γ è il rapporto dei calori specifici ($\gamma = c_p/c_v$).

È possibile determinare la pressione all'interno del cilindro in funzione dell'angolo di manovella:

$$\frac{dQ_f}{d\theta} = \frac{dx_b(\theta)}{d\theta} m_{fuel} \cdot LHV_{fuel} \cdot \eta_{comb} \tag{9}$$

dove m_{fuel} è la massa di combustibile all'interno della camera di combustione valutata alla chiusura della valvola di aspirazione, LHV_{fuel} rappresenta il potere calorifico del combustibile, η_{comb} è l'efficienza di combustione mentre $x_b(\theta)$ è la frazione di massa combusta, modellata mediante una triplice funzione di Wiebe. La funzione tripla di Wiebe tiene conto delle tre fasi della combustione (fase premiscelata, diffusiva e finale) tipiche della combustione del gasolio-biodiesel:

$$x_b(\theta) = 1 - \sum_{i=1}^{3} \beta_i \cdot exp\left(-a_i \cdot \left(\frac{\theta - \theta_i}{\Delta\theta_i}\right)^{M_i+1}\right) \tag{10}$$

dove β_i è la frazione di combustibile bruciata per ogni fase della combustione, a_i è una costante che tiene conto dell'efficienza della combustione, θ_i e $\Delta\theta_i$ sono rispettivamente l'istante di accensione e la durata della combustione per l'i-esima fase, M_i è il parametro di forma e stabilisce la velocità di combustione. I parametri della funzione tripla di Wiebe sono stati calibrati facendo uso di risultati sperimentali. Al fine di determinare l'istante di accensione è necessario determinare il tempo del ritardo di accensione. Il ritardo di accensione è definito come la differenza tra l'istante di accensione e l'istante di iniezione ed è calcolato mediante la seguente relazione:

$$\tau_{id} = (0.36 + 0.22S_p)exp\left[E_a\left(\frac{1}{RT_{TDC}} - \frac{1}{17190}\right) + \left(\frac{21.2}{P_{TDC} - 12.4}\right)^{0.63}\right] \tag{11}$$

dove S_p è la velocità media del pistone, R la costante universale dei gas, T_{TDC} e P_{TDC} sono rispettivamente la temperatura e la pressione al punto morto superiore. L'energia di attivazione E_a è determinata mediante la seguente relazione:

$$E_a = \frac{618840}{CN + 25} \tag{12}$$

dove *CN* è il numero di cetano.

Per valutare l'energia termica trasferita alle pareti del cilindro $\frac{dQ_w}{d\theta}$ sono stati presi in considerazione due modelli, quello di Woschni e quello di Annand. Secondo Annand l'energia termica ceduta alle pareti è:

$$\frac{dQ_w}{d\theta} = A\left(a\frac{k}{D}Re^b(T_w - T) + c(T_w^4 - T^4)\right) \tag{13}$$

dove A è l'area interessata al trasferimento del calore (pistone, pareti cilindro, testa del cilindro), T_w è la temperatura della parete del cilindro, $Re = \frac{\rho S_p D}{\mu}$ è il numero di Reynolds con D l'alesaggio, S_p la velocità media del pistone, ρ, μ, k sono la densità, la viscosità dinamica e la conduttività termica del gas combusto; a, b, c, sono delle costanti che dipendono dal numero di giri e dal tipo di motore.

Secondo Woschni:

$$\frac{dQ_w}{d\theta} = Ah(T_w - T) \tag{14}$$

dove h è il coefficiente di scambio termico valutabile nel seguente modo:

$$h = 3.26 \cdot D^{-0.2} p_{cyl}^{0.8} T^{-0.55} w^{0.8} \tag{15}$$

w è la velocità media del gas combusto all'interno del cilindro:

$$w = \left[C_1 \bar{S}_p + C_2 \frac{V_d T_r}{p_r V_r}(p_{cyl} - p_m)\right] \tag{16}$$

V_d è la cilindrata, p_r, V_r e T_r sono la pressione, il volume e la temperatura di riferimento (per esempio alla chiusura della valvola di aspirazione o all'inizio della combustione), p_m è la pressione del cilindro in condizione di motore trascinato e p_{cyl} è la pressione all'interno del cilindro. La scelta dell'opportuno

modello di scambio termico dipenderà dal confronto tra i risultati sperimentali e quelli forniti dal modello.

Indicando con $\dot{Q}_f$ la potenza termica primaria fornita dal combustibile, P_b la potenza meccanica, $\dot{Q}_{cool}$ la potenza termica trasferita al fluido refrigerante, $\dot{Q}_{exh}$ la potenza termica contenuta nei gas di scarico e con $\dot{Q}_{misc}$ la potenza persa (perdite per attrito, organiche e potenza termica persa per convezione e radiazione all'ambiente esterno), è possibile ottenere il seguente bilancio energetico:

$$\dot{Q}_f = P_b + \dot{Q}_{cool} + \dot{Q}_{exh} + \dot{Q}_{misc} \tag{17}$$

Il corrispondente diagramma di flusso energetico è mostrato in Figura 17.

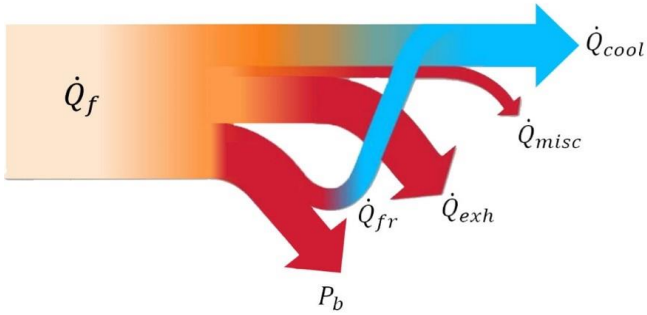


Figura 17 Diagramma di flusso energetico per il sistema micro-CHP

La potenza meccanica è valutata come differenza tra la potenza indicata e la potenza persa per attrito, la quale è mantenuta costante per un dato numero di giri del motore. La potenza termica trasferita al fluido refrigerante è valutata come segue:

$$\dot{Q}_{cool} = \dot{Q}_w + 0.53 fmep \frac{\nu_{oil}}{\nu_{oil,90}} \frac{V_d N}{120} \tag{18}$$

La potenza termica trasferita alle pareti della camera di combustione è determinata mediante la (17) o la (18), mentre il secondo termine, al secondo membro dell'equazione, è la frazione della potenza persa per attrito trasferita sotto forma di potenza termica al fluido refrigerante, dove con *fmep* si è indicato la pressione media effettiva relativa alle perdite per attrito, mentre con *N* il numero di giri del motore. La potenza termica recuperata attraverso i gas di scarico è valutata nel seguente modo:

$$\dot{Q}_{exh} = \dot{m}_f LHV_{fuel} - P_b - \dot{Q}_{cool} - \dot{Q}_{misc} \tag{19}$$

La potenza elettrica è valutata come prodotto tra la potenza meccanica P_b e il rendimento elettro-meccanico η_{em}, mentre la potenza termica $\dot{Q}_{th}$ che può essere recuperata, tiene in considerazione sia la potenza termica recuperata dal circuito di raffreddamento ($\dot{Q}_{cool}$) che dai gas di scarico del motore ($\dot{Q}_{exh}$), nonché le efficienze degli scambiatori di calore (rispettivamente $\eta_{he,cool}$ e $\eta_{he,exh}$):

$$P_{el} = P_b \eta_{em} \tag{20}$$

$$\dot{Q}_{th} = \eta_{he,cool}\, \dot{Q}_{cool} + \eta_{he,exh}\, \dot{Q}_{exh} \tag{21}$$

$$\dot{Q}_{exh} = \dot{m}_f LHV_{fuel} - P_b - \dot{Q}_{cool} - \dot{Q}_{misc} \tag{22}$$

Le prestazioni del sistema micro-CHP possono essere espresse in termini di rendimento elettrico η_{el}, rendimento termico η_{th} e consumo specifico di combustibile (SFC):

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_f LHV_{fuel}} \tag{23}$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{m}_f LHV_{fuel}} \tag{24}$$

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P_{el}} \tag{25}$$

Inoltre, sono stati presi in considerazione come parametri cogenerativi l'indice di risparmio di energia primaria (PES) e il fattore di utilizzazione energetica (EUF), così definiti:

$$PES = 1 - \frac{\dot{m}_f LHV_{fuel}}{\frac{P_{el}}{\eta_{el,ref}} + \frac{\dot{Q}_{th}}{\eta_{th,ref}}} \tag{26}$$

$$EUF = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{th}}{\dot{m}_f LHV_{fuel}} \tag{27}$$

dove $\eta_{el,ref}$ e $\eta_{th,ref}$ sono rispettivamente i rendimenti elettrici e termici per la produzione separata.

Al fine di valutare le emissioni di ossidi di azoto (NO_x) è stato adottata una formulazione semi-empirica

che tiene conto della temperatura adiabatica di fiamma (T_{ad}), della funzione del rilascio del calore e dalle condizioni operative secondo la seguente espressione:

$$m_{NO_x} = \varphi \int_{SOC}^{EOC} k_1 \left(\frac{N}{2000}\right)^{k_2} e^{\frac{k_3}{T_{ad}}} dQ_f \tag{28}$$

dove m_{NO_x} è la massa di ossidi di azoto per ciclo motore prodotta durante la combustione, T_{ad} è la temperatura adiabatica di fiamma, mentre k_1, k_2 e k_3 sono parametri di calibrazione. Il coefficiente φ tiene in considerazione il processo di riduzione degli ossidi di azoto dovuto al ricircolo interno degli NO_x durante il processo di combustione.

3.3 Risultati numerici e validazione sperimentale

Al fine di validare il modello numerico proposto è stato effettuato un primo confronto con dati sperimentali tratti da letteratura [16]. Nelle Tabelle 20 e 21 sono riportate rispettivamente le caratteristiche del motore e le proprietà termofisiche del biodiesel considerato [16].

Tabella 20 Caratteristiche motore diesel

Parametri motore	Singolo Cilindro, DI, 4-tempi, accensione per compressione
Alesaggio	105 mm
Corsa	115 mm
Lunghezza biella	185 mm
Rapporto di compressione	16.5:1
Cilindrata	996 cc
Potenza nominale	11.03 kW
Giri motore	2200 rpm
Istante di iniezione	22° BTDC
Fori iniettore	4 x 0.32 mm diametro
Pressione di iniezione	180 bar

Tabella 21 Proprietà biodiesel

Proprietà	B100
Densità [kg/m^3]	870
Viscosità cinematica a 20 °C [mm^2/s]	7.8

Potere calorifico inferiore [MJ/kg]	38.8
Punto di infiammabilità [°C]	166
Punto di solidificazione [°C]	-1
Acidità [mg KOH/g]	1.8

Nella Figura 18 viene mostrato il confronto numerico-sperimentale tra il rendimento globale (BTE) e il consumo specifico di combustibile (BSFC) in funzione della pressione media effettiva (bmep).

Come previsto, il BTE aumenta mentre il BSFC diminuisce all'aumentare del carico del motore. In particolare, i valori del BTE e del BSFC, a basso carico (bmep = 0.8 bar), sono rispettivamente uguali a 15,6% e 594,5 g/kWh, mentre i corrispondenti valori sperimentali sono 16,8% e 553,6 g/kWh; a pieno carico (bmep = 6 bar) il modello mostra che il rendimento globale raggiunge il 34,5% e il consumo specifico di combustibile si riduce al 268,5 g/kWh, mentre le misure sperimentali corrispondono rispettivamente al 34,7% e 267,4 g / kWh. È stato pertanto registrato un buon accordo tra risultati numerici e quelli sperimentali, ottenendo un errore percentuale medio del 3%.

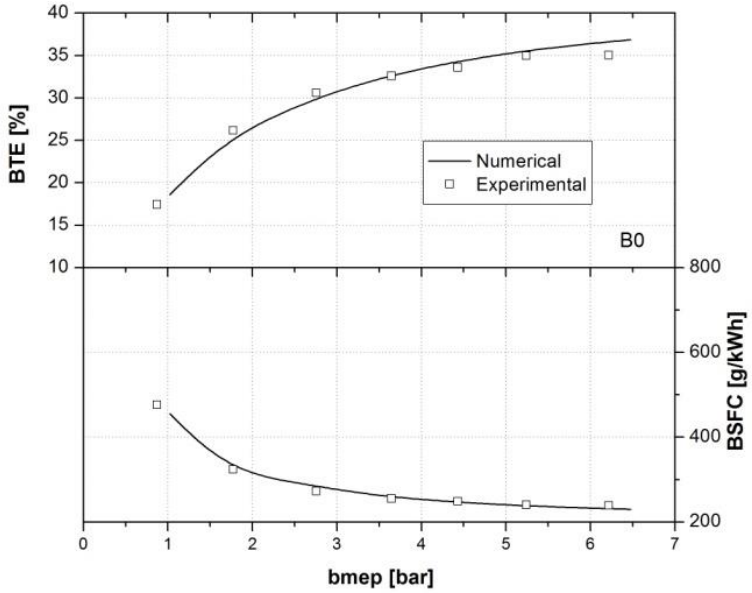


Figura 18 Confronto numerico-sperimentale del rendimento globale e del consumo specifico di combustibile

Inoltre, la validazione è stata estesa considerando sia la curva di rilascio del calore (HRR) che la pressione all'interno del cilindro. A titolo di esempio, la Figura 19 mostra il confronto tra i risultati sperimentali e numerici a 5,3 bar bmep (88% del carico). Vale la pena evidenziare che i valori negativi della curva di rilascio del calore che si osservano prima dell'inizio della combustione sono dovuti alla vaporizzazione del combustibile accumulato durante il tempo di ritardo di accensione.

I risultati numerici sono in buon accordo con le misure sperimentali. Infatti, l'istante in cui la

combustione ha inizio (SOC), previsto dal modello numerico (6 ° CA BTDC) è confrontabile con il valore sperimentale (7 ° CA BTDC). Questo risultato conferma la corretta caratterizzazione del ritardo di accensione (ID) adottando l'equazione (11). Inoltre, si osserva una leggera differenza tra i risultati numerici e quelli sperimentali nelle fasi premiscelata e diffusiva della combustione. In particolare, durante fase di diffusione la curva sperimentale dell'HRR presenta un leggero picco, mentre il modello numerico stima un andamento regolare e privo di picchi. Ciò è dovuto ad una diversa stima della frazione di biodiesel bruciata durante la fase premiscelata e diffusiva. Tuttavia, le differenze si mantengono sempre inferiori al 4,4%. Ciò può essere confermato dall'andamento della pressione all'interno del cilindro (Figura 19b), dove il picco di pressione predetto dal modello numerico è leggermente sottostimato. Vale la pena notare che questo confronto è limitato ad un range di angolo di manovella che va dal punto morto superiore (TDC) a 10 ° CA dopo il punto morto superiore (ATDC) a causa della mancanza di dati di pressione sperimentali forniti dalla letteratura [16] al di fuori di questo intervallo.

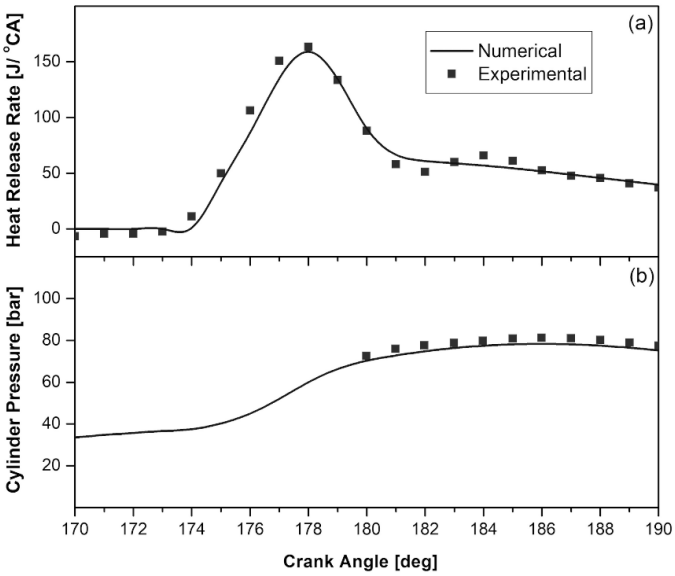


Figura 19 Confronto numerico-sperimentale della curva di rilascio del calore (a) e della curva di pressione all'interno del cilindro (b)

Nella Figura 20 viene mostrato il confronto numerico sperimentale tra le emissioni di ossidi di azoto (NO_x) a diversi carichi del motore ed evidenzia che il modello proposto ben caratterizza il comportamento del motore alimentato con biodiesel anche in termini emissioni di NO_x, con differenze tra valori numerici e sperimentali sempre inferiori a 3,9%. Le emissioni di NO_x aumentano all'aumentare del carico del motore a causa dell'aumento della temperatura adiabatica di fiamma, del contenuto di ossigeno e del tempo di permanenza nella zona di combustione in accordo con la letteratura

[17,18]. In particolare, a basso carico (bmep = 0,8 bar) si registra un valore degli ossidi di azoto pari a circa 400 ppm mentre si raggiungono circa 1900 ppm a pieno carico (bmep = 6 bar).

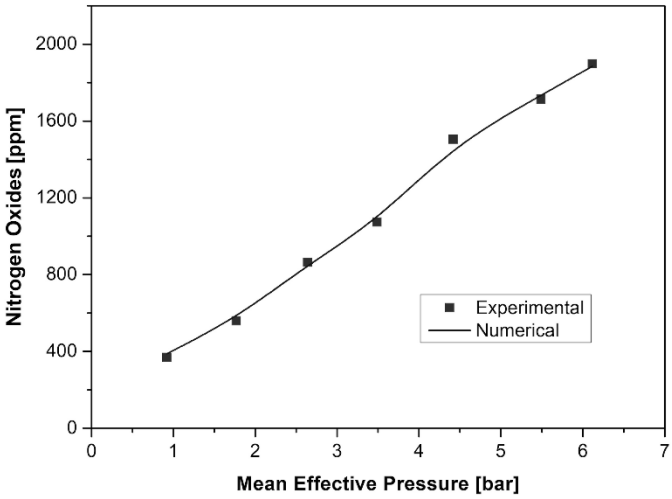


Figura 20 Confronto numerico-sperimentale in termini di emissioni di ossidi di azoto.

Il modello numerico proposto ha consentito inoltre di caratterizzare le prestazioni energetiche globali dell'unità micro-CHP alimentata con biodiesel. A pieno carico la potenza elettrica e quella termica sono pari rispettivamente a 6,7 kW_{el} e 11,3 kW_{th}, mentre le perdite totali sono di circa 3,6 kW. La Figura 21 evidenzia il bilancio energetico previsto dal modello numerico nella condizione operativa nominale, normalizzato rispetto all'energia primaria del combustibile che alimenta il sistema micro-CHP.

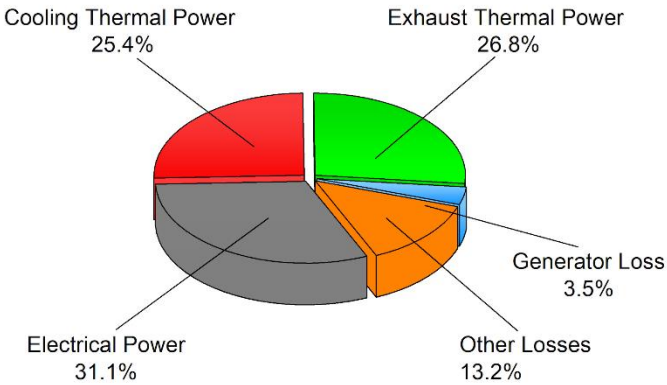


Figura 21 Bilancio energetico per il sistema micro-CHP alimentato a biodiesel

Il fattore di utilizzazione energetica (EUF) è pari all'83,3%, pertanto il 16,7% dell'energia primaria del biodiesel non può essere utilizzata per scopi di cogenerazione, in linea con i risultati registrati in letteratura [19,20]. Le efficienze elettrica e termica corrispondono rispettivamente al 31,1% e al 52,2%.

In particolare, il recupero della potenza termica è ottenuto dalla valorizzazione energetica del fluido refrigerante e dei gas di scarico (rispettivamente 25,4% e 26,8% rispetto alla potenza termica del combustibile).

Inoltre, il comportamento dell'unità di micro-cogenerazione è stato caratterizzato in funzione del fattore di carico elettrico. A tal fine, i rendimenti e il consumo specifico di combustibile sono stati normalizzati rispetto ai corrispondenti valori a pieno carico, come segue:

$$\bar{\eta}_{el} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{el,full}} \tag{26}$$

$$\bar{\eta}_{th,exh} = \frac{\eta_{th,exh}}{\eta_{th,exh,full}} \tag{27}$$

$$\bar{\eta}_{th,cool} = \frac{\eta_{th,cool}}{\eta_{th,cool,full}} \tag{28}$$

$$\bar{S}_{fc} = \frac{S_{fc}}{S_{fc,full}} \tag{29}$$

mentre il fattore di carico elettrico (L_f) è il rapporto tra la potenza elettrica e la potenza elettrica nominale:

$$L_f = \frac{P_{el}}{P_{el,full}} \tag{30}$$

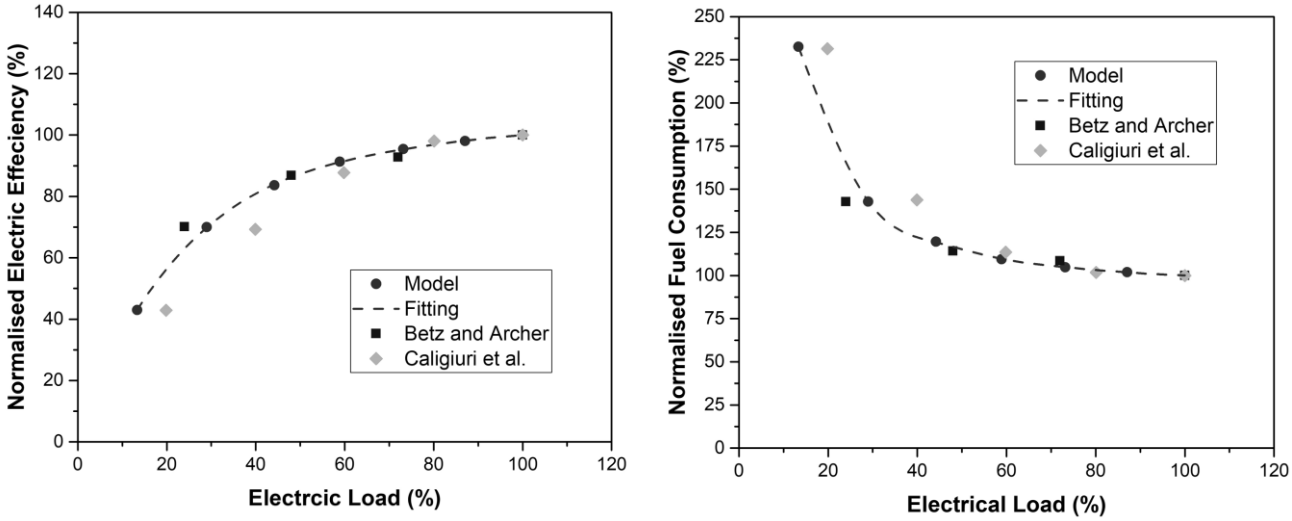
Il rendimento elettrico normalizzato si riduce al diminuire del carico elettrico (Figura 13a) e mantiene valori superiori all'82% per $L_f \geq 0{,}5$. In corrispondenza del carico $L_f = 0{,}2$ il parametro normalizzato è pari al 56,4% e si riduce al 43,1% a $Lf = 0{,}13$. Viceversa, le prestazioni termiche aumentano ai carichi parziali e le efficienze termiche normalizzate del refrigerante e dei gas di scarico raggiungono rispettivamente il 151,2% e il 111,9% in condizioni di carico minimo. L'analisi dimostra che il carico elettrico influenza in modo significativo il consumo specifico del combustibile (Figura 22b). In particolare, a basso carico, il consumo è più che raddoppiato rispetto al funzionamento a pieno carico.

La Figura 22 evidenzia anche che i parametri normalizzati possono essere opportunamente approssimati adottando le seguenti correlazioni polinomiali (curve tratteggiate in figura):

$$\bar{\eta}_{el} = -1.34\, L_f^4 + 4.44\, L_f^3 - 5.71\, L_f^2 + 3.57\, L_f + 0.05 \tag{31}$$

$$\bar{S}_{fc} = \left(-1.34\, L_f^4 + 4.44\, L_f^3 - 5.71\, L_f^2 + 3.57\, L_f + 0.05\right)^{-1} \tag{32}$$

con un R^2 maggiore del 99%.



(a) (b)

Figura 22 Prestazioni cogenerative in termini di parametri normalizzati: efficienza elettrica (a) e consumo specifico di combustibile (b). Confronto con i risultati sperimentali estratti dalla letteratura [12, 21]

Il confronto con i risultati sperimentali di letteratura [12,13,21] ha rivelato un buon accordo per la maggior parte dei dati. È importante evidenziare che le proprietà termofisiche e chimiche del biodiesel sono poco omogenee e dipendono fortemente dalle risorse utilizzate, dai processi e dalle tecnologie adottate per la produzione del biocarburante. Alla luce di ciò le equazioni normalizzate proposte rappresentano uno strumento utile per la previsione delle prestazioni dei sistemi energetici micro-CHP alimentati con biodiesel a carico parziale.

La validazione del modello numerico è proseguita adoperando i rilievi sperimentali derivanti dalle prove condotte in laboratorio. A titolo di esempio nelle Figure 23, 24 e 25 si riporta il confronto numerico-sperimentale per il rendimento elettrico, per la temperatura dei gas di scarico e per la potenza termica ottenibile dal circuito di raffreddamento in funzione del carico elettrico. Si evince anche in questo caso come i risultati numerici siano in ottimo accordo con quelli sperimentali, con differenze inferiori al 5%.

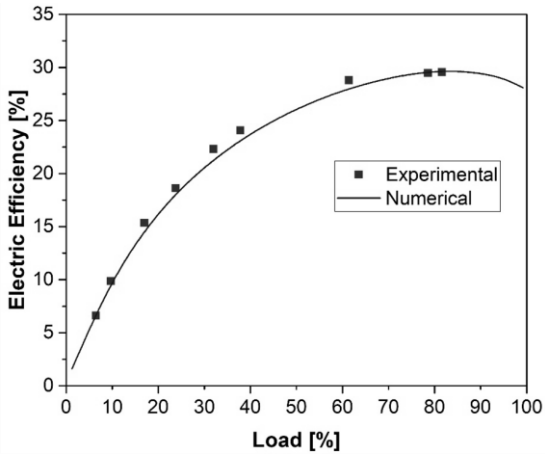


Figura 23 Confronto numerico-sperimentale del rendimento elettrico in funzione del carico elettrico

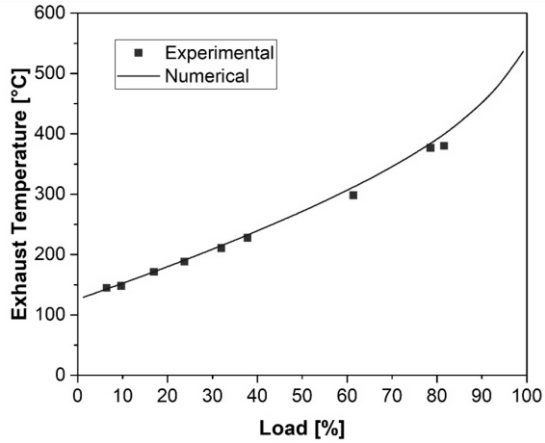


Figura 24 Confronto numerico-sperimentale della temperatura dei gas di scarico del motore in funzione del carico elettrico

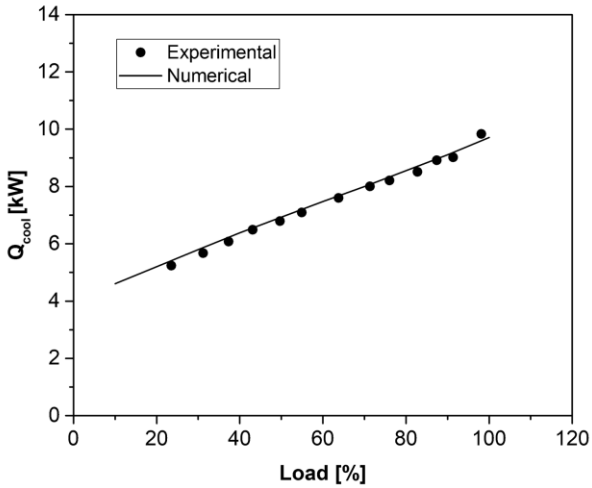


Figura 25 Confronto numerico-sperimentale della potenza termica ottenibile dal circuito di raffreddamento del motore in funzione del carico elettrico

Parallelamente sono stati modellati e analizzati differenti sistemi cogenerativi alimentati con biodiesel in grado di integrarsi con diverse tecnologie basate su fonti tradizionali e rinnovabili (Figure 26 e 27).

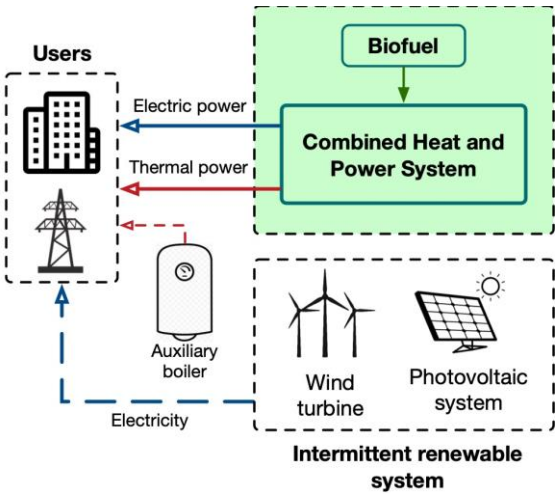


Figura 26 Schema semplificato di un sistema cogenerativo multi-sorgente

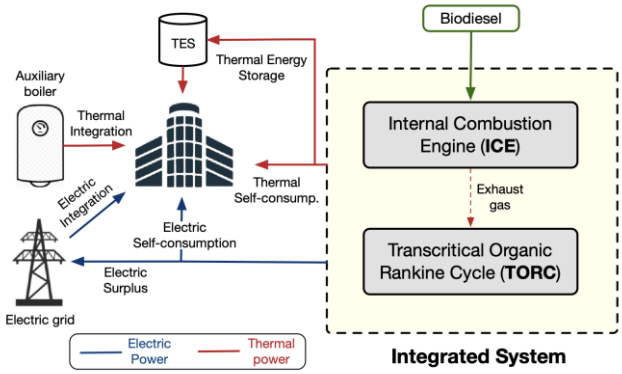


Figura 27 Schema semplificato di un sistema integrato alimentato con biodiesel

4. Primi test sperimentali dell'unità CHP gruppo elettrogeno MOSA GE15 YSXC integrato con la NANOGRID

L'obiettivo dell'attività è stato quello di eseguire i primi test sperimentali della nanogrid con il gruppo elettrogeno MOSA GE15 YSXC, al fine di validare la soluzione di interfaccia progettata. Pertanto, è descritta la soluzione tecnologica sviluppata come interfaccia tra nanogrid e gruppo elettrogeno, inoltre sono esposti i risultati ottenuti dalle sperimentazioni condotte applicando tale soluzione ad un prototipo di nanogrid appositamente realizzato per garantire la connessione con il gruppo elettrogeno e permetterne l'utilizzo per l'alimentazione di carichi critici e per fornire eventuali servizi per la comunità energetica.

4.1 Integrazione del Gruppo Elettrogeno con la Nanogrid

Il Gruppo Elettrogeno MOSA GE15 YSXC, utilizzato per l'integrazione con la Nanogrid è un gruppo elettrogeno trifase, quindi l'interfacciamento alla nanogrid monofase è stato progettato in modo tale da

non sbilanciare il gruppo elettrogeno e garantire la possibilità di prelievo di energia dal gruppo stesso in base alle necessità del carico e/o della comunità energetica, quando il sistema di accumulo è ormai scarico.

La soluzione progettuale adottata prevede l'impiego di un trasformatore trifase, che collega il gruppo elettrogeno alla nanogrid, come illustrato in Figura 28.

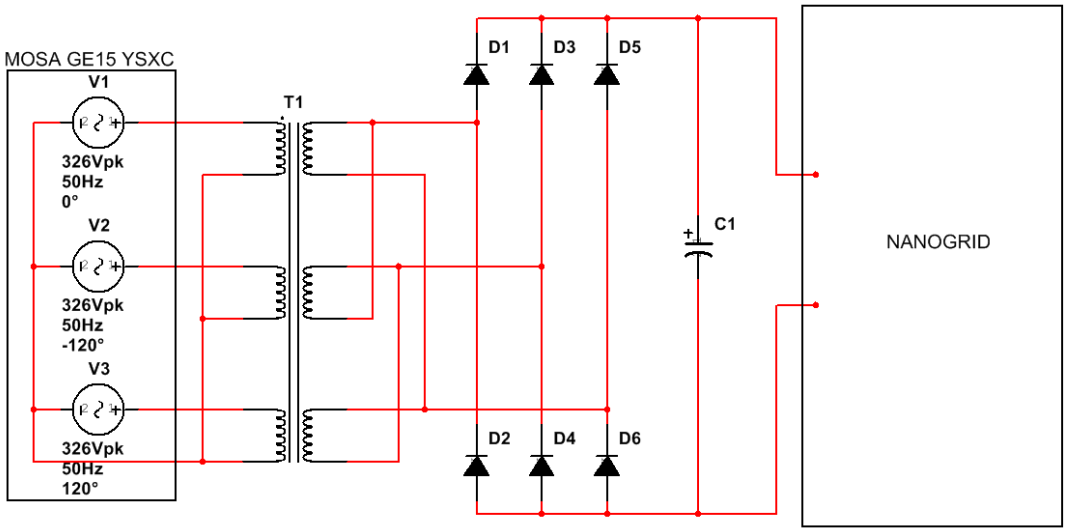


Figura 28 Schema di principio di interconnessione tra gruppo elettrogeno e nanogrid

Il trasformatore trifase, con rapporto di trasformazione 1:1, è collegato al gruppo elettrogeno in configurazione trifase con neutro (collegamento a stella), mentre il secondario è configurato a triangolo, secondo lo schema riportato nella Figura 28. In questo modo la tensione concatenata del secondario sarà pari a 230V. Pertanto, la tensione del secondario del trasformatore, raddrizzata mediante un ponte di diodi trifase e filtrata mediante un capacitore elettrolitico da 2,2mF/400V, sarà pari a circa 325V. Questa tensione continua rappresenta l'interfaccia alla nanogrid del gruppo elettrogeno. La nanogrid interfaccia il gruppo elettrogeno al suo DC bus mediante un apposito convertitore DC/DC integrato e controllato secondo la logica DBS progettata per la gestione dei flussi energetici della nanogrid stessa.

In Figura 29 è mostrato il set-up sperimentale con cui sono stati eseguiti i test per validare l'idea progettuale sopra descritta e verificare la corretta integrazione del gruppo elettrogeno con la nanogrid.

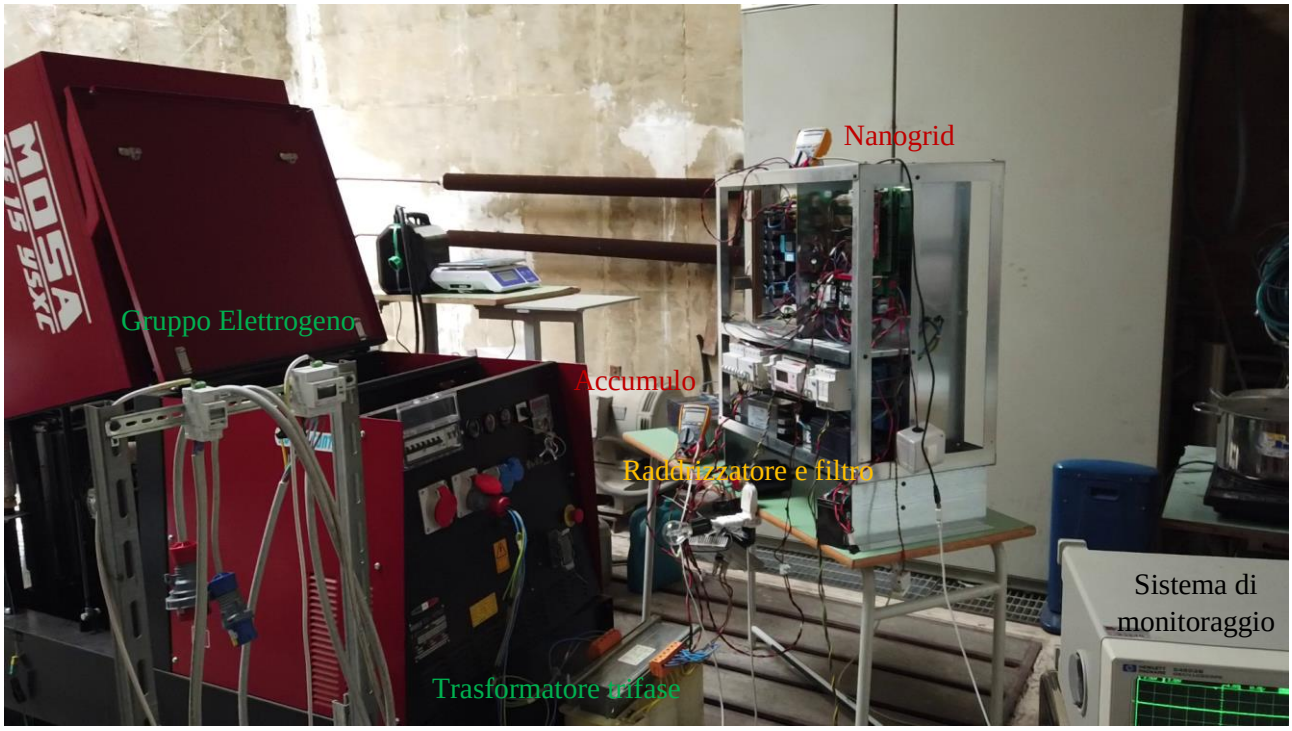


Figura 29 Set-up sperimentale per test funzionamento gruppo elettrogeno e nanogrid: con rete elettrica, accumulo al Pb, gruppo elettrogeno e carichi critici

Nella Figura 29 si possono individuare il gruppo elettrogeno a sinistra, in basso il trasformatore trifase con il raddrizzatore trifase e il filtro capacitivo subito sopra. Abbiamo poi l'accumulo elettrochimico al Piombo (Pb) ed il prototipo di nanogrid con cui sono stati eseguiti i test sperimentali. In fine, in basso a destra il sistema di monitoraggio con oscilloscopio e il sistema di acquisizione dati per la verifica del corretto funzionamento.

In Figura 30 è illustrata la configurazione della nanogrid che dovrebbe interfacciare il gruppo elettrogeno nel dimostratore. La configurazione prevede un'interfaccia con la rete elettrica, un convertitore per i carichi critici, un convertitore per gestire l'impianto fotovoltaico, un convertitore per interfacciare alla nanogrid un sistema di accumulo a Litio, un convertitore per interfacciare alla nanogrid il gruppo elettrogeno.

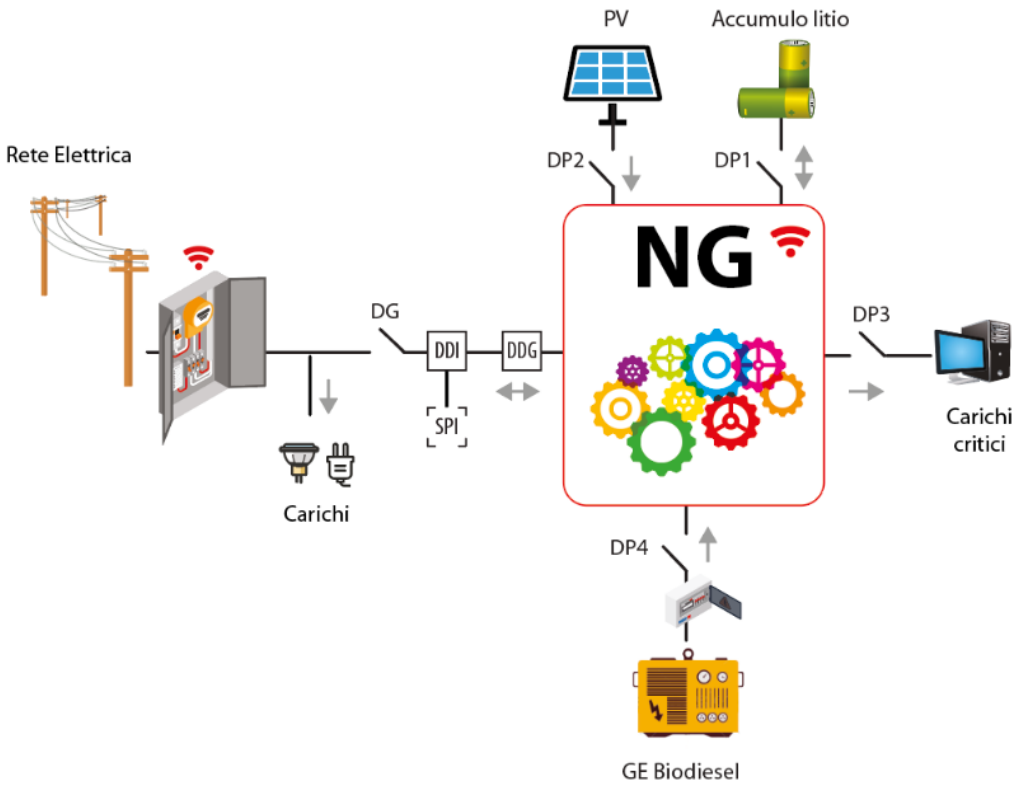


Figura 30 Configurazione di nanogrid con gruppo elettrogeno, sono presenti: la rete elettrica, un accumulo al Litio, il gruppo elettrogeno, i carichi critici e un impianto fotovoltaico

La configurazione di nanogrid con cui sono stati eseguiti i test rispecchia quella di Figura 30, eccetto che: per l'impianto fotovoltaico e l'accumulo al Lito (sostituito con quello al Pb), in quanto non erano presenti nella sala che ospitava il gruppo elettrogeno quando sono stati eseguiti i test. Si sottolinea che, l'assenza dell'impianto fotovoltaico non è determinante ai fini dei test, infatti il gruppo elettrogeno dovrebbe entrare in funzione quando l'impianto fotovoltaico non produce e l'accumulo elettrico è scarico.

4.2 Test condotti per la validazione dell'integrazione del Gruppo Elettrogeno con la Nanogrid

I test condotti per la verifica della corretta integrazione del gruppo elettrogeno con la nanogrid, sono stati suddivisi in fasi di seguito dettagliate. Ciascuna fase ha permesso di ridurre al minimo il rischio di errore e di individuare eventuali problematiche, senza arrecare danno alla nanogrid o al gruppo elettrogeno stesso.

Test eseguiti, e risultati ottenuti:

1. Avvio del solo gruppo elettrogeno e verifica carica capacitori dopo raddrizzatore trifase (nanogrid spenta)
    a. La tensione sui condensatori ha raggiunto un valore di 340V circa

2. Avviare nanogrid da rete con relè connessione gruppo elettrogeno non pilotabile, per verificare distacco resistore di precarica
    a. Dopo l'avvio nanogrid, il relè di precarica dei condensatori del gruppo elettrogeno è stato pilotato
3. Verificare eventuali problematiche
    a. Nessun problema riscontrato
4. Spegnere tutto e riavviare la nanogrid da rete
    a. Bus DC regolato dall'inverter di rete a Vref=380V
5. Collegare il sistema di accumulo
    a. Sistema di accumulo connesso alla nanogrid
6. Disconnettere la nanogrid da rete
    a. Il sistema di accumulo regola la tensione del DC bus
7. Avviare il gruppo elettrogeno
    a. Precarica capacitori gruppo elettrogeno
    b. Distacco resistore precarica
    c. Connessione gruppo elettrogeno alla nanogrid
    d. Batterie scariche
    e. Il convertitore del gruppo elettrogeno regola la tensione del DC bus al suo valore di riferimento di 370V
    f. La tensione sui condensatori dopo il raddrizzatore si abbassa leggermente da 340V a 335V
8. Collegare un carico
    a. Il gruppo elettrogeno mantiene attiva la nanogrid e continua a regolare la tensione del DC Bus a 370V
    b. La tensione sui condensatori dopo il raddrizzatore si abbassa leggermente da 335V a 330V
9. Collegare la nanogrid alla rete
    a. La tensione del DC Bus è regolata dall'inverter di rete alla Vref=380V, mentre il gruppo elettrogeno è connesso ma non operativo
    b. La tensione sui condensatori dopo il raddrizzatore si riporta a 340V
10. Impostare diversi set-point che impongono alla nanogrid l'immissione in rete, per far intervenire il gruppo elettrogeno

a. L'inverter di rete insegue il Set-Point, mentre il gruppo elettrogeno regola la tensione del DC Bus al valore di 370V
b. La tensione sui condensatori dopo il raddrizzatore si abbassa da 340V a 310V, quando l'immissione in rete arriva a 2kW, con una corrente prelevata dal gruppo elettrogeno di circa 4A.

Di seguito vengono forniti alcuni dati relativi ai test eseguiti, in particolare sono riportate le configurazioni dei test e le forme d'onda di tensione del DC bus, di tensione DC del raddrizzatore trifase del gruppo elettrogeno, di tensione AC di alimentazione dei carichi critici e tensione AC di rete, ricavati dal sistema di acquisizione utilizzato per il monitoraggio dei test eseguiti.

4.2.1 Test 1: avvio nanogrid

La configurazione di nanogrid testata è riportata in Figura 31. Sono presenti e connessi alla nanogrid: la rete, il gruppo elettrogeno, i carichi critici, ed un accumulo al Pb in sostituzione di quello al Litio, non disponibile; anche l'impianto fotovoltaico non è disponibile, quindi non è collegato.
Il test inizia con l'avvio della nanogrid da rete, il sistema di accumulo ed il gruppo elettrogeno sono connessi alla nanogrid, è presente anche un carico critico (una lampada da circa 200W), alimentato dal convertitore DC/AC dedicato.
In Figura 32 è riportata una foto del set-up sperimentale durante la fase di funzionamento, in cui la nanogrid è operativa, connessa alla rete, con gruppo elettrogeno connesso e carico critico alimentato.
Durante questo test, la tensione del DC bus della nanogrid è di 370V, regolata dall'inverter di interfaccia con la rete, mentre la tensione DC sui condensatori di filtro del raddrizzatore trifase che interfaccia il gruppo elettrogeno alla nanogrid è di 340V. Questi valori sono riscontrabili dalla Figura 33, che mostra, durante la fase di avvio della nanogrid, gli andamenti delle tensioni: del DC bus (blu), che aumenta gradualmente per permettere la precarica del DC bus; della rete (rosso); di alimentazione dei carichi critici (viola) che, si può osservare, aumenta gradualmente sino a raggiungere il valore nominale. In questo test dal gruppo elettrogeno non viene prelevata potenza.

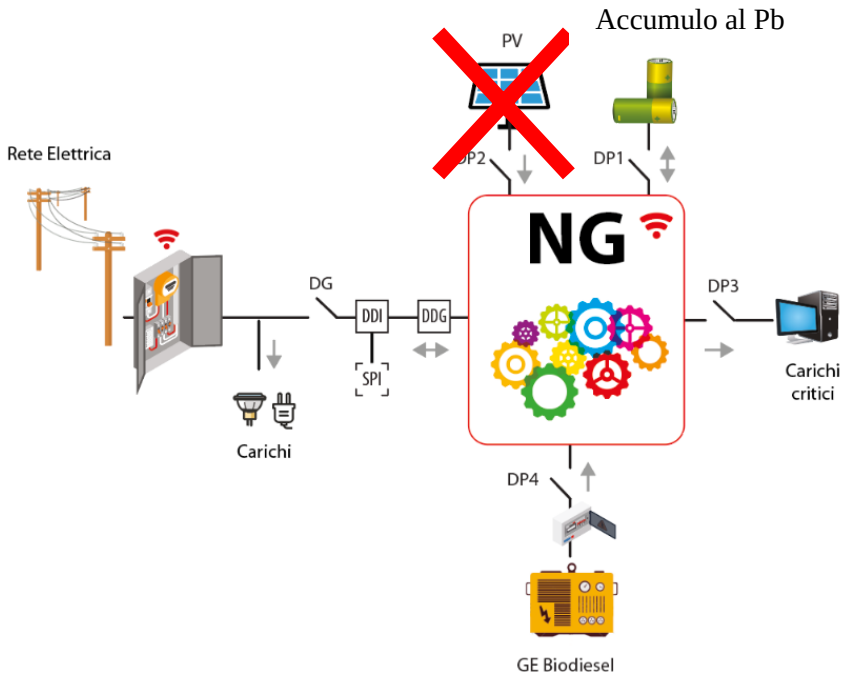


Figura 31 “Test 1 Avvio”: configurazione di test della nanogrid con gruppo elettrogeno, sono presenti: la rete elettrica, un accumulo al Pb, il gruppo elettrogeno e i carichi critici

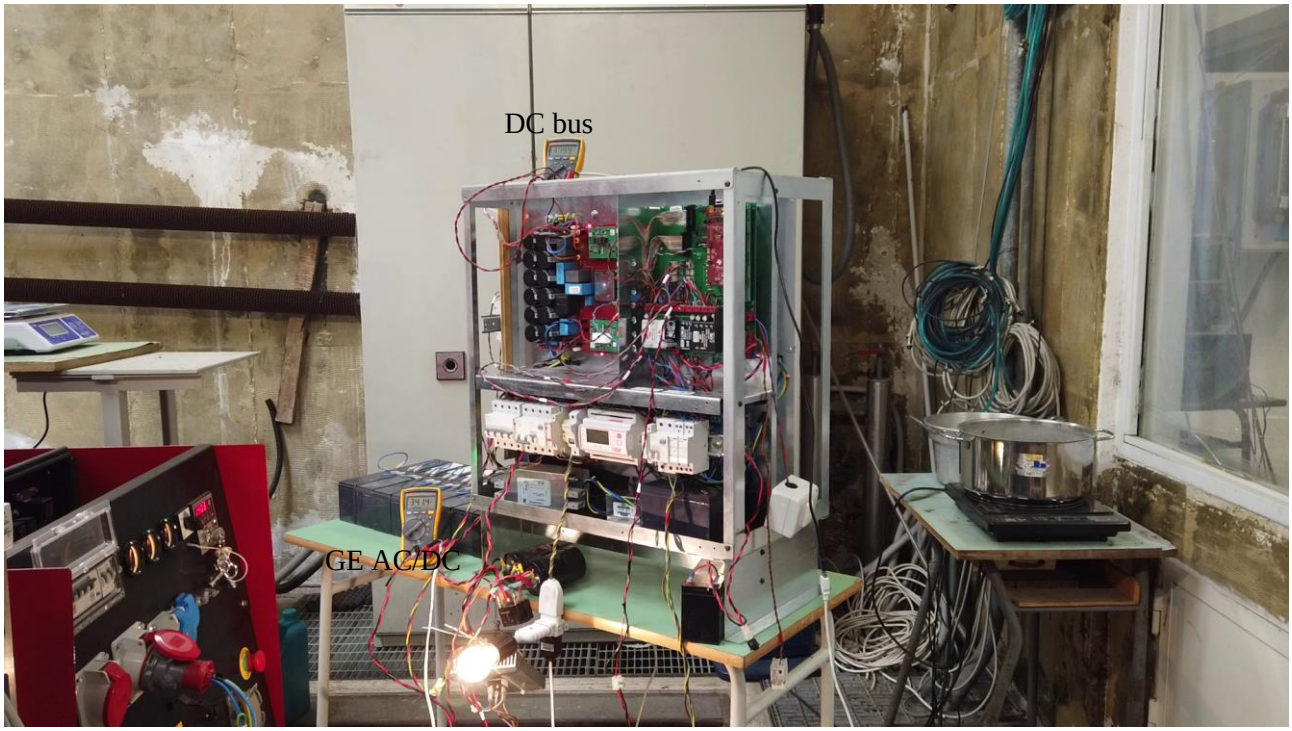


Figura 32 “Test 1 Avvio”: Nanogrid avviata con sistema di accumulo, rete e gruppo elettrogeno attivo, un carico è alimentato dall’inverter dedicato ai carichi critici

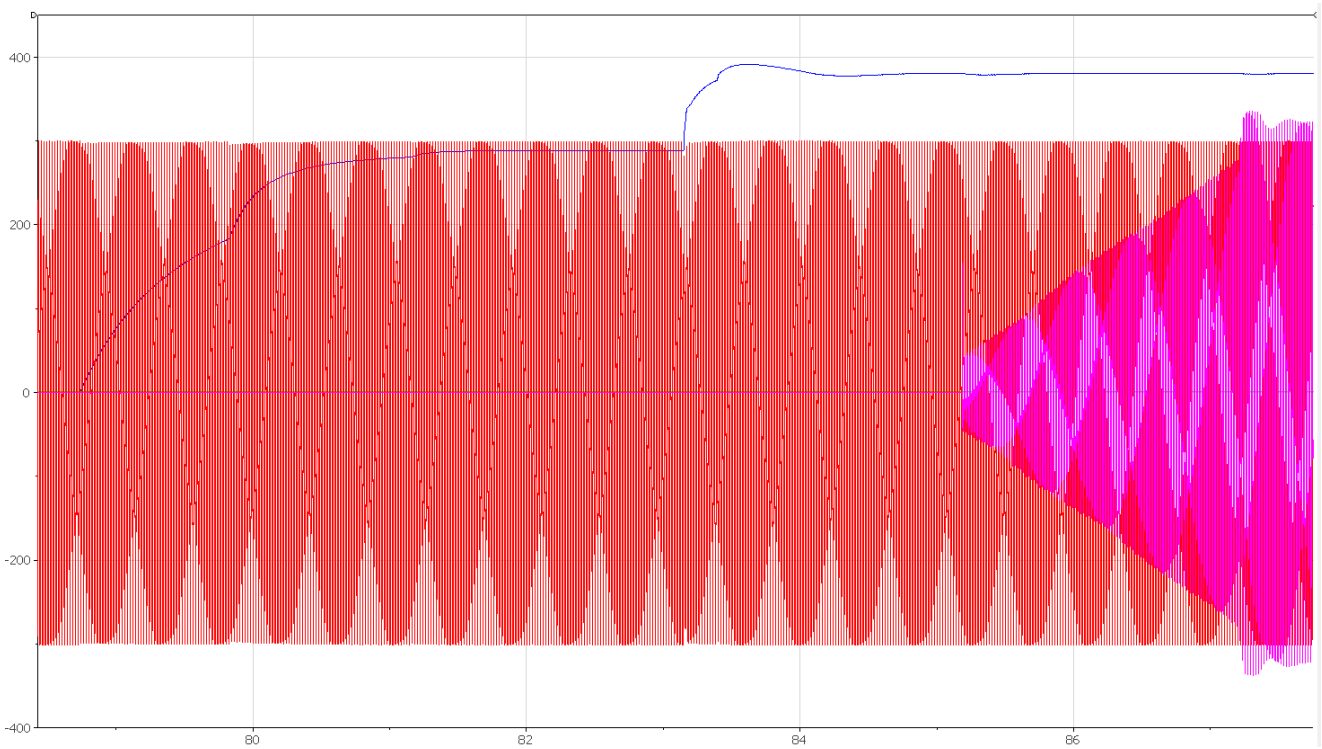


Figura 33 “Test 1 Avvio”: tensione del DC bus (blu), tensione di rete (rosso), tensione carichi critici (viola)

4.2.2 Test 2: disconnessione rete

In questo test, come si evince dalla Figura 34, partendo dalla configurazione precedente (Test 1), in cui la nanogrid è connessa alla rete, alimenta i carichi critici, ha il sistema di accumulo collegato, ma il SOC è basso e il gruppo elettrogeno è collegato, viene disconnessa la rete; quindi, la nanogrid impiega il gruppo elettrogeno per alimentare i carichi critici, preservando la carica residua del sistema di accumulo. Nella Figura 35 è riportata una foto del set-up sperimentale durante la fase di test, dove si può osservare la tensione sul raddrizzatore del gruppo elettrogeno (327V) e il DC bus a 370V. In Figura 36 sono invece riportate le acquisizioni e gli andamenti della tensione del DC bus (blu) che è regolata dal DC/DC che collega il gruppo elettrogeno alla nanogrid al valore di 370V, mentre la tensione raddrizzata sul filtro capacitivo del gruppo elettrogeno è pari a 327V (verde), viene riportata la tensione di rete (rosso) e la tensione di alimentazione dei carichi critici (viola), che dopo un breve transitorio, in seguito alla disconnessione della rete, si stabilizza attorno al valore nominale.

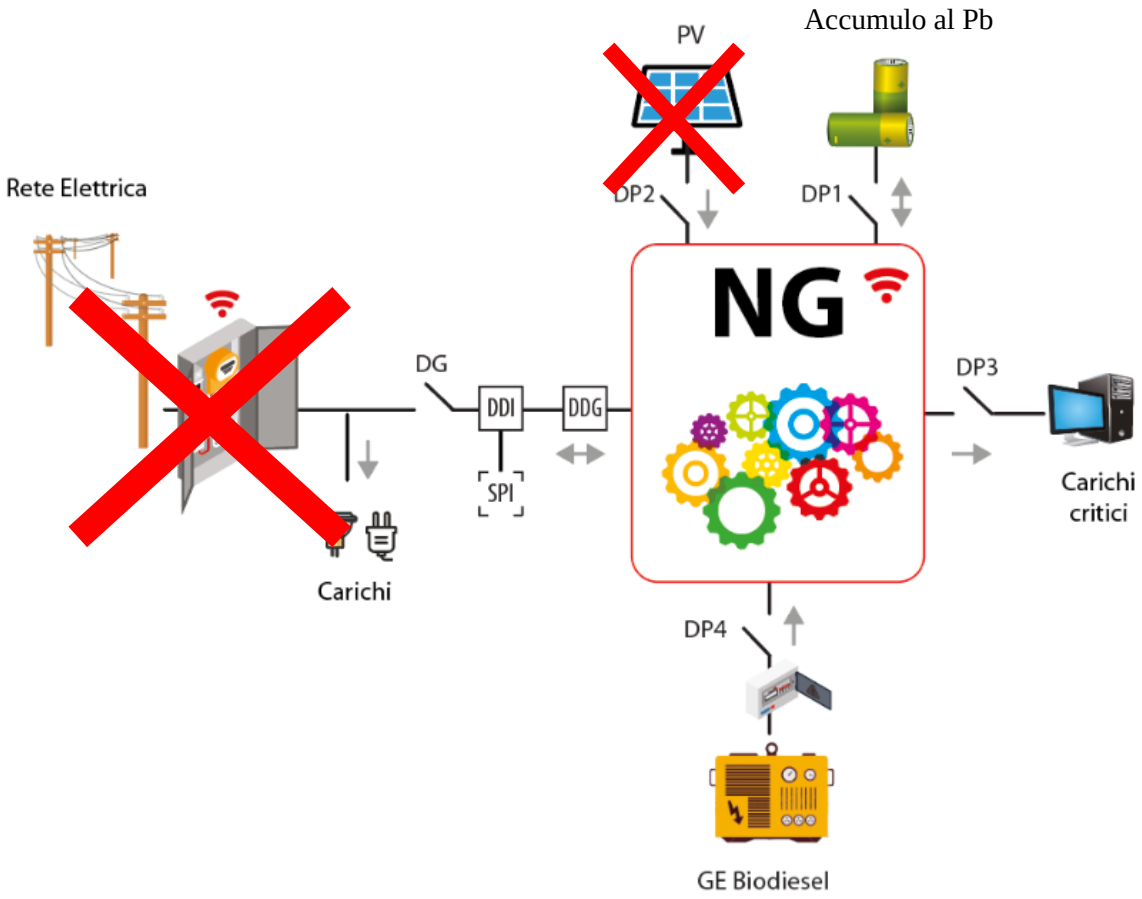


Figura 34 “Test 2 disconnessione rete”: test di disconnessione rete con gruppo elettrogeno, carichi critici e sistema di accumulo collegato

Figura 35 “Test 2 disconnessione rete”: disconnessione rete, intervento del gruppo elettrogeno per alimentare i carichi critici

Figura 36 “Test 2 disconnessione rete”: tensione del DC bus (blu), tensione sul condensatore del raddrizzatore gruppo elettrogeno (verde), tensione di rete (rosso) e tensione sui carichi critici (viola)

4.2.3 Test 3: disconnessione gruppo elettrogeno

In questo test si è simulato lo spegnimento del gruppo elettrogeno, in assenza di rete, con carico critico alimentato, in assenza di produzione da fotovoltaico. Quindi a partire dalla precedente configurazione (Test 2), viene disconnesso il gruppo elettrogeno; quindi, il carico viene alimentato dal sistema di accumulo, come schematizzato in Figura 37.

Nella Figura 38 è mostrato il set-up sperimentale durante il test 3, il gruppo elettrogeno viene disconnesso, il carico critico continua ad essere alimentato dal sistema di accumulo.

In Figura 39 sono mostrate: la tensione del DC bus (blu) regolata dal DC/DC del sistema di accumulo al valore di 365V; la tensione raddrizzata sul filtro capacitivo del gruppo elettrogeno che scende dai 325V fino a 20V per effetto della scarica dei condensatori dovuta alla disconnessione del gruppo stesso (verde); la tensione di alimentazione dei carichi critici (viola) che si mantiene costante, intorno al valore nominale, in seguito alla disconnessione del gruppo elettrogeno. La tensione di rete è nulla, poiché era stata precedentemente disconnessa.

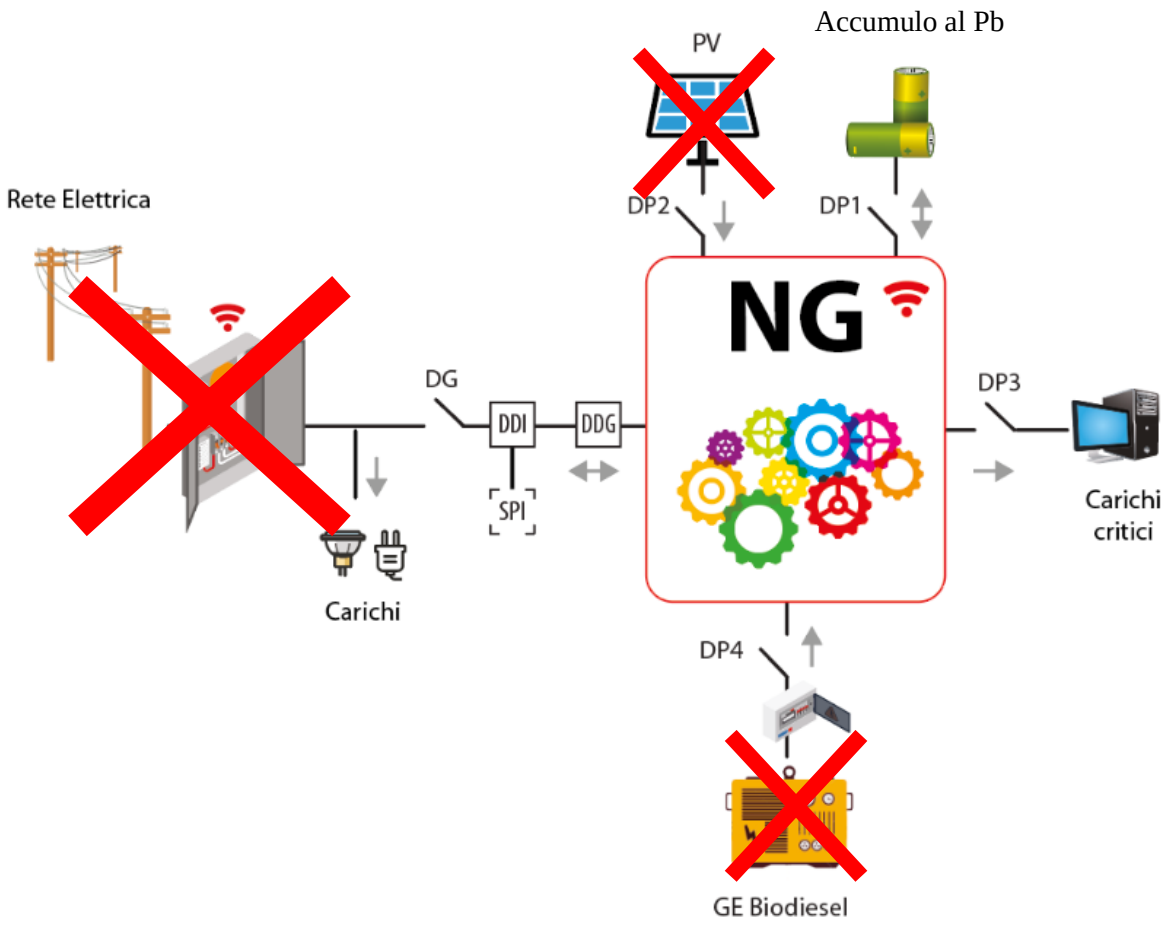


Figura 37 “Test 3 disconnessione gruppo elettrogeno”: test di disconnessione gruppo elettrogeno nella condizione di carichi critici alimentati e sistema di accumulo collegato

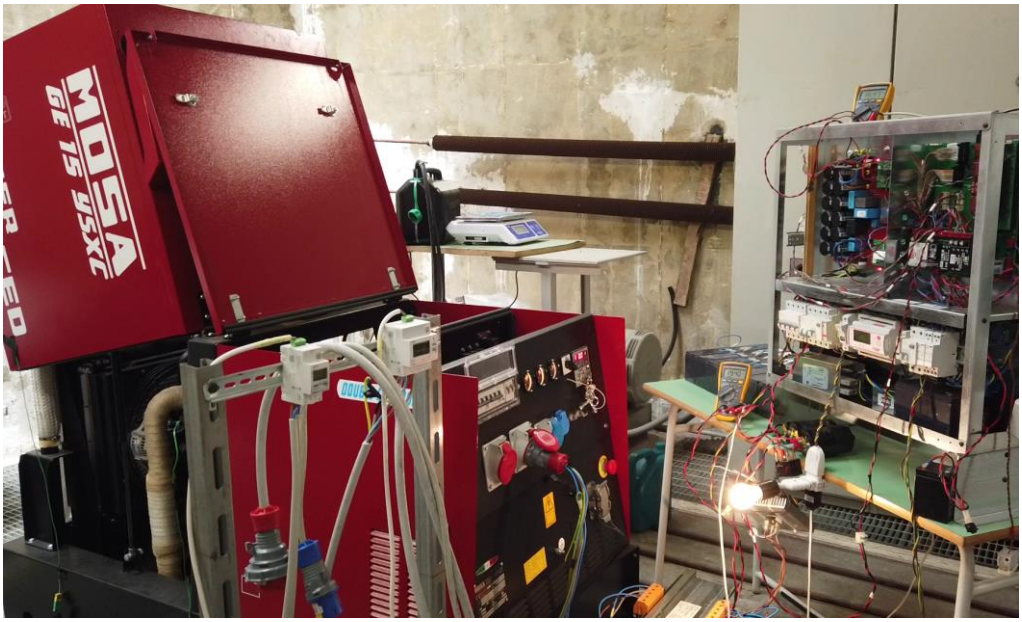


Figura 38 “Test 3 disconnessione gruppo elettrogeno”: distacco gruppo elettrogeno con rete scollegata e intervento del sistema di accumulo

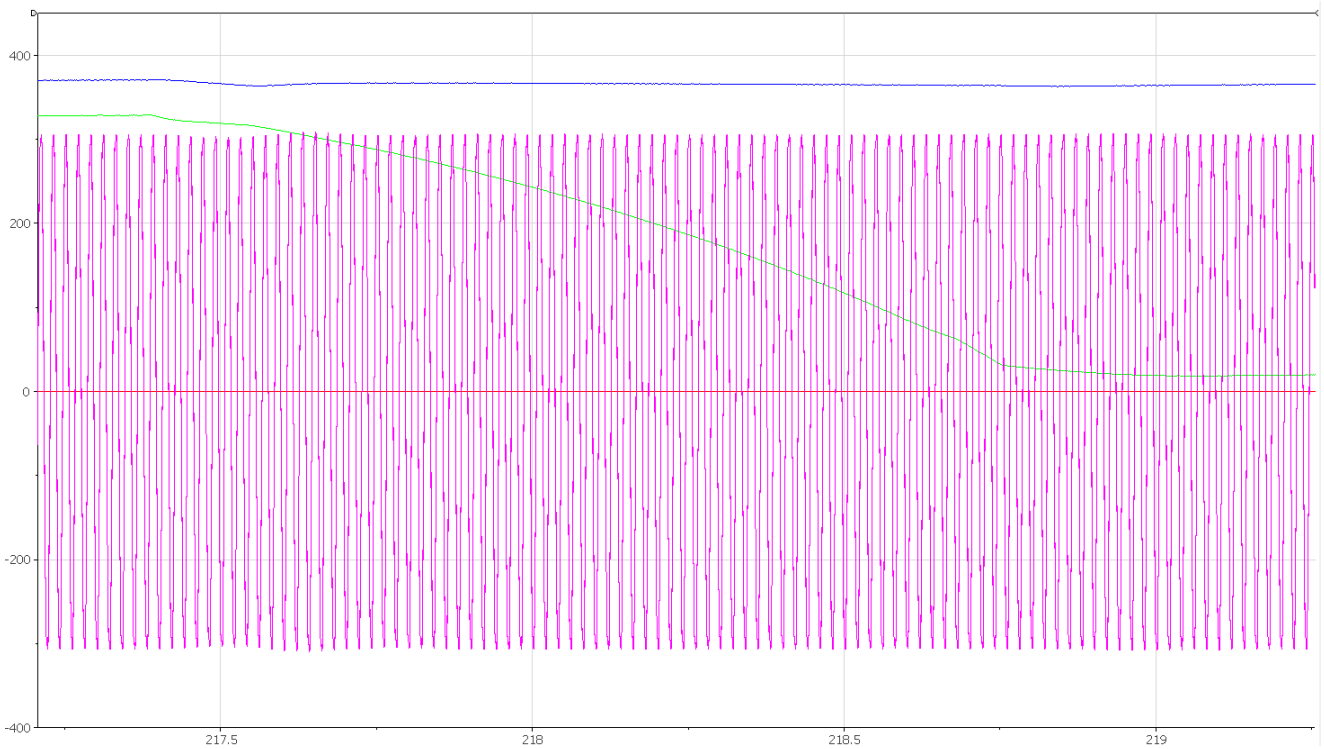


Figura 39 "Test 3 disconnessione gruppo elettrogeno": tensione del DC bus (blu), tensione sul condensatore del raddrizzatore gruppo elettrogeno (verde) e tensione sui carichi critici (viola)

4.2.4 Test 4: Set-point

In questo test, a partire dalla configurazione del test 3, si è riconnesso il gruppo elettrogeno e la rete elettrica alla nanogrid; quindi, con la configurazione riportata in Figura 40, viene inviato un set-point all'inverter di interfaccia tra rete e nanogrid. Il set-point inviato, richiede di immettere in rete una data potenza. Poiché le batterie hanno un SOC basso ed è presente il gruppo elettrogeno, allora è questo che interverrà per fornire la potenza richiesta dal set-point inviato ed immetterà in rete la Pset-point (2kW). In Figura 41 sono mostrate: la tensione del DC bus (blu) regolata dal DC/DC che collega il gruppo elettrogeno alla nanogrid al valore di 370V; la tensione raddrizzata sul filtro capacitivo del gruppo elettrogeno che scende da 340V a circa 310V (verde) per effetto della richiesta di immissione in rete della Pset-point di 2kW; la tensione di alimentazione dei carichi critici (viola) che si mantiene costante, intorno al valore nominale, in seguito alla richiesta del set-point; la tensione di rete (rosso).

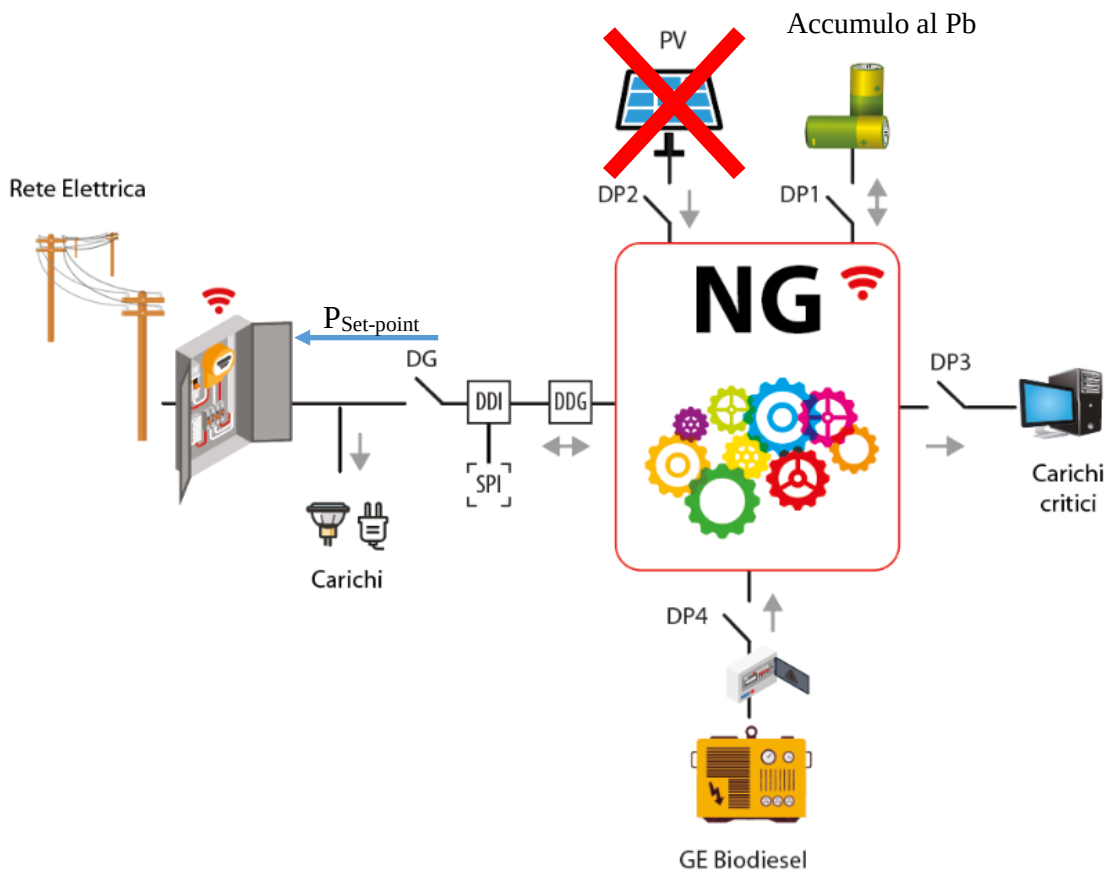


Figura 40 “Test 4 Set-point”: Invio set-point alla nanogrid, con rete e gruppo elettrogeno connessi

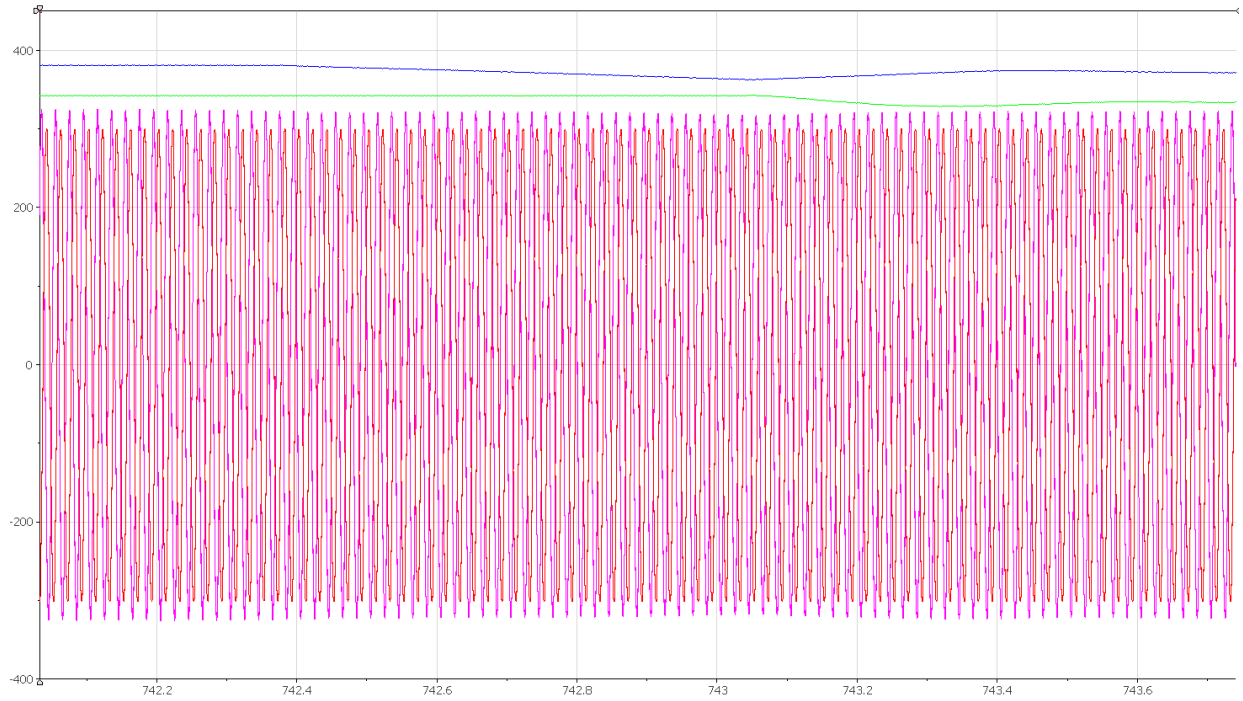


Figura 41 “Test 4 Set-point”: tensione del DC bus (blu), tensione sul condensatore del raddrizzatore gruppo elettrogeno (verde), tensione sui carichi critici (viola) e tensione di rete (rosso)

5. CONCLUSIONI

L'attività svolta ha portato alla definizione, per come previsto in progetto, al prototipo di una unità CHP alimentata da Biodiesel e interfacciata alla rete e gestita tramite Nanogrid adottata nella configurazione NG8 per come definita nell'attività A4.1, dove vi è la presenza contemporanea degli accumuli convenzionali litio e l'accumulo non convenzionale a biodiesel oltre al generatore fotovoltaico e carichi critici. Tale prototipo sarà integrato nel dimostratore oggetto dell' attività dell'OR7.

BIBLIOGRAFIA

[1] P. McCarthy, M.G. Rasul, S. Moazzem, Analysis *and comparison of performance and emissions of an internal combustion engine fuelled with petroleum diesel and different bio-diesel*, Fuel, 90 (6), 2011, pp. 2147-2157.
[2] O. Özener, L. Yüksek, A. T. Ergenç, M. Özkan, *Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics*, Fuel, 115, 2014, pp. 875-883.
[3] P. Ndayishimiye, M. Tazerout, *Use of palm oil-based biofuel in the internal combustion engines: Performance and emissions characteristics*, Energy, 36 (3), 2011, pp. 1790-1796
[4] E. Ozturk, *Performance, emissions, combustion and injection characteristics of a diesel engine fuelled with canola oil-hazelnut soapstock biodiesel mixture*, Fuel Processing Technology, 129, 2015, pp.183-91.
[5] S. Lahane, K.A. *Subramanian, Effect of different percentages of biodiesel–diesel blends on injection, spray, combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine*, Fuel, 139, 2015, pp. 537-545.
[6] H. A. Rosa, W. T. Wazilewski. D. Secco, L. I. Chaves, G. Veloso, S. N. M. de Souza, M. J. da Silva, R. F. Santos, *Biodiesel produced from crambe oil in Brazil - A study of performance and emissions in a diesel cycle engine generator, Renewable and Sustainable* Energy, 38, 2014, pp. 651-655.
[7] R. G. Pereira, C. D. Oliveira, J. L. Oliveira, P. C. P. Oliveira, C. E. Fellows, O. E. Piamba, *Exhaust emissions and electric energy generation in a stationary engine using blends of diesel and soybean biodiesel*, Renewable Energy, 32 (14), 2017, pp. 2453-2460.
[8] Z. H. Zhang, R.Balasubramanian, *Influence of butanol addition to diesel–biodiesel blend on engine performance and particulate emissions of a stationary diesel engine*, Applied Energy, 119, 2014, pp. 530-536.
[9] S. Saravanan, G. Nagarajan, G. L. N. Rao, S. Sampath, *Combustion characteristics of a stationary diesel engine fuelled with a blend of crude rice bran oil methyl ester and diesel*, Energy, 35 (1), 2010, pp, 94-100.
[10] A. Serdari, K. Fragioudakis , S. Kalligeros , S. Stournas , E. Lois, *Impact of Using Biodiesels of Different Origin and Additives on the Performance of a Stationary Diesel Engine*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 122 (4), 2000, pp. 624-631.
[11] S. Imran, D. R. Emberson, D. S. Wen, A. Diez, R. J. Crookes, T. Korakianitis, *Performance and specific emissions contours of a diesel and RME fuelled compression-ignition engine throughout its operating speed and power range*, Applied Energy, 111, 2013, pp. 771-777.
[12] S. Oberweis, T.T Al-Shemmerim, *Effect of Biodiesel blending on emissions and efficiency in a stationary diesel engine, International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Spain, 2010.
[13] C. Caligiuri, M. Renzi, M. Bietresato, M. Baratieri, *Experimental investigation on the effects of bioethanol addition in diesel biodiesel blends on emissions and performances of a micro-cogeneration system*, Energy Conversion and Management, 185, 2019, pp. 55-65.
[14] A. Magno, E. Mancaruso, B. M. Vaglieco, *Effects of a biodiesel blend on energy distribution and exhaust emissions of a small CI engine, Energy Conversion and Management*, 96, 2015, pp. 72-80.

[15] K. K. Khatri, D. Sharma, S.L. Soni, D. Tanwar, *Experimental investigation of CI engine operated Micro-Trigeneration system, Applied Thermal Engineering*, 30 (11-12), 2010, pp. 1505-1509.
[16] D.H. Qi, H. Chen, L.M. Geng, Y. ZH. Bian, *Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel/diesel blends*. Energy Conversion and Management, 51,2010, pp. 2985:2992.
[17] S., Saravanan,; G., Nagarajan,; G. L., Narayana Rao, S., Sampath, *Combustion Characteristics of a Stationary Diesel Engine Fuelled with a Blend of Crude Rice Bran Oil Methyl Ester and Diesel*. Energy 2010, 35, pp. 94–100.
[18] S., Saravanan, G., Nagarajan, G.L, Narayana Rao,. *Feasibility Analysis of Crude Rice Bran Oil Methyl Ester Blend as a Stationary and Automotive Diesel Engine Fuel*. Energy for Sustainable Development 2009, 13, pp. 52–55.
[19] Cogengreen EcoGEN CHP Units Available online: www.cogengreen.com (accessed on 10 November 2020).
[20] Senertec Dachs. Smart Cogeneration Available online: www.senertec.com (accessed on 10 November 2020).
[21] F. Betz, D., Archer, *Biodiesel Fueled Engine Generator With Heat Recovery: Comparing Biodiesel to Diesel Performance.* In Proceedings of the ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability, Volume 2; ASMEDC: San Francisco, California, USA, January 1 2009; pp. 103–108.
[22] A. Algieri, P. Morrone, D. Perrone, S. Bova, T. Castiglione, Analysis of multi-source energy systems for small-scale domestic applications. Integration of biodiesel, solar and wind energy. *Energy Reports.* https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.09.045.
[23] P. Morrone, A. Algieri, S. Bova, Investigation of the Energy Performance of Multi-Source Integrated CHP Systems for Small-Scale Applications. Proceedings of “74° Congresso Nazionale ATI”, Modena, 11-13 Settembre 2019.