

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Descrizione, analisi dei consumi e progettazione del sistema di generazione di calore di un impianto di trattamento F.O.R.S.U. per la produzione di Biometano



**Politecnico
di Torino**

Anno Accademico 2021/2022

Relatore:

Prof. Ing. Marco Carlo Masoero

Candidato:

Grosso Andrea

Sommario

ABSTRACT	2
ABSTRACT	4
1. INTRODUZIONE.....	5
2. F.O.R.S.U. E BIOMETANO	11
2.1 F.O.R.S.U.....	11
2.2 BIOMETANO	15
2.3 PROCESSO DI DIGESTIONE ANAEROBICA	16
2.4 PROCESSO DI COMPOSTAGGIO O DIGESTIONE AEROBICA.....	19
3. L'IMPIANTO DI FERPLANT.....	23
3.1 DATI GENERALI	23
3.1.1 LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO	23
3.1.2 POTENZIALITA'	24
3.1.3 TIPOLOGIA DI RIFIUTI TRATTATI	25
3.1.4 SUDDIVISIONE IN ZONE FUNZIONALI	27
3.1.5 OPERE ARCHITETTONICHE	28
3.2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO.....	29
3.2.1 SEZIONE DI RICEZIONE E PRETRATTAMENTO.....	29
3.2.2 SEZIONE DI DIGESTIONE ANAEROBICA.....	32
3.2.3 SEZIONE DI COMPOSTAGGIO.....	36
3.2.4 PURIFICAZIONE DEL BIOGAS, UPGRADING E RECUPERO CO ₂	44
4. FABBISOGNI ENERGETICI.....	54
4.1 FABBISOGNI TERMICI	54
4.1.1 DIGESTORE ANAEROBICO	54
4.1.2 PALAZZINA UFFICI	57
4.2 FABBISOGNI ELETTRICI	62
4.3 CENTRALE TERMICA: 3 LAYOUT CONSIDERATI.....	66
4.3.1 LAYOUT 1	69
4.3.2 LAYOUT 2	71
4.3.3 LAYOUT 3	72
4.4 CONFRONTO ECONOMICO.....	73
5. PROGETTAZIONE DELLA CENTRALE TERMICA.....	75
5.1 INDIVIDUAZIONE DELLO SPAZIO ADIBITO.....	75
5.2 DIMENSIONAMENTO RETE IDRAULICA	76
5.2.1 SCELTE PROGETTUALI	76

5.2.2	DA GENERATORI DI CALORE A SCAMBIATORI	79
5.2.3	DA SCAMBIATORI AD ACCUMULI TERMICI	80
5.2.4	DA ACCUMULI TERMICI A COLLETTORI E TERMINALI.....	80
5.3	DIMENSIONAMENTO E IDENTIFICAZIONE DEI DISPOSITIVI SECONDARI	84
5.3.1	POMPE	84
5.3.2	ACCUMULI TERMICI	86
5.3.3	KIT INAIL.....	86
5.3.4	VALVOLE DI SICUREZZA.....	87
5.3.5	VASI D'ESPANSIONE.....	89
5.3.6	LINEA DI CONSEGNA DEL GAS.....	90
5.3.7	LINEA DI SCARICO DEI FUMI	90
5.3.8	DEFANGATORI E FILTRI A Y	91
6.	CONCLUSIONI	92
	BIBLIOGRAFIA	94

ABSTRACT

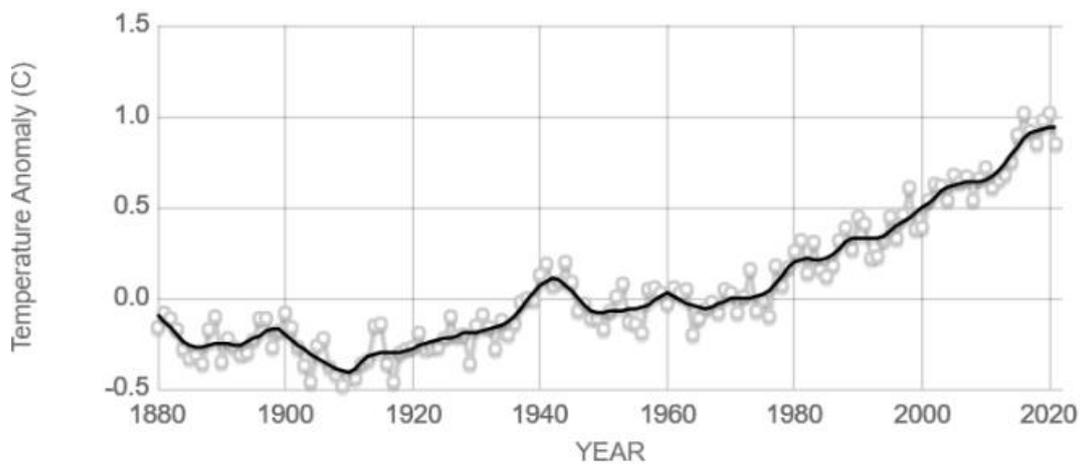
Il contenuto del presente elaborato è legato alle tematiche relative al biometano e al progetto che la società Ferplant S.r.l. ha attualmente in cantiere. Si tratta di un impianto che, partendo dalla frazione organica della raccolta differenziata (FORSU), produrrà biometano e compost rispettivamente da processi di digestione anaerobica e digestione aerobica. Il tema appena citato risulta essere un argomento di grande attualità, visto quanto indicato nel piano di ripresa e resilienza pubblicato nel corso del 2021, e visti gli obiettivi europei legati alla progressiva decarbonizzazione dell'Unione entro il 2050. Oltre a questo, il prodotto di Ferplant costituirebbe un'aggiunta importante alla limitata capacità di valorizzazione dei rifiuti organici della provincia di Torino, contribuendo ad aggiungere un importante tassello verso l'indipendenza legata alla gestione territoriale dei rifiuti. La prima parte di questo lavoro cerca di chiarire il ruolo tutt'altro che trascurabile del biometano nello scenario internazionale odierno e futuro. Riconosciuto una fonte energetica rinnovabile, rappresenta un grande alleato contro quella che viene ormai ritenuta la più grande sfida del nostro tempo: la lotta ai cambiamenti climatici. Risulta inoltre essere un protagonista fondamentale per il raggiungimento di una società basata sulla cosiddetta "Economia Circolare", altro grande argomento di interesse degli ultimi anni. Successivamente l'attenzione viene posta sulla descrizione del processo che porta alla formazione del biometano, oltre che sulla descrizione tecnica dell'impianto di Ferplant. Nella seconda sezione dell'elaborato viene invece illustrato parte del lavoro effettuato nei mesi passati in azienda e del contributo dato al completamento della fase di progettazione. È stato chiarito e quantificato il fabbisogno termico dell'impianto, con l'obiettivo finale di analizzare tre diversi layout della centrale termica attraverso il dimensionamento di un possibile cogeneratore e lo svolgimento di un'analisi termo-economica. Infine, i risultati ottenuti e la configurazione scelta sono stati utilizzati per dimensionare l'impianto idronico.

ABSTRACT

The content of this study is linked to the issues relating to biomethane and to the project that the company Ferplant S.r.l. currently has in the pipeline. It is a plant which, starting from the organic fraction of separate waste collection, will produce biomethane and compost respectively from anaerobic digestion and aerobic digestion processes. The topic just mentioned appears to be very actual, according to the major points highlighted in the recovery and resilience plan published during 2021, and to the European targets linked to the progressive decarbonisation of the Union by 2050. In addition to these facts, the product of Ferplant would have an important role on Turin provincial territory, because of the limited capacity of valorising the organic waste nowadays. This plant would help to add an important step towards independence linked to territorial waste management. The first part of this work tries to clarify the far from negligible role of biomethane in the present and future international scenario. Recognized as a renewable energy source, it represents a great ally against what is now considered the greatest challenge of our time: the fight against climate change. It also appears to be a key player in achieving a society based on the so-called "Circular Economy", another major topic of interest in recent years. Attention is then placed on the description of the process that leads to the formation of biomethane, as well as on the technical description of the Ferplant's plant. In the second section of the report, on the other hand, part of the work carried out in the past months in the company and the contribution given to the completion of the design phase are illustrated. The heat requirement of the plant was clarified and quantified, with the ultimate goal of analyzing three different layouts of the thermal power plant through the sizing of a possible cogenerator and carrying out a thermo-economic analysis. Finally, the results obtained and the chosen configuration were used to design the hydronic system.

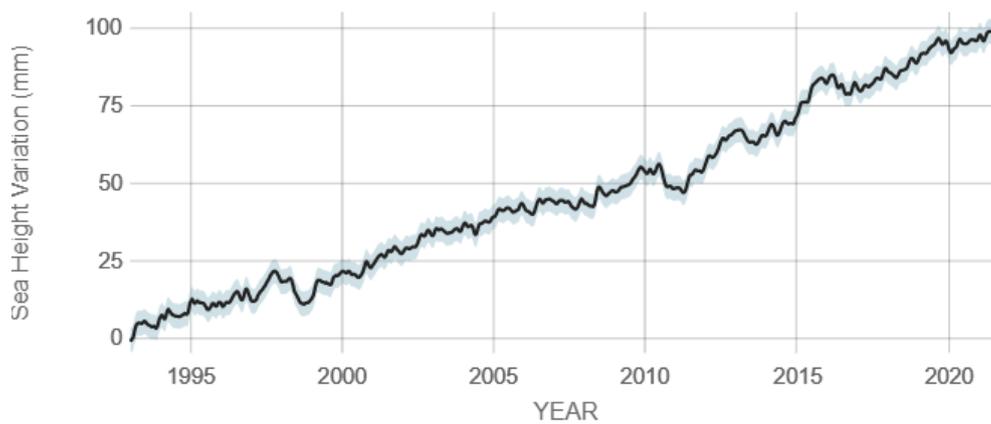
1. INTRODUZIONE

I numerosi studi scientifici condotti negli ultimi anni hanno dimostrato in maniera oggettiva come il cambiamento climatico sia in corso: la temperatura media del pianeta è aumentata di circa 1,1 °C in media dal 1880 con forti picchi in alcune aree (nell'ultimo secolo al Polo Nord è stato registrato un aumento di +5 °C), accelerando importanti trasformazioni dell'ecosistema (come ad esempio lo scioglimento dei ghiacci, l'innalzamento e l'acidificazione degli oceani, la perdita di biodiversità, la desertificazione) e rendendo fenomeni estremi sempre più frequenti e di maggiore intensità.



Source: climate.nasa.gov

Figura 1 – Trend della variazione della temperatura media globale dal 1880 al 2020 (Fonte: climate.nasa.gov);



Source: climate.nasa.gov

Figura 2 – Trend della variazione del livello degli oceani dal 1990 al 2020 (Fonte: climate.nasa.gov);

Un terzo dei raggi solari ricevuti dal pianeta Terra è riflesso nell'atmosfera sotto forma di radiazione infrarossa, mentre i restanti due terzi vengono assorbiti dagli oceani e dal suolo. I gas naturalmente presenti nell'atmosfera come l'ozono, il vapore acqueo, il protossido d'azoto, il metano o l'anidride carbonica, impediscono che parte di queste radiazioni fuoriescano nello spazio e le restituiscono

alla terra, riscaldandola. Questo è l'effetto serra, fenomeno naturale che permette di avere una temperatura media sul pianeta di 15°C agendo da regolatore climatico. Infatti, in assenza di questo fenomeno la temperatura media superficiale della Terra sarebbe pari a -18°C, rendendo il nostro pianeta un luogo ostile. Dalla prima rivoluzione industriale l'uomo continua a modificare questo equilibrio naturale immettendo in atmosfera enormi quantità di gas serra, prime tra tutti la CO₂ (77%) derivante dalla combustione di combustibili fossili. Senza trascurare le emissioni di metano, provenienti da agricoltura ed allevamenti intensivi, oltre che dalle discariche a cielo aperto^[1].

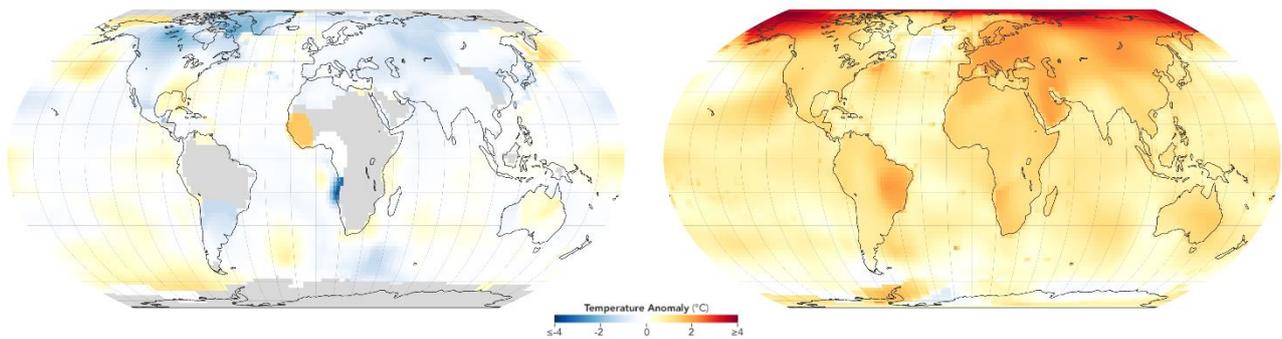


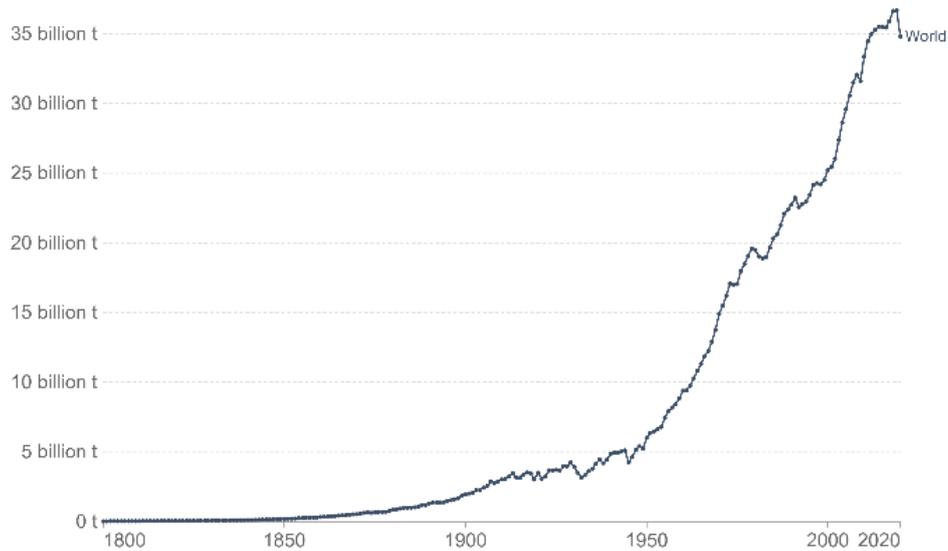
Figura 3 – Variazione relativa della temperatura media globale, 1880-1884 vs 2015-2019 (Fonte: World of change, NASA);

Il report di sintesi legato allo studio “Climate Change 2014”^[2] del corpo delle Nazioni Unite sulla valutazione dei cambiamenti climatici, chiamato Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), conferma che l’influenza dell’attività umana sui cambiamenti climatici è chiara e non accenna ad arrestarsi, provocando e/o promuovendo i fenomeni sopra citati. Molte delle osservazioni effettuate dal 1950 fino ad oggi, non sono mai state registrate nel corso degli ultimi millenni. Secondo quanto riportato da IPCC, oggi c’è la certezza al 95% che l’attività antropica sia la causa dei cambiamenti climatici. Per arrivare ad ottenere la stabilizzazione dell’aumento di temperatura al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali è ormai chiara la necessità di invertire la rotta quanto prima, per limitare il più possibile il peggioramento della situazione su scala globale e per non dover affrontare sfide tecnologiche, economiche, sociali ed istituzionali di un maggiore grado di difficoltà e necessità di risorse in futuro.

Per riuscire in questo intento è di fondamentale importanza una radicale transizione ecologica verso la completa neutralità climatica e lo sviluppo ambientale sostenibile: è stimato che in mancanza di un abbattimento sostanziale dei gas clima-alteranti, la temperatura globale raggiungerà e supererà i +3/4 °C rispetto ai livelli preindustriali prima della fine del secolo, causando irreversibili e catastrofici cambiamenti del nostro ecosistema, oltre che rilevanti impatti socioeconomici.

Annual CO₂ emissions

Carbon dioxide (CO₂) emissions from the burning of fossil fuels for energy and cement production. Land use change is not included.



Source: Global Carbon Project

OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions/ • CC BY

Figura 4 – Andamento delle emissioni globali annuali di CO₂ dal 1800 al 2020 (Fonte: Our World in Data);

La proposta avanzata dalla commissione europea (Agenda 2030) prevede di tagliare le emissioni di gas serra almeno del 55% (rispetto ai livelli del 1990) entro il 2030^[3]. Questo obiettivo è incluso in quello che è chiamato “Green Deal Europeo”, il quale ne risulta parte integrante vista la proposta di un piano d’azione per perseguire nel modo più responsabile gli obiettivi fissati. Il Green Deal risulta inoltre perfettamente in linea con gli obiettivi definiti a livello internazionale negli accordi di Parigi del 2015: contenere l’aumento della temperatura media globale sotto i 2°C, impegnandosi a non superare il livello di +1,5°C.

I principali obiettivi che l’Europa punta a raggiungere entro il 2030 sono molto ambiziosi:

- Raggiungimento della quota di fonti rinnovabili complessivamente del 32%;
- Aumento del 1,5% all’anno della quota di fonti rinnovabili negli impieghi per il riscaldamento/raffrescamento in tutti i settori di utenza;
- Raggiungimento della quota pari al 14% di fonti rinnovabili nei trasporti;
- Dare priorità all’efficienza energetica e all’autoconsumo;

Questi limiti sono un passo importante verso il raggiungimento progressivo della neutralità climatica dell’intero continente europeo, pianificata entro il 2050, vero e proprio obiettivo finale del Green Deal. Il risultato sarà quello di trasformare l’UE in una società giusta e prospera, dotata di un’economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse ed allo stesso tempo competitiva, che nel 2050 non genererà emissioni nette di gas a effetto serra e in cui la crescita economica sarà dissociata dall’uso delle risorse^[4].

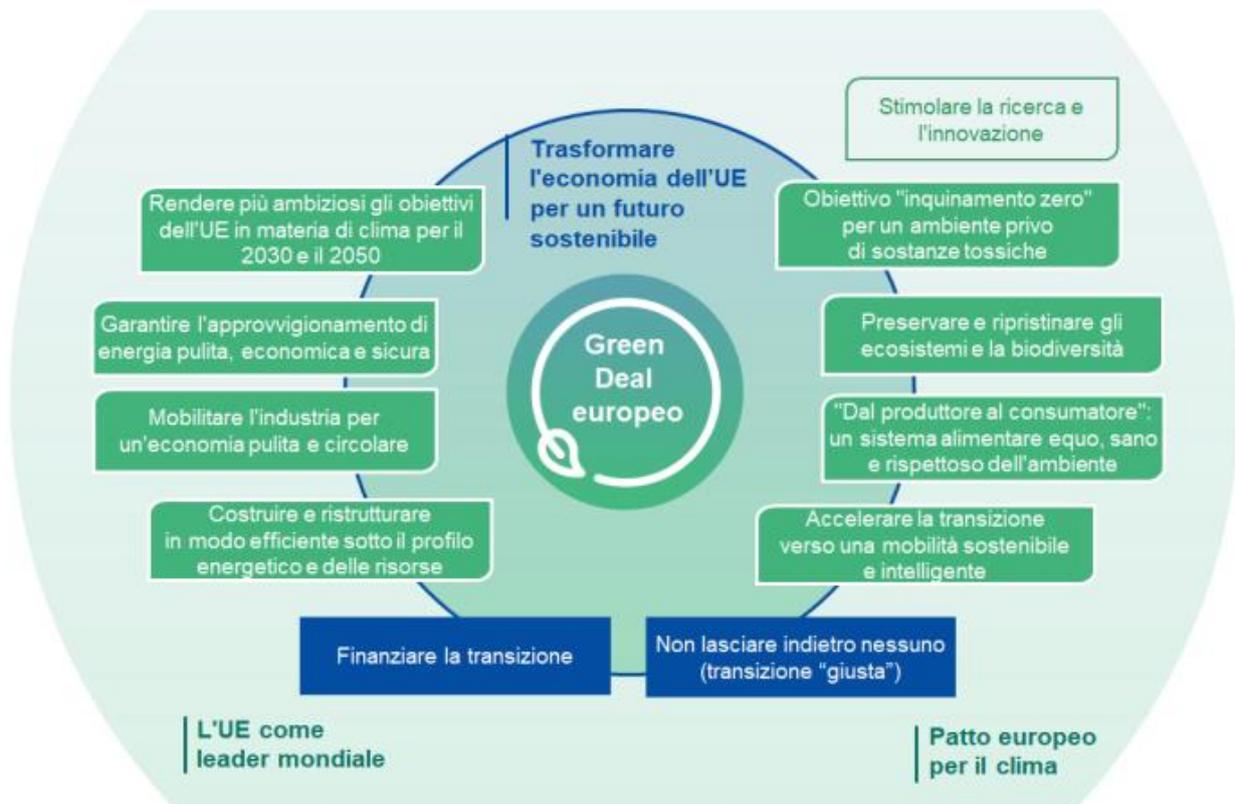


Figura 5 – Punti chiave alla base del Green Deal europeo (Fonte: Green Deal europeo);

Il NextGenerationEU (NGEU), fondo dal valore di 750 miliardi di euro approvato nel luglio 2020 dal Consiglio Europeo al fine di sostenere gli Stati membri colpiti dalla pandemia di Covid-19, ha tra i suoi punti fondamentali quello di favorire la denominata "Rivoluzione verde e transizione ecologica". Questo pilastro del NGEU deriva direttamente dal Green Deal e dai duplici obiettivi fissati per il 2030 e il 2050. Il regolamento del NGEU prevede che un minimo del 37% della spesa per investimenti e riforme programmata nei diversi piani nazionali presentati dai paesi membri dell'Unione debba sostenere gli obiettivi climatici^[5].



Figura 6 – Le sei missioni alla base del PNRR (Fonte: Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza);

Viene ritenuto inoltre di vitale importanza anche lo sviluppo dell'economia circolare, fulcro dell'iniziativa europea che punta ad un nuovo e migliore equilibrio fra natura, sistemi alimentari, biodiversità e circolarità delle risorse. Non a caso la prima delle quattro componenti della missione 2 del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) presentato dal governo italiano, detta "Agricoltura sostenibile ed economia circolare", riguarda proprio un percorso verso una piena sostenibilità ambientale. L'obiettivo è quello di migliorare la gestione dei rifiuti e aumentare la promozione dell'economia circolare, rafforzando le infrastrutture per la raccolta differenziata, ammodernando o sviluppando nuovi impianti di trattamento rifiuti.

In questo contesto, l'Italia nel settembre del 2020 ha recepito le direttive del "Pacchetto Economia Circolare", il quale prefigge i seguenti obiettivi riguardo il riciclo dei rifiuti urbani^[6]:

- Almeno il 55% entro il 2025;
- Il 60% entro il 2030;
- Il 65% entro il 2035;
- Limitazione dello smaltimento in discarica non superiore al 10% entro il 2035;

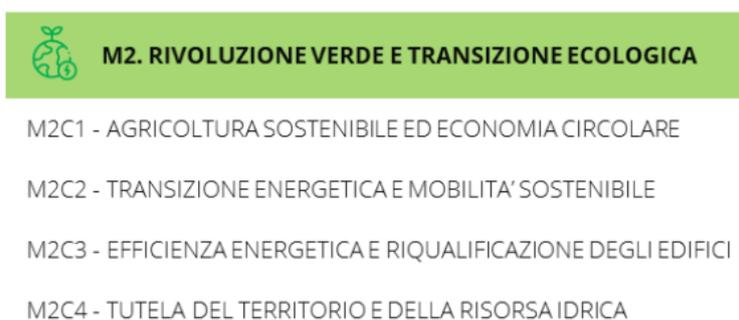


Figura 7 – Punti chiave della missione 2 del PNRR (Fonte: Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza);

Il secondo componente della missione 2 del PNRR prevede una serie di interventi e misure riguardanti la "Transizione energetica e mobilità sostenibile". L'ambito di intervento relativo alla transizione energetica riguarda l'incremento della quota di energia prodotta da fonti rinnovabili, ed uno dei quattro investimenti principali previsti è direttamente rivolto allo sviluppo del biometano ottenuto massimizzando il recupero energetico dei residui organici. Questo risulta essere strategico per il potenziamento di un'economia circolare basata sul riutilizzo, oltre che essere un elemento rilevante per il raggiungimento dei target di decarbonizzazione europei. Se veicolato nella rete di distribuzione del gas, il biometano può contribuire al raggiungimento dei target al 2030 con un risparmio complessivo di gas a effetto serra rispetto al ciclo vita del metano fossile tra l'80 e l'85%. La linea di investimento si pone l'obiettivo di:

- i) riconvertire e migliorare l'efficienza degli impianti biogas agricoli esistenti verso la produzione totale o parziale di biometano da utilizzare sia nel settore del riscaldamento e raffrescamento industriale e residenziale sia nei settori terziario e dei trasporti;
- ii) supportare la realizzazione di nuovi impianti per la produzione di biometano (attraverso un contributo del 40 per cento dell'investimento), sempre con le stesse destinazioni;
- iii) promuovere la diffusione di pratiche ecologiche nella fase di produzione del biogas (siti di lavorazione minima del suolo, sistemi innovativi a basse emissioni per la distribuzione del digestato) per ridurre l'uso di fertilizzanti sintetici e aumentare l'approvvigionamento

- di materia organica nei suoli, e creare poli consortili per il trattamento centralizzato di digestati ed effluenti con produzione di fertilizzanti di origine organica;
- iv) promuovere la sostituzione di veicoli meccanici obsoleti e a bassa efficienza con veicoli alimentati a metano/biometano;
 - v) migliorare l'efficienza in termini di utilizzo di calore e riduzione delle emissioni di impianti agricoli di piccola scala esistenti per i quali non è possibile accedere alle misure di riconversione. Attraverso questo intervento sarà possibile incrementare la potenza di biometano da riconversione da destinare al greening della rete gas pari a circa 2,3-2,5 miliardi di metri cubi^[5].

La produzione di biometano è un classico esempio di quello che è chiamato “Waste To Fuel” (WTF), uno dei pilastri su cui si basa l'idea di economia circolare. Uno degli scopi di questo elaborato è effettuare una riflessione necessaria in vista del ruolo che questo tipo di processi saranno chiamati ad assolvere in futuro, a complemento degli obiettivi di sostenibilità ambientale, decarbonizzazione e valorizzazione/re-impiego^[7] di cui oggi tanto si parla.

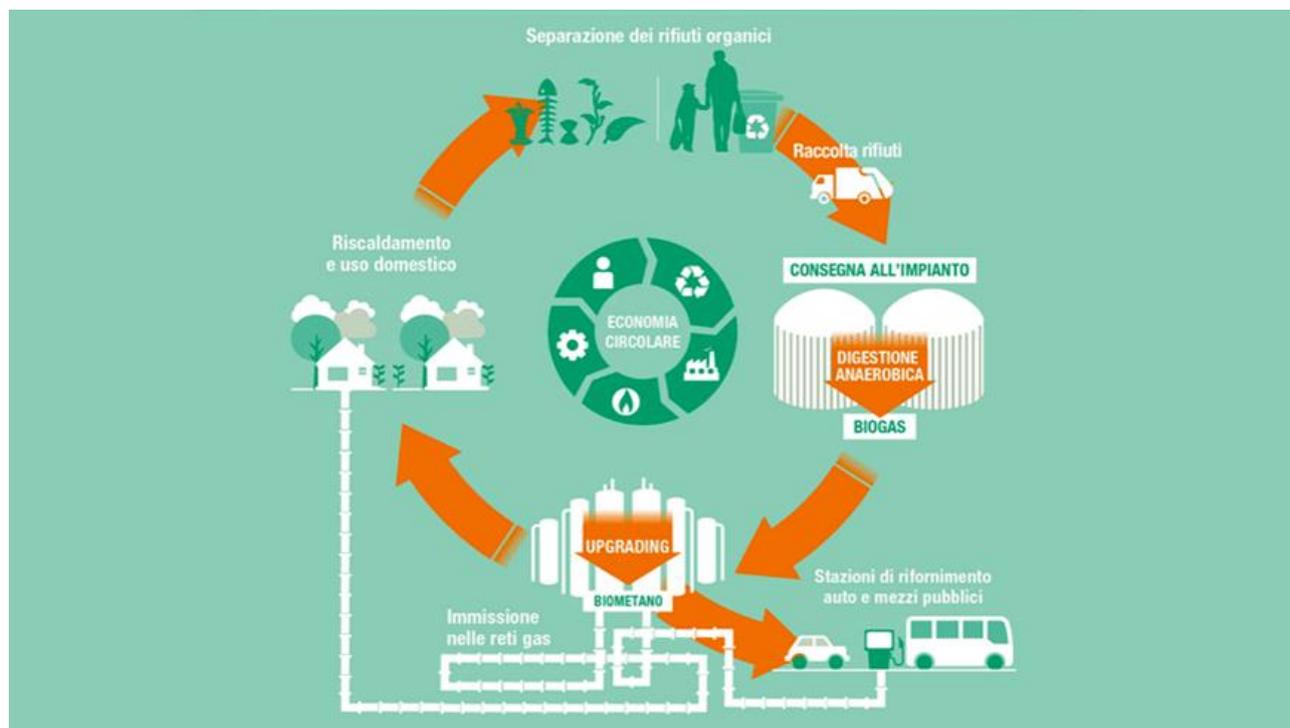


Figura 8 – L'economia circolare legata al biometano (Fonte: HERAmbiente);

2. F.O.R.S.U. E BIOMETANO

In questa sezione dell'elaborato si chiarisce, oltre alla definizione di biometano, il processo che porta alla formazione di questa fonte rinnovabile partendo dalla frazione organica di rifiuti solidi urbani. Questo è il fenomeno sul quale si basa l'impianto che verrà analizzato in seguito nel corso di questo lavoro di tesi, per tanto è giusto contestualizzare la situazione nazionale e provinciale riguardante i rifiuti e il biometano stesso.

2.1 F.O.R.S.U.

Ogni anno in Italia vengono raccolte circa 30 milioni di tonnellate di rifiuti. Di queste, 14 milioni di tonnellate sono correttamente differenziate e la metà, circa 7 milioni di tonnellate, sono di frazione organica derivante dal rifiuto solido urbano (FORSU).



Figura 9 – Immagine raffigurante scarti organici (Fonte: Mille);

Promuovendo una maggiore e più corretta differenziazione degli scarti di cucina si potrebbero raggiungere i 10 milioni di tonnellate di FORSU raccolta annualmente. Il riutilizzo della frazione organica dei rifiuti prevede la produzione di biogas e/o compost di qualità per l'agricoltura^[8].

L'impianto alla base della trattazione del presente lavoro sarà realizzato nel territorio torinese, e tratterà la FORSU al fine di produrre biometano e compost. Pertanto è necessario contestualizzare e analizzare la situazione legata ai rifiuti prodotti e raccolti all'interno della provincia. Nel territorio della Città Metropolitana di Torino, durante il 2020, sono state raccolte 1.050.000 tonnellate di rifiuto solido urbano, con una produzione pro-capite di 466 kg/abitante^[9].

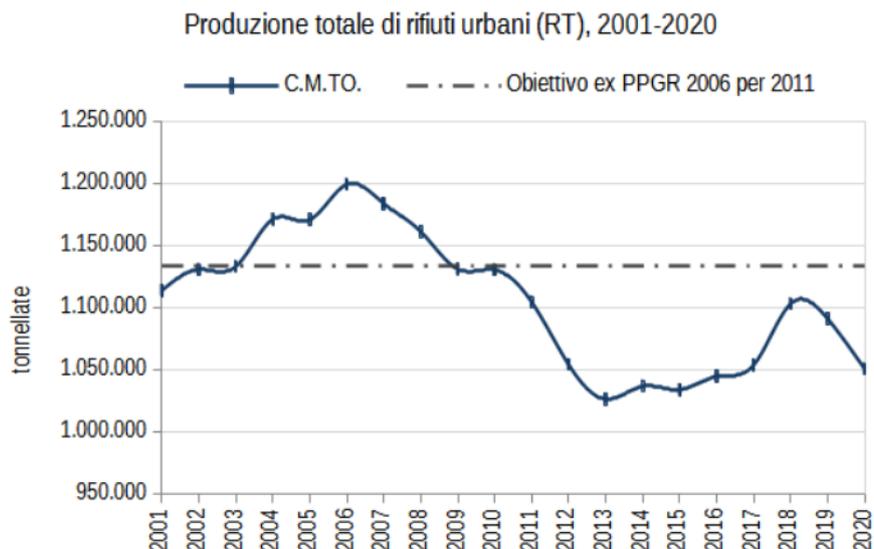


Figura 10 – Andamento della produzione totale di rifiuti urbani della provincia di Torino dal 2001 al 2020 (Fonte: Rapporto Rifiuti Urbani 2021);

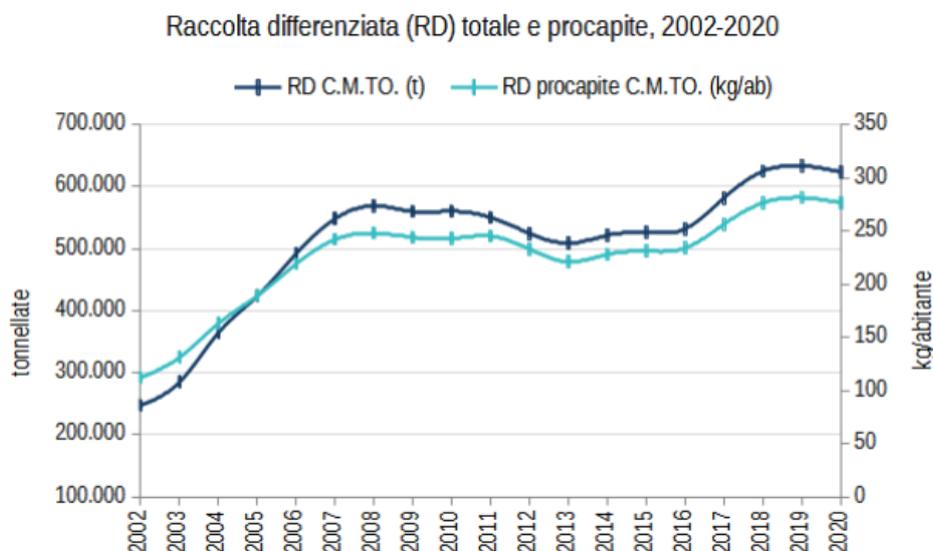


Figura 11 - Andamento della raccolta differenziata della provincia di Torino dal 2002 al 2020 (Fonte: Rapporto Rifiuti Urbani 2021);

La produzione complessiva di rifiuti urbani nel 2020 è diminuita di più di 40.000 tonnellate (-3,7%) rispetto al 2019, mentre il rifiuto urbano residuo a valle delle raccolte differenziate (rifiuto urbano indifferenziato) è passato a 427.314 tonnellate dalle 456.925 tonnellate dell'anno precedente, con una diminuzione del 6,5%. La percentuale di raccolta differenziata a livello provinciale supera appena il 59%, nel 2020 il quantitativo di raccolta differenziata è stato pari a circa 623.360 tonnellate, registrando una lieve diminuzione del 1,7% rispetto al 2019. Mediando tra i differenti Bacini territoriali, si ha che per l'intero territorio della Città Metropolitana di Torino la quantità procapite di raccolta differenziata si attesta a quasi 280 kg all'anno. Osservando invece la composizione complessiva della raccolta differenziata del territorio metropolitano nell'anno 2020, come riportato

in Figura 12, si evidenzia quanto segue: le quantità maggiori riguardano l'insieme delle frazioni organico e verde (31%) e la carta (22%); la plastica e il vetro costituiscono rispettivamente il 10% ed il 13% in peso, mentre tra le frazioni meno rilevanti sono date da ingombranti e Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) per il 6%, mentre i tessili, il legno ed i metalli rappresentano insieme il 9%. Pertanto, si rileva la predominanza in peso della frazione carta e dell'organico di cucina, con rispettivamente 61 e 62 kg annuali pro-capite. La frazione della carta viene notevolmente superata in peso dai rifiuti organici se alla FORSU si aggiunge il verde da manutenzione dei giardini (ulteriori 24 kg/abitante/anno).

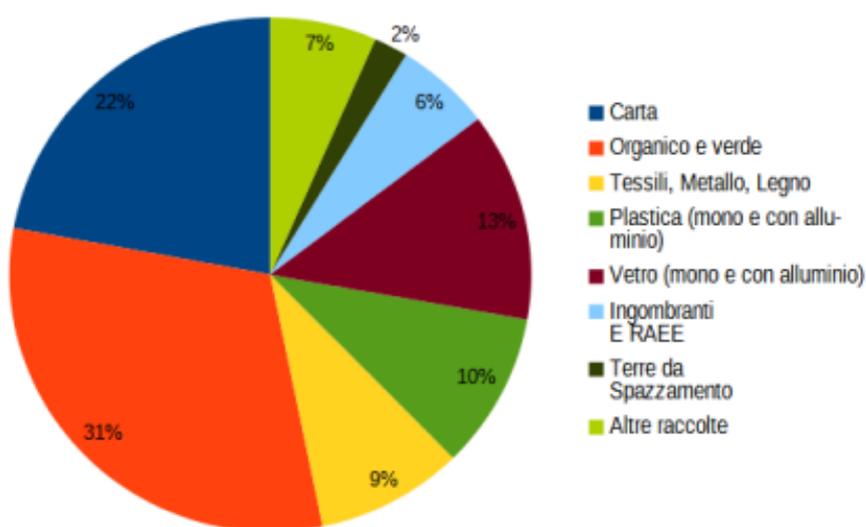


Figura 12 – Ripartizione in peso delle quote legate alla raccolta differenziata (Fonte: Rapporto Rifiuti Urbani 2021);

Per quanto riguarda la FORSU si evidenzia che i quantitativi raccolti risultano stabili a livello provinciale da oltre 10 anni, aggirandosi intorno a 140.000 tonnellate all'anno, corrispondenti a 62 kg/abitante. Ad oggi, il trattamento della frazione organica costituisce un importante nodo da risolvere, in quanto risulta esserci un deficit impiantistico sul territorio provinciale. La capacità di trattamento del rifiuto organico presente sul territorio provinciale è infatti risultata, negli ultimi anni, insufficiente a fare fronte alla domanda: circa il 68% della FORSU nel 2020 è stata avviata a trattamento in impianti localizzati in altre provincie, limitrofe e non.

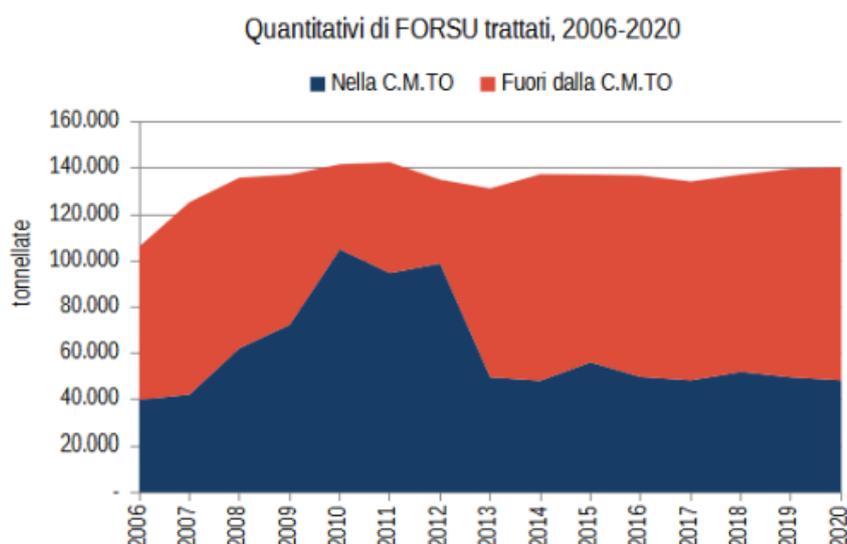


Figura 13 – Andamento relativo alla produzione e al trattamento della FORSU torinese (Fonte: Rapporto Rifiuti Urbani 2021);

Nel corso del 2020, delle 140.193 tonnellate di FORSU raccolte la quota trattata all'interno del sistema impiantistico presente sul territorio è stata coperta quasi esclusivamente dall'impianto di biodigestione di Acea a Pinerolo, che ha ricevuto 44.334 tonnellate corrispondenti a circa il 31% del quantitativo totale. Le restanti 95.859 tonnellate sono invece state avviate a trattamento in impianti localizzati al di fuori dell'ambito metropolitano, spesso anche al di fuori di quello regionale. Dai dati si registra che gli impianti fuori ambito che hanno trattato i maggiori quantitativi sono San Carlo in Provincia di Cuneo (15.623 tonnellate) e Bioland in Provincia di Alessandria (11.320 tonnellate). In particolare, si evidenzia che gli impianti di Amiat di Borgaro Torinese e quello di Cidiu Servizi di Druento assumono esclusivamente la funzione di impianti di transito dei rifiuti, che vengono successivamente trattati in impianti ubicati al di fuori del territorio di Città Metropolitana.

Operatori – FORSU, anno 2020				
Impianto	Comune	Pr	Quantità (t)	% mercato
Acea Pinerolese Industriale S.p.A.	Pinerolo	TO	44.334	31,56%
Amiat S.p.A.	Borgaro T.se	TO	41.925	29,85%
Cidiu Servizi S.p.A.	Druento	TO	17.926	12,76%
San Carlo S.r.l.	Fossano	CN	15.623	11,12%
Bioland S.r.l.	Casal Cermelli	AL	11.320	8,06%
Territorio e Risorse S.r.l.	Santhià	VC	6.056	4,31%
Montello S.p.A.	Montello	BG	2.674	1,90%
Koster S.r.l.	San Nazzaro Sesia	NO	335	0,24%
Totale			140.193	100,00%

Figura 14 – Ripartizione della FORSU torinese nei vari impianti, interni ed esterni alla provincia (Fonte: Rapporto Rifiuti Urbani 2021);

Il quantitativo di verde e ramaglie raccolto nel 2020 è stato pari a circa 50.500 tonnellate, ed è stato trattato per circa il 71% nel territorio metropolitano (a fronte del 74% nel 2019). Tale flusso risulta

funzionale anche all'attività di trattamento e recupero dell'organico in quanto rappresenta materiale strutturante per il processo di compostaggio^[9]. Alla luce dei numeri resi disponibili dal rapporto sui rifiuti urbani del 2021 promosso dagli enti provinciali, è chiara la forte necessità di realizzazione di nuovi poli impiantistici sul territorio metropolitano. Raggiungere un'indipendenza sul trattamento e recupero della FORSU ridurrebbe sicuramente i costi di gestione e smaltimento della materia, ma soprattutto aumenterebbe la produzione di materie di grande utilità e bisogno quali, come già accennato, biometano e compost di qualità da reintrodurre nel settore agricolo.

2.2 BIOMETANO

Il biometano è definito come un biogas che ha subito un processo di raffinazione fino ad avere una concentrazione di metano di almeno il 95%, ed è utilizzato come biocombustibile al pari del metano fossile. Il processo chimico che porta alla sua formazione è definito "digestione anaerobica", la quale consiste in una decomposizione biologica della sostanza organica in assenza di ossigeno^[10].

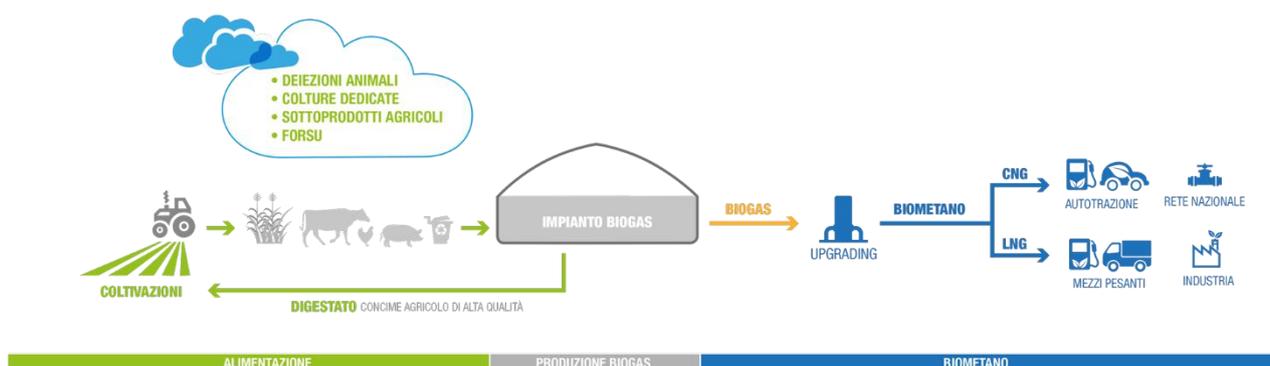


Figura 15 – Schema di flusso sulla produzione del biometano (Fonte: SNAM);

Il biometano ha tutte le carte in regola per essere usato in modo tale da perseguire gli obiettivi di riduzione delle emissioni. È ottenuto dalla purificazione del biogas che, a seguito di opportuni trattamenti chimico-fisici (purificazione o upgrading), anche svolti in luogo diverso da quello di produzione, è idoneo alla successiva fase di compressione per l'immissione nella rete del gas naturale^[10]. Se si sfruttassero quindi appieno le reti gas esistenti aumentando la produzione nazionale ci sarebbero molteplici vantaggi:

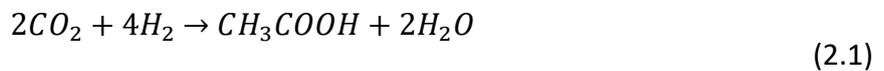
- Ricadute positive sul comparto agro-alimentare, promuovendo lo sviluppo di una società il cui modello economico risulti maggiormente sostenibile e della circolarità nell'utilizzo delle risorse;
- Riduzioni delle emissioni del settore agricolo (che contribuisce per il 14% dei gas climalteranti) grazie al suo processo produttivo;
- Restituzione al terreno di sostanza organica, abbinando la produzione di biometano con quella di compost visto il grande potere fertilizzante naturale contenuto nel digestato uscente dai bio-digestori;

- Riduzione delle emissioni di gas climalteranti dovute al suo utilizzo come combustibile, essendo il biometano una fonte rinnovabile e sostenibile proprio perché CO₂ neutro;
- Utilizzo finale dal punto di vista energetico del tutto paragonabile a quello del metano di origine fossile, per tutti i tipi di usi finali, risultando così flessibile e programmabile^[11];

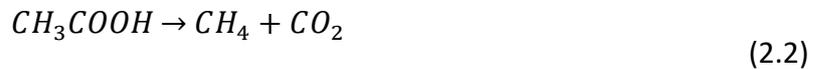
2.3 PROCESSO DI DIGESTIONE ANAEROBICA

Affinché avvenga il processo di digestione anaerobica è necessaria l'azione di diversi gruppi di microorganismi in grado di trasformare la sostanza organica in composti intermedi, quali acido acetico (CH₃COOH), anidride carbonica (CO₂) ed idrogeno (H₂). Questi vengono poi utilizzati dai microorganismi metanigeni che concludono il processo e producono metano (CH₄). Durante la digestione in assenza di ossigeno avvengono diverse fasi nella biomassa, sia simultaneamente che sequenzialmente, le quali richiedono differenti condizioni operative. Si distinguono quattro fasi biochimiche principali:

- Idrolisi, nella quale i polimeri (carboidrati) e le molecole complesse (proteine e grassi) sono degradati a monomeri (monosaccaridi) o a molecole più semplici (amminoacidi, acidi grassi a catena lunga);
- Acidogenesi, nella quale le sostanze organiche prodotte dall'idrolisi vengono trasformate in acetato, acidi grassi volatili, idrogeno e anidride carbonica;
- Acetogenesi, nella quale gli acidi grassi volatili vengono trasformati in acido acetico, idrogeno e anidride carbonica;



- Metanogenesi, nella quale viene prodotto metano, partendo sia dall'acido acetico (processo denominato metanogenesi acetoclastica, 78% del CH₄ prodotto) sia dall'idrogeno (metanogenesi idrogenotrofa, 22% del CH₄ prodotto)^[12];



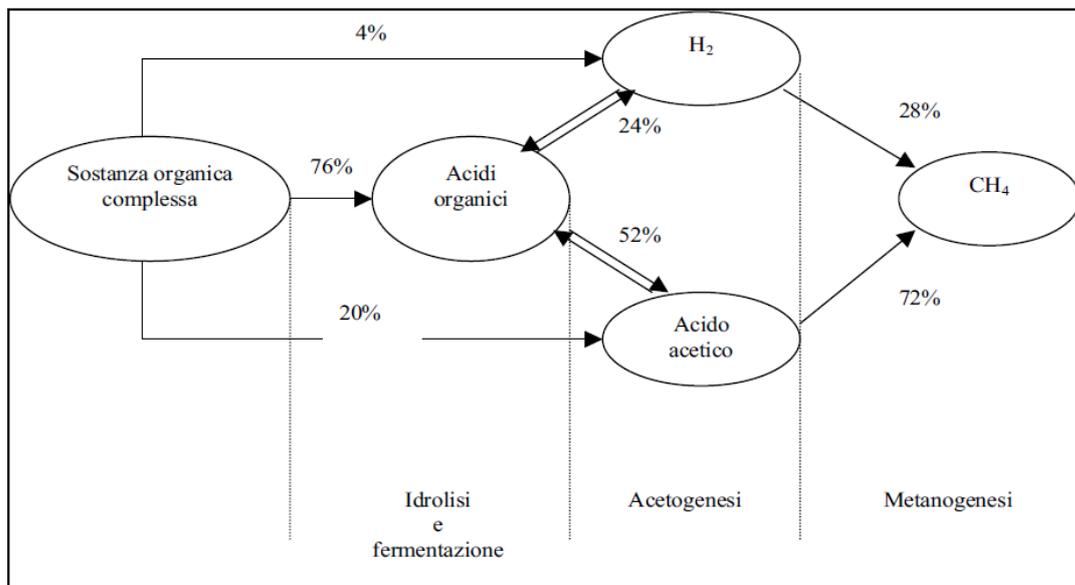


Figura 16 – Schema a blocchi relativo alle fasi del processo e della produzione di biometano (Fonte: APAT, manuale e linee guida sulla digestione anaerobica della FORSU);

La composizione del biogas “grezzo” può variare in funzione di diversi aspetti quali, ad esempio, la matrice organica o il tipo di impianto utilizzato. Costituenti principali:

- Metano (CH₄): 53-70%;
- Anidride carbonica (CO₂): 30-42%;

Costituenti minori:

- Acido solfidrico (H₂S);
- Ammoniaca (NH₃);
- Azoto (N₂);
- Monossido di carbonio (CO);
- Idrogeno (H₂);
- Ossigeno (O₂);

Le principali materie prime utilizzabili nel processo di digestione anaerobica sono:

- Refluo di fogna;
- Reflui zootecnici;
- Rifiuti alimentari di origine commerciale o domestica (FORSU);
- Rifiuti da giardinaggio e gestione del verde;
- Produzioni agricole dedicate;

L’impianto al centro della presente trattazione, come già detto, è stato progettato per la produzione di biogas partendo da una matrice organica composta da FORSU e in parte minore da verde.

Le tecniche di digestione anaerobica si differenziano tra loro principalmente in base al contenuto di solidi totali del materiale in digestione ed in base alla temperatura di processo. La sostanza secca (SS), anche espressa con il termine “Solidi totali” (ST), rappresenta il complemento a 100 delle

sostanze presenti nella biomassa, a meno dell'acqua. In prima approssimazione, rappresenta la somma della frazione organica e di quella inerte del substrato. La sostanza organica, anche espressa con il termine "Solidi Volatili" (SV), in prima approssimazione è la frazione organica dei solidi totali. Il processo di digestione può essere operato a differenti temperature, ottenendo differenti risultati:

- Condizioni mesofile (temperatura tra 35-45°C), opzione più scelta a causa della facile conduzione e stabilità;
- Condizioni termofile (temperatura tra 50-65°C), caratterizzata dai tempi di residenza dimezzata e produzione maggiore rispetto al caso mesofilo;
- Condizioni psicrofile (impianti a freddo), tecnologia non particolarmente interessante al fine di avere una buona resa in termini di produzione di biogas^[13];

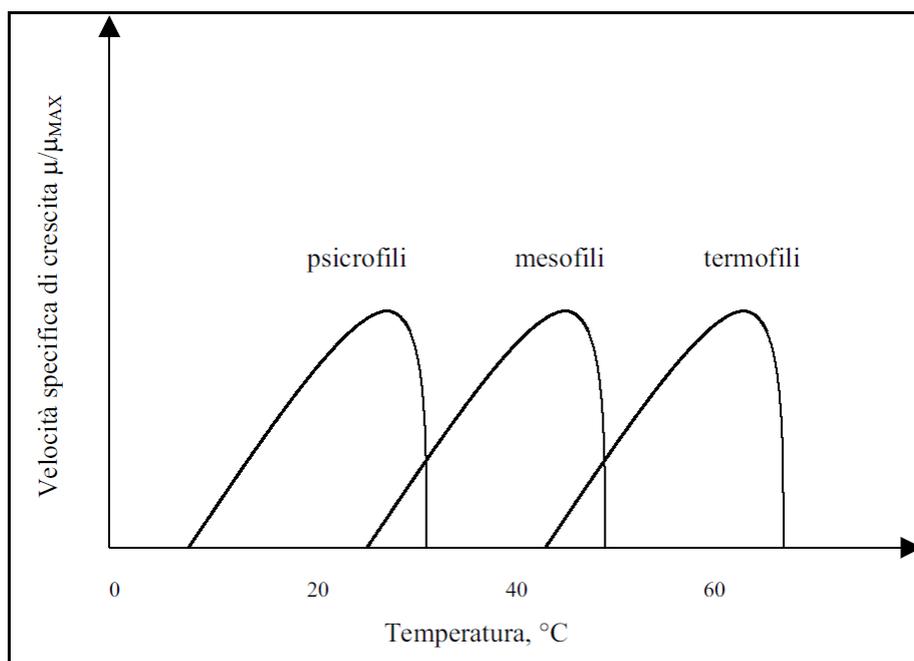


Figura 17 – Campo di attività delle differenti popolazioni di microrganismi (Fonte: APAT, manuale e linee guida sulla digestione anaerobica della FORSU);

Dalla Figura 17 si può notare che, quando si passa da un regime di temperatura ad un altro, avviene un vero e proprio cambiamento nella composizione della comunità batterica. Infatti, gli andamenti di sviluppo delle diverse popolazioni batteriche non sono monotoni ma presentano dei picchi in corrispondenza di ben definiti intervalli di temperatura, differenti per ciascuna specie. Una variazione di temperatura porta ad una variazione nella velocità di reazione: per massimizzare la presenza di una specie batterica occorre quindi portare la digestione in un preciso intervallo di temperatura e mantenerla nel tempo, così che la velocità di reazione sia la più alta possibile grazie all'elevata concentrazione di microrganismi della stessa specie. A livello industriale, si possono adottare 3 tipologie di digestione anaerobica:

- Digestione ad umido o "wet", dove il substrato ha un contenuto di ST minore del 10%;
- Digestione a semi-secco o "semi-dry", dove il substrato ha un contenuto di ST compreso tra 15-20%;
- Digestione a secco o "dry", dove il substrato ha un contenuto di ST maggiore del 20%;

2.4 PROCESSO DI COMPOSTAGGIO O DIGESTIONE AEROBICA

Di seguito si descrive il processo di compostaggio o digestione aerobica della materia organica, in modo da comprendere le basi della sua natura. Risulta un passaggio necessario in quanto l'impianto che si analizzerà in seguito opererà in assetto combinato, unendo la produzione di biogas e la produzione di compost di qualità.

La trasformazione della sostanza organica contenuta nei residui animali e vegetali è un processo essenziale nell'ecosistema, che avviene ad opera di microrganismi presenti nel terreno. Questi operano diverse funzioni ecologiche, tra cui quella di favorire la trasformazione della materia organica in composti organici stabili, dette sostanze umiche. L'humus è una vera e propria riserva naturale di nutrimento per le piante, grazie alla sua capacità di liberare lentamente e costantemente elementi nutritivi come l'azoto (N), il fosforo (P) e il potassio (K). In altre parole è responsabile della fertilità del terreno, al quale conferisce importanti proprietà chimico-fisiche^[14].

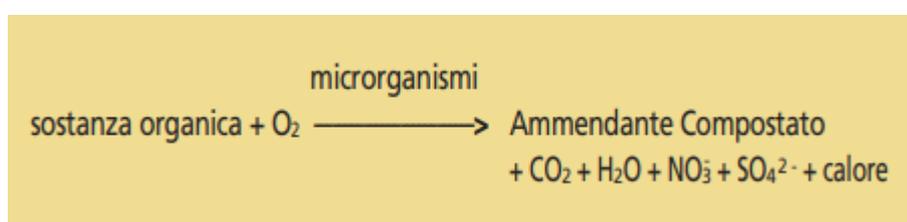


Figura 18 – Reazione del processo di digestione aerobica (Fonte: venetoagricoltura);

Con il termine "compost" si intende il prodotto finale dato dalla decomposizione e dall'umidificazione della sostanza organica per effetto della flora microbica naturalmente presente in ambiente. Con il termine "compostaggio", invece, si intende il processo attraverso il quale viene controllata, accelerata e ottimizzata la naturale degradazione delle biomasse appena descritta, a cui va in contro ogni sostanza organica presente in natura. Si tratta di un processo detto "digestione aerobica", che permette di ottenere un prodotto biologicamente stabile.

Come mostrato in Figura 18, i microrganismi operano un ruolo fondamentale nel processo di compostaggio in quanto traggono energia per le loro attività metaboliche dalla materia organica liberando acqua, biossido di carbonio, sali minerali e sostanza organica stabilizzata ricca di sostanze umiche, il compost appunto.

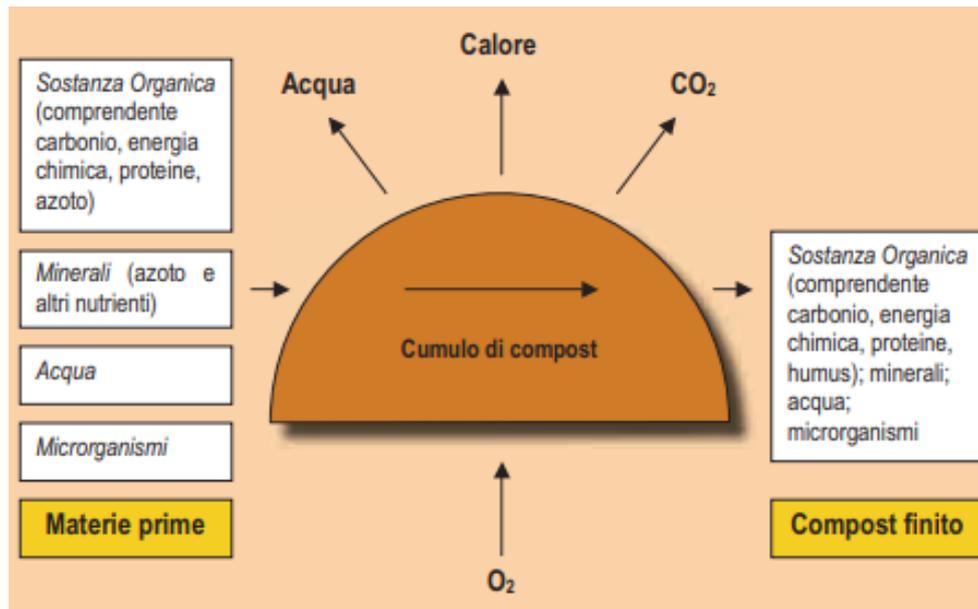


Figura 19 – Processo di compostaggio (Fonte: venetoagricoltura);

Il compostaggio può essere suddiviso in due fasi principali, in base alle modifiche biochimiche che subisce il materiale organico:

- Fase di bio-ossidazione o fase attiva, durante la quale avviene l'igienizzazione della massa ad elevate temperature mediante intensi processi di degradazione delle componenti organiche più facilmente degradabili. È un processo aerobico ed esotermico: la presenza di composti facilmente metabolizzabili comporta elevati consumi di ossigeno e produzione di calore. Infatti, l'effetto più evidente è l'innalzamento della temperatura che passa dal valore dell'ambiente circostante a 60°C e oltre, con una velocità che risulta proporzionale alla disponibilità di ossigeno. L'aerazione del substrato risulta quindi una condizione fondamentale per l'avvenimento di questo processo dal quale si ha come risultato il "compost fresco". Quest'ultimo è un materiale parzialmente stabilizzato e igienizzato, ovvero privo di organismi patogeni, a condizione che la temperatura rimanga su valori dell'intorno di 60°C per almeno 5 giorni;
- Fase di maturazione o curing phase, durante la quale avviene la completa stabilizzazione del materiale che si arricchisce di molecole umiche. Il processo di decomposizione risulta più lento rispetto alla fase iniziale di bio-ossidazione, a causa della maggiore complessità delle molecole organiche residue e alla morte di buona parte della popolazione microbica dovuta alla carenza di nutrimento. In questa fase le temperature si abbassano a valori di 40/45°C per poi scendere progressivamente, stabilizzandosi poco al di sopra della temperatura ambiente. Il materiale che si ottiene alla fine di questa fase è il compost maturo, una matrice stabile di colorazione scura ricca di composti umici; []].

	Fase di Bio-ossidazione	Fase di Maturazione
Tipologia di sostanza organica degradata	Molecole semplici, prontamente biodegradabili e fermentescibili, quali zuccheri, acidi organici, aminoacidi ecc.	Molecole organiche più complesse, sostanze recalcitranti rimaste nella matrice, quali lignina, amido e cellulosa.
Tipo di microrganismi coinvolti	Microrganismi principalmente termofili (batteri, funghi, ecc).	Microrganismi prevalentemente mesofili e psicrofili (batteri, funghi, attinomiceti, eumiceti, ecc).
Effetti della degradazione	Produzione di H ₂ O, CO ₂ , NH ₃ , intermedi fitotossici ed elevata produzione di sostanze odorigene (acidi grassi volatili, composti solforati, ecc).	Produzione di H ₂ O, CO ₂ , NH ₃ in quantità limitata.
Temperatura	Molto elevata, oltre i 60°C.	Si abbassa (40-45°C) fino a temperatura ambiente.
Prodotto Finale	Compost Fresco	Compost Maturo

Tabella 1 – Principali caratteristiche delle due fasi costituenti il processo di compostaggio[];



Figura 20 – Immagine raffigurante il compost maturo (Fonte: ParmaPress24);

Durante il processo di compostaggio controllato è importante creare e mantenere le migliori condizioni ambientali possibili, così da favorire e accelerare le attività microbiche. A questo scopo è opportuno monitorare e controllare l'interazione combinata di diversi parametri. I principali sono:

- Temperatura, che dà informazioni sull'andamento del processo e sull'intensità delle reazioni;
- Presenza di ossigeno, che risulta necessario ai microrganismi attivi e che varia a seconda delle fasi del processo ma nel complesso deve essere mantenuta sopra il 10-12% (il maggior quantitativo è richiesto durante la prima fase del processo, in quanto la presenza dei

componenti facilmente degradabili favorisce la moltiplicazione e l'attività della popolazione microbica);

- Porosità del substrato, che è la misura degli spazi vuoti esistenti nella biomassa e condiziona il processo attraverso l'influenza sulla corretta ed omogenea distribuzione dell'aria insufflata;
- Umidità del materiale, che svolge un ruolo fondamentale per la sopravvivenza dei microrganismi e i suoi valori devono essere mantenuti all'interno del range ottimale tra il 50 e il 55%;
- Rapporto Carbonio su Azoto (C/N), che risulta un indice di controllo dell'attività microbica in quanto un eccesso di carbonio ne provoca un rallentamento, mentre un eccesso di azoto comporta perdite per volatilizzazione dell'ammoniaca, il range ottimale di questo parametro è compreso tra 10 e 20;
- pH, che durante la fase iniziale del processo raggiunge valori acidi, per poi salire grazie all'aerazione a valori tra 8 e 9, e attestarsi nella fase finale a valori prossimi alla neutralità (7-7,5)^[14];

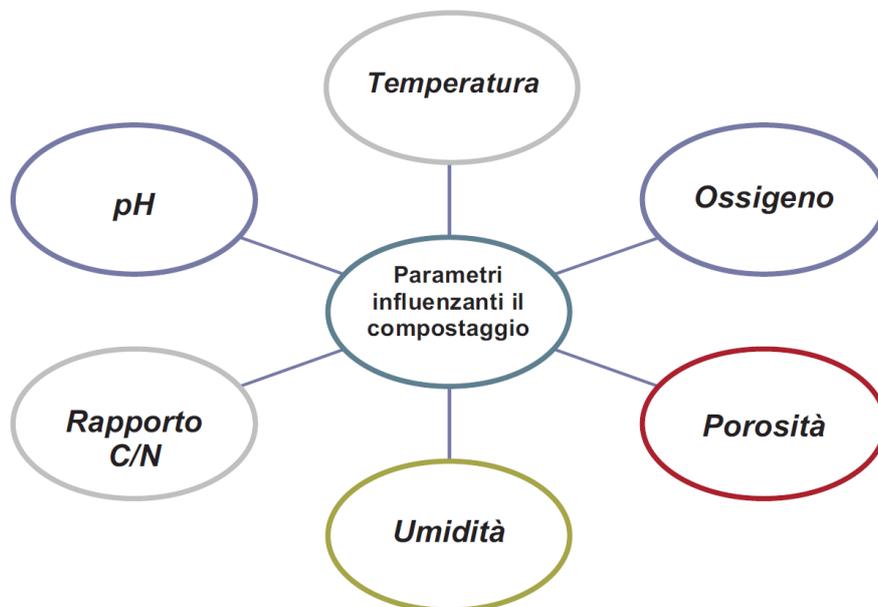


Figura 21 – Parametri principali per il controllo del processo di compostaggio (Fonte: venetoagricoltura);

3. L'IMPIANTO DI FERPLANT

A livello provinciale, come visto nel capitolo precedente, i quantitativi di FORSU della Città Metropolitana di Torino sono rimasti piuttosto stabili negli ultimi dieci anni. Nel 2020 sono state raccolte circa 140.000 t, corrispondenti a circa 68 kg/abitate. Purtroppo, la capacità di trattamento del rifiuto organico presente sul territorio torinese non risulta adeguata per far fronte alle quantità raccolte: circa il 30% della FORSU viene attualmente trattata internamente, mentre il restante 70% viene inviato in impianti fuori provincia. Risulta pertanto evidente come ci sia un'elevata necessità di realizzare nuovi impianti per il trattamento dei rifiuti organici, in modo da renderli una fonte energetica valorizzabile e raggiungere l'autosufficienza provinciale per quanto riguarda il loro trattamento. Il presente elaborato è incentrato sul progetto di un nuovo impianto per la produzione di biometano e compost, ottenuti rispettivamente dal processo di upgrading del biogas prodotto mediante digestione anaerobica di FORSU e dal successivo compostaggio del digestato in uscita dal reattore.

3.1 DATI GENERALI

3.1.1 LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO

L'impianto sarà realizzato a Rondissone, comune di circa 1800 abitanti a 30 km da Torino e 10 km da Chivasso. L'area interessata, adibita ad uso agricolo e di circa 26.000 m², è situata a sud-ovest del centro abitato, adiacente ad una zona industriale e a circa 500 m dall'autostrada A4 Torino-Milano.

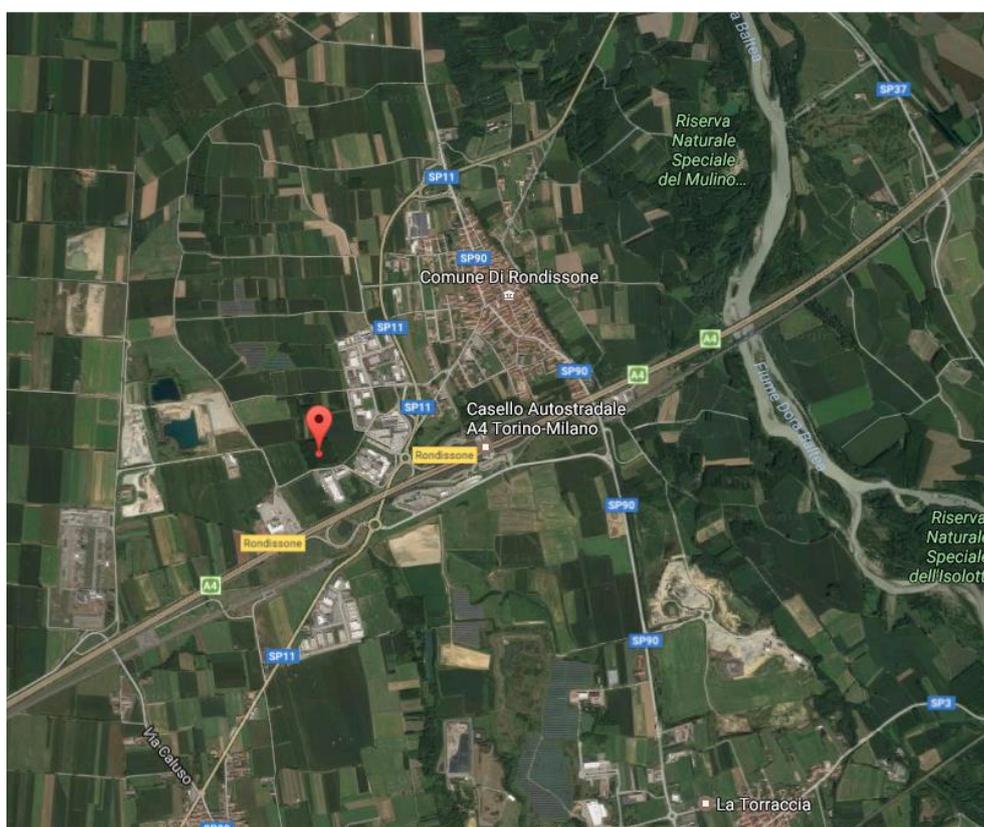


Figura 22 – Localizzazione del terreno sul quale sorgerà l'impianto (Fonte: Google Maps);

3.1.2 POTENZIALITA'

L'impianto in questione è stato progettato e autorizzato per poter ricevere 30.000 ton/anno di FORSU e 11.000 ton/anno di sfalci e ramaglie. Attraverso un "biodigestore" (o "digestore") di tipologia "dry" verrà prodotto biogas, il quale verrà successivamente trattato nella sezione di upgrading ottenendo così il biometano, che infine verrà compresso adeguatamente ed immesso nella rete di distribuzione SNAM. I residui di anidride carbonica avanzati dalla pulizia del biogas, verranno recuperati grazie ad un impianto dedicato di recupero e liquefazione: questo permetterà di ottenere anidride carbonica per usi industriali alimentari in bombole, aggiungendo un ulteriore output utile di processo. Il materiale organico estratto dal reattore, detto digestato, verrà invece unito al così detto strutturante verde e passerà alla sezione di digestione aerobica. Alla fine del processo di compostaggio, che avrà una durata complessiva di 90 giorni, si otterrà compost di qualità da introdurre sul mercato agricolo. In Figura 23 sono mostrati gli input e gli output complessivi dell'impianto grazie ad uno schema di flusso.

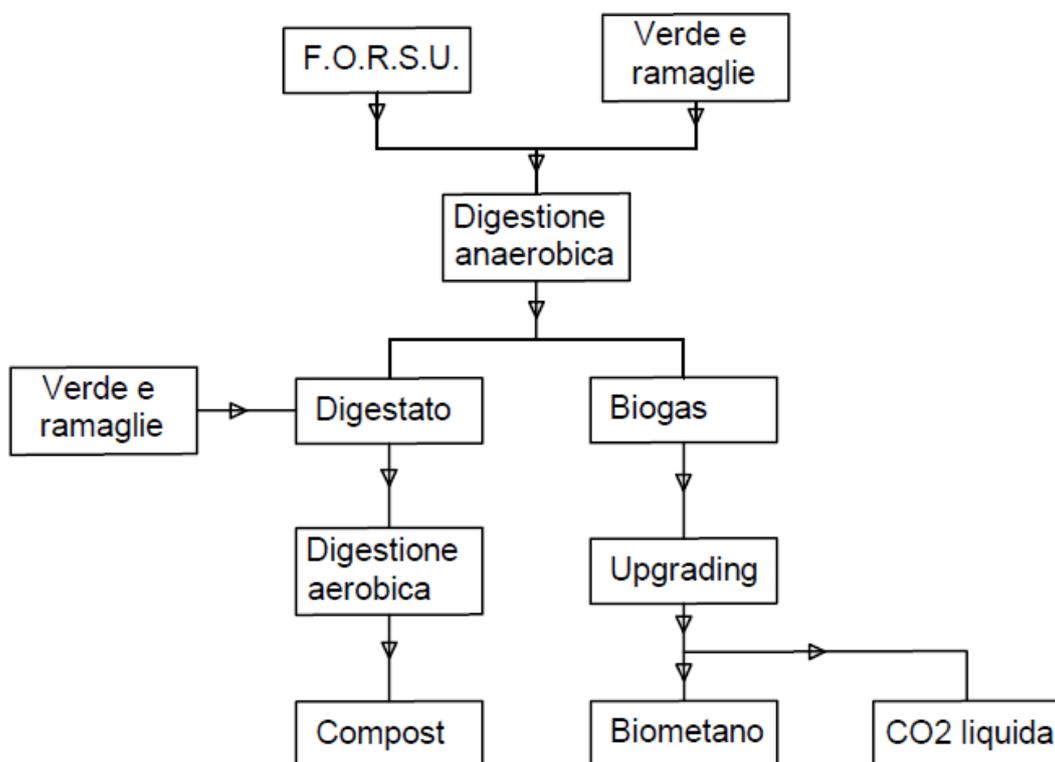


Figura 23 – Schema a blocchi relativo al funzionamento dell'impianto;

NUMERI DELL'IMPIANTO

<i>FORSU in ingresso [ton/anno]</i>	30.000,00
<i>Sfalci e ramaglie in ingresso [ton/anno]</i>	11.000,00
<i>Produzione di Biometano [Nm³/anno]</i>	2.420.000,00
<i>Produzione di CO2 [Nm³/anno]</i>	1.410.000,00
<i>Produzione Compost [ton/anno]</i>	16.000,00

Tabella 2 – Dati principali dell'impianto di Ferplant;

3.1.3 TIPOLOGIA DI RIFIUTI TRATTATI

Il decreto di riferimento in vigore che regola il processo di incentivazione sulla produzione di biometano è il DM del 28 marzo 2018. Ai sensi dell'art. 5 comma 5 viene fornita la definizione di biometano come "biometano avanzato: il biometano ottenuto a partire dalle materie elencate nella parte A dell'allegato 3 del decreto del Ministro dello sviluppo economico 10 ottobre 2014 e successive modifiche". Di seguito viene riportato l'allegato che definisce la tipologia di materiale riconosciuto come materia prima o carburante in grado di dare origine a biocarburanti avanzati:

"Parte A: materie prime e carburanti che danno origine a biocarburanti contabilizzabili come avanzati.

- a) Alghe, se coltivate su terra in stagni o fotobioreattori;
- b) Frazione di biomassa corrispondente ai rifiuti urbani non differenziati, ma non ai rifiuti domestici non separati soggetti agli obiettivi di riciclaggio di cui all'art. 181 e allegato E del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152;
- c) Rifiuto organico come definito all'art. 183, comma 1 lettera d), proveniente dalla raccolta domestica e soggetto alla raccolta differenziata di cui all'art. 183, comma 1, lettera p) , del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152;
- d) Frazione della biomassa corrispondente ai rifiuti industriali non idonei all'uso nella catena alimentare umana o animale, incluso materiale proveniente dal commercio al dettaglio e all'ingrosso e dall'industria agroalimentare, della pesca e dell'acquacoltura, ed escluse le materie prime elencate nella parte B del presente allegato;
- e) Paglia;
- f) Concime animale e fanghi di depurazione;
- g) Effluente da oleifici che trattano olio di palma e fasci di frutti di palma vuoti;
- h) Pece di tallolio;
- i) Glicerina grezza;
- l) Bagasse;
- m) Vinacce e fecce di vino;
- n) Gusci;
- o) Pule;
- p) Tutoli ripuliti dei semi di mais;
- q) Frazione della biomassa corrispondente ai rifiuti e ai residui dell'attività e dell'industria forestale quali corteccia, rami, prodotti di diradamenti precommerciali, foglie, aghi, chiome, segatura, schegge, liscivio nero, liquame marrone, fanghi di fibre, lignina e tallolio;
- r) Altre materie cellulosiche di origine non alimentare definite all'art. 2, comma 1, lettera q);
- s) Altre materie ligno-cellulosiche definite all'art. 2, comma 1, lettera q -quater), eccetto tronchi per sega e per impiallacciatura;
- t) Carburanti per autotrazione rinnovabili liquidi e gassosi di origine non biologica;
- u) Cattura e utilizzo del carbonio a fini di trasporto, se la fonte energetica è rinnovabile in conformità dell'art. 2, comma 1, lettera a);
- v) Batterie, se la fonte energetica è rinnovabile in conformità dell'art. 2, comma 1, lettera a);"

L'allegato 2 del citato decreto fornisce la tabella di riferimento al fine di calcolare il numero di Certificati di Immissione in Consumo (CIC) generati dalla tipologia di impianto e dalla sua produttività.

Nel rispetto di quanto indicato dal decreto ministeriale, l'impianto è stato autorizzato dalla Città Metropolitana di Torino, mediante autorizzazione unica e valutazione di impatto ambientale, a trattare i rifiuti riportati in Tabella 3, identificati mediante i relativi codici CER (Catalogo Europeo dei Rifiuti).

CODICE C.E.R.	DESCRIZIONE
02.xx.xx	Rifiuti prodotti da agricoltura, orticoltura, acquacoltura, selvicoltura, caccia e pesca, trattamento e preparazione di alimenti
020601	Rifiuti dell'industria dolciaria e della panificazione, scarti inutilizzabili per il consumo e la trasformazione
020704	Rifiuti della produzione di bevande alcoliche ed analcoliche (tranne caffè, tè e cacao), scarti inutilizzabili per il consumo e la trasformazione
03.xx.xx	Rifiuti della lavorazione del legno e della produzione di pannelli, mobili, polpa, carta e cartone
030101	Rifiuti della lavorazione del legno e della produzione di pannelli e mobili, scarti di corteccia e sughero
030105	Rifiuti della lavorazione del legno e della produzione di pannelli e mobili, segatura, trucioli, residui di taglio, legno, pannelli di truciolare e piallacci diversi da quelli di cui alla voce 030104
030301	Rifiuti della produzione e della lavorazione di polpa, carta e cartone, scarti di corteccia e legno
19.xx.xx	Rifiuti prodotti da impianti di trattamento dei rifiuti, impianti di trattamento delle acque reflue fuori sito, nonché dalla potabilizzazione dell'acqua e dalla sua preparazione per uso industriale
190699	Rifiuti non specificati altrimenti (limitatamente al biogas derivante da digestione anaerobica)
20.xx.xx	Rifiuti urbani (rifiuti domestici e assimilabili prodotti da attività commerciali e industriali nonché dalle istituzioni) inclusi i rifiuti della raccolta differenziata
200108	Frazioni oggetto di raccolta differenziata (tranne 150100), rifiuti biodegradabili da cucine e mense
200138	Frazioni oggetto di raccolta differenziata (tranne 150100), legno diverso da quello di cui alla voce 200137*
200125	Frazioni oggetto di raccolta differenziata (tranne 150100), oli e grassi commestibili
200201	Rifiuti prodotti giardini e parchi (inclusi i rifiuti provenienti da cimiteri), rifiuti biodegradabili
200302	Altri rifiuti urbani, rifiuti dei mercati

Tabella 3 – Classificazione rifiuti con i relativi codici CER;

3.1.4 SUDDIVISIONE IN ZONE FUNZIONALI

Al fine di una più facile identificazione e trattazione si è proceduto a suddividere l'impianto in zone denominate in base all'attività principale svolta, come indicato in Tabella 4:

- Ricezione e pretrattamento FORSU;
- Digestione anaerobica;
- Compostaggio;
- Purificazione e upgrading del biogas con recupero dell'anidride carbonica;
- Trattamento aria;
- Palazzina uffici;
- Locali tecnici;

ATTIVITA' PRINCIPALE	ZONE	DESCRIZIONE	AREA [m ²]
Ricezione	ZONA A	A1 – Bussola	945
		A2 – Ricezione e pre-trattamento	
		A3 – Locale deposito cassoni carrabili	
Digestione anerobica	ZONA B	Digestore	675
Compostaggio	ZONA C	Miscelazione verde con frazione solida digestato	1071
	ZONA D	Bio-ossidazione accelerata	1050
	ZONA E	Maturazione controllata	2775
	ZONA F	Maturazione lenta	1800
	ZONA G	Stoccaggio finale compost	450
Stoccaggio verde	ZONA H	Stoccaggio iniziale verde	1511
Palazzina uffici	ZONA I	Piano terra	260
		Primo piano	260
Locali tecnici	ZONA L	Centrale termica	78
Trattamento aria	ZONA M	Biofiltro	1122
Upgrading e recupero CO ₂	ZONA N	Upgrading, recupero CO ₂ e locale compressori	708
Locali tecnici	ZONA O	Cabina ENEL	34
	ZONA P	Cabina di consegna metano	272

Tabella 4 – Suddivisione delle zone dell'impianto;

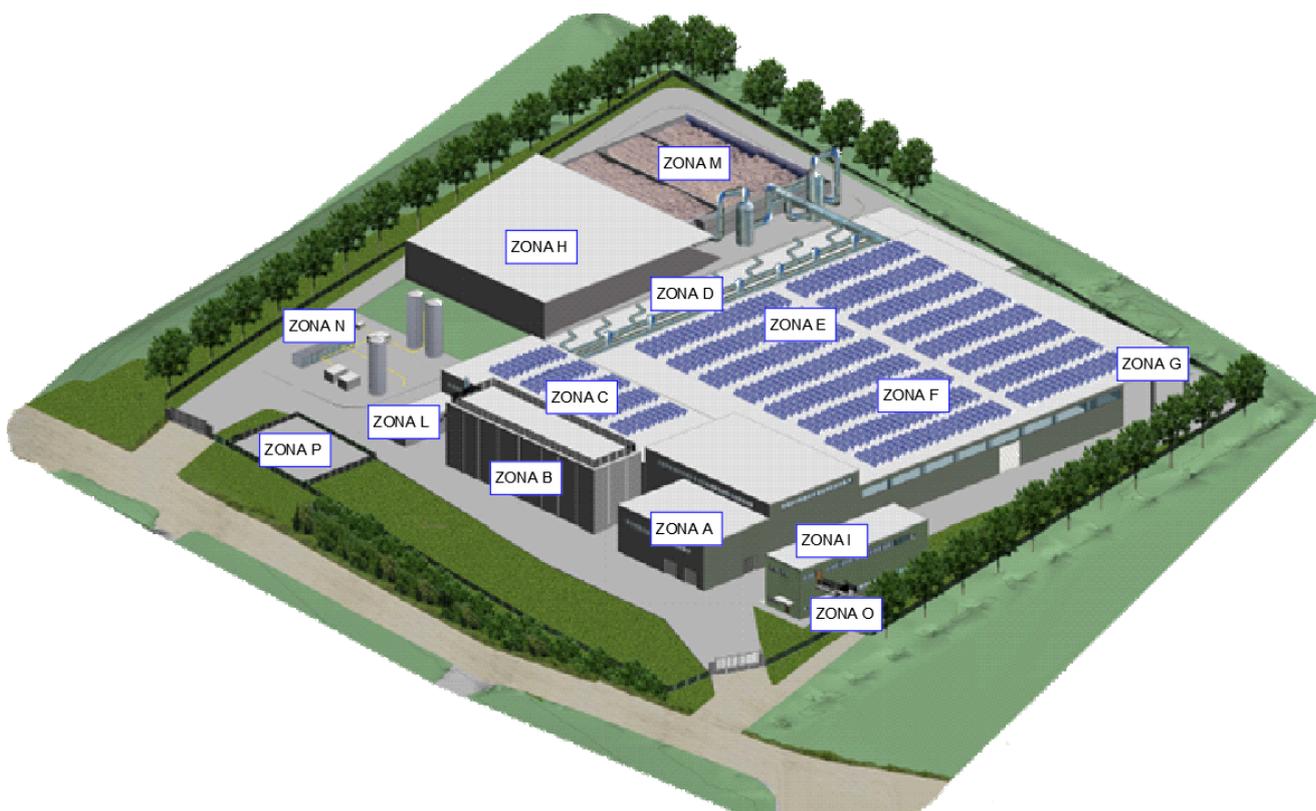


Figura 24 – Impianto suddiviso in zone;

3.1.5 OPERE ARCHITETTONICHE

Il fabbricato principale ospiterà le attività di ricezione e pre-trattamento della FORSU (ZONA A) e la fase di compostaggio del digestato derivante dal processo anaerobico opportunamente miscelato con la frazione verde (ZONA C, D, E, F e G). Avrà le seguenti caratteristiche:

- Struttura prefabbricata mista in cemento pre-compresso, carpenteria metallica ed in calcestruzzo armato in opera a seconda della destinazione d'uso dell'area ed in regola con la normativa vigente relativa alla resistenza al fuoco;
- Tamponature verticali opache composte principalmente da pannelli prefabbricati in cemento;
- Copertura con tegoli prefabbricati, getto collaborante ed eventuale isolamento in lana minerale e/o poliuretano in base alle restrizioni antincendio. L'impermeabilizzazione sarà garantita da lamiera grecate e/o guaina bituminosa ardesiata e/o membrana in PVC;
- Pavimento industriale di adeguato spessore realizzato con soluzioni tecniche in grado di garantire la risalita dell'acqua per capillarità e in accordo con le normative vigenti;

3.2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO

3.2.1 SEZIONE DI RICEZIONE E PRETRATTAMENTO

La sezione di ricezione e pretrattamento sarà realizzata nella parte sud-est dell'impianto. I mezzi di conferimento della FORSU accederanno allo stabilimento attraverso una bussola (ZONA A1), in modo da evitare la possibile fuoriuscita di odori molesti durante l'apertura dei portoni. Nell'intera ZONA A l'ambiente sarà mantenuto in costante depressione grazie al sistema di ventilazione controllata. La bussola avrà una superficie coperta di 257 m² avente un'altezza del fronte di 9,5 metri; il locale di ricezione e pretrattamento sarà di 624 metri² con un'altezza di 11 metri al fine di garantire un agevole scarico dei mezzi. Le operazioni di ricezione della FORSU in ingresso allo stabilimento avverranno secondo una specifica procedura di seguito descritta:

- a) accesso del mezzo all'interno dell'impianto;
- b) verifica della documentazione del carico;
- c) verifica della conformità, pesatura ed accettazione materiale presso l'impianto;
- d) accesso del mezzo nell'area di ricezione;
- e) manovra e messa in posizione del mezzo per l'accesso al locale filtro (bussola ZONA A1);
- f) apertura dei portoni ad impacchettamento rapido per l'accesso al locale filtro;
- g) chiusura dei portoni esterni ed apertura dei portoni interni ad impacchettamento rapido;
- h) accesso del mezzo all'area di scarico all'interno del capannone (ZONA A2);
- i) uscita del mezzo dall'area di scarico, lavaggio del mezzo e chiusura dei portoni interni (ZONA A1)
- j) uscita del mezzo dal locale filtro (ZONA A1);
- k) pesa ed uscita del mezzo dall'impianto.

Per quanto concerne la fase di conferimento degli sfalci e delle ramaglie si dovrà seguire la procedura precedentemente descritta (punti da 1 a 3) e dopodiché il mezzo si dirigerà verso la zona di conferimento del verde (ZONA H). Terminata la fase di scarico il mezzo, previa pesatura, potrà uscire dall'impianto.



Figura 25 – Immagine rappresentativa di una bussola a portoni avvolgibili (Fonte: CIVERT);

Una volta che il mezzo avrà superato la zona bussola, scaricherà il carico nell'apposita area di conferimento: una platea rettangolare inclinata a doppia pendenza, munita di muri perimetrali su

tre lati e di pavimentazione impermeabilizzata con apposita resina epossidica resistente agli acidi. Il volume di stoccaggio di materiale è stato dimensionato per essere pari a tre giorni di conferimento (550 m³), in modo tale da non fermare il ricevimento del materiale nel caso insorgessero problematiche. L'area occuperà una superficie complessiva di 175 m². La doppia pendenza del 2% consente la raccolta del percolato formato dalla sostanza organica, effettuata in prossimità della parete terminale dove saranno installati i canali di scolo dedicati e protetti da una griglia metallica. La platea sarà comunque soggetta ad attività di pulizia e lavaggio, in modo da limitare il più possibile le attività fermentative e la conseguente formazione di odori molesti.

In Tabella 5 è riportata la composizione stimata della FORSU in ingresso all'impianto:

<i>Composizione FORSU [% in peso]</i>	
<i>Organico</i>	80%
<i>Inerti</i>	20%

Tabella 5 – Composizione del rifiuto in ingresso;

La FORSU conferita all'impianto avrà quindi al suo interno una percentuale di circa il 20% di materiali "indesiderabili" quali plastiche, metalli ferrosi e non ferrosi, sabbie ed altri inerti. Durante il pretrattamento del materiale sarà di vitale importanza separare l'organico dalle sostanze appena elencate, in modo tale da avere una resa massima durante il processo di digestione anaerobica e per ottenere un compost di qualità alla fine della fase di compostaggio. Dalla platea il rifiuto sarà prelevato tramite benna a polipo su carroponte la cui movimentazione sarà automatica e controllata da PLC, con possibilità di comando da un operatore dalla sala di controllo (ZONA I). Dopo di che il materiale verrà scaricato in una tramoggia in acciaio INOX, dalla quale partirà la linea che ha lo scopo di separare sostanza organica e frazione inorganica. Il pretrattamento dei rifiuti si svolgerà con i seguenti passaggi:

- Lacerazione sacchi;
- Deferrizzazione;
- Biospremitrice;
- Vasca di pre-miscelazione;

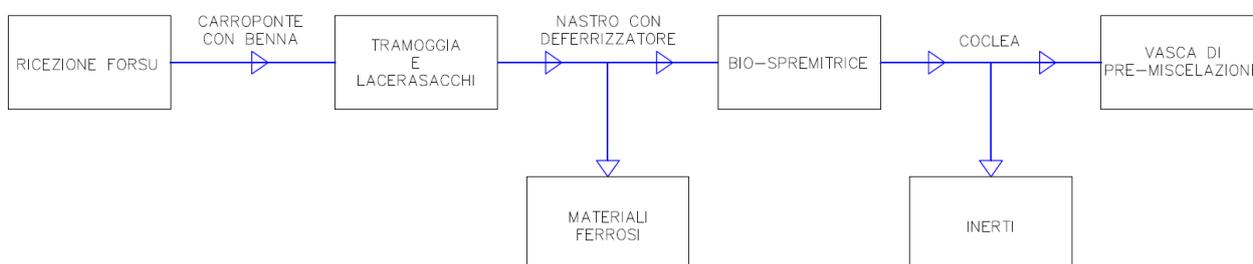


Figura 26 – Schema a blocchi relativo al pre-trattamento del rifiuto;

La tramoggia conferirà il materiale al trasportatore a doppia coclea che lacererà i sacchi, scelto di questa tipologia per evitare che vi sia triturazione e conseguente formazione di piccoli frammenti di plastica che si creano utilizzando dei classici trituratori: la separazione di questi frammenti

risulterebbe più complicata, e si ritroverebbero nel compost alla fine del processo rendendolo di conseguenza non idoneo alla vendita e all'uso. Successivamente il materiale confluirà su di un nastro trasportatore munito di deferrizzatore a magneti permanenti e sistema a correnti indotte, in modo tale da eliminare i metalli ferrosi e non, rispettivamente. In questo modo gli scarti verranno raccolti in appositi cassoni posizionati all'interno del locale adiacente alla bussola (ZONA A3). Una volta eliminati i metalli ferrosi e non ferrosi, il rifiuto verrà caricato nella macchina detta "biospremitrice". Quest'ultima ha lo scopo di separare i restanti materiali inerti dalla parte organica attraverso un'azione di centrifuga, ed è costituita da tre parti funzionali:

- 1) Sezione di alimentazione;
- 2) Area di separazione della materia organica dai materiali inerti;
- 3) Area di scarico;

La sezione di alimentazione è composta da una tramoggia di carico dotata di una coclea dosatrice che porta il materiale al gruppo di separazione. Quest'ultimo è costituito da una struttura cilindrica statica forata, all'interno della quale è posizionato un albero rotante centrale munito di appositi strumenti metallici che "spremono" il rifiuto. La rotazione dell'albero genera una spinta centrifuga, grazie alla quale il materiale organico attraversa il cilindro statico e converge verso l'uscita posta nella parte sottostante del macchinario. I materiali di scarto rimasti derivanti dagli imballaggi a loro volta saranno espulsi grazie ad una coclea di estrazione, dalla parte alta del gruppo di separazione.



Figura 27 – Immagine relativa alla biospremitrice (Fonte: Cesaro MAC Import);

Gli scarti verranno depositati direttamente in un cassone, mentre il materiale organico, ormai diventato una vera e propria purea, verrà espulso dalla parte inferiore della macchina e poi trasportato fino alla vasca di pre-miscelazione. La biospremitrice è in grado di operare sia ad umido che a secco, cioè senza aggiunta di acqua esterna. La configurazione scelta per l'impianto è proprio l'ultima elencata, essendo il biodigestore scelto di tipo "dry". Il non utilizzo di acqua nel processo è infatti uno dei diversi vantaggi che offre questo sistema. La spremitrice ha una capacità di trattamento, rispetto al materiale in ingresso, tra le 10 t/h e le 16 t/h.

Caratteristiche della biospremitrice

<i>Lunghezza [m]</i>	7,41
<i>Larghezza [m]</i>	2,50
<i>Altezza [m]</i>	4,12
<i>Volume tramoggia [m³]</i>	5,40
<i>Potenza Elettrica totale [kW,el]</i>	65,00
<i>Capacità [ton/h]</i>	10,00 – 16,00

Tabella 6 – Dati della biospremitrice (Fonte: Cesaro MAC Import);

La purea ottenuta dal processo di spremitura sarà inviata alla vasca di pre-miscelazione in cemento armato, impermeabilizzata, resistente all'ambiente e dotata di passo uomo per le attività di manutenzione straordinaria. All'interno della vasca saranno presenti opportuni sistemi di miscelazione, così da evitare la stratificazione del materiale e avendo costantemente un prodotto omogeneo. Sarà importante controllare il tenore dei solidi del materiale in questo punto dell'impianto, che dovrà essere compreso tra il 20% e il 30%. Per questa ragione sarà prevista la possibilità di tritare il verde e immetterlo in vasca, o di aggiungere il sovrillo derivante dalla parte relativa al compostaggio. Sarà così possibile correggere i parametri di processo nel caso ce ne fosse bisogno. Infine, tramite un trasportatore a coclea intubata ed ispezionabile, il materiale organico verrà inviato al processo di digestione anaerobica.

3.2.2 SEZIONE DI DIGESTIONE ANAEROBICA

Dopo che il rifiuto conferito passerà dalla prima fase di pretrattamento al fine di separare e/o eliminare dalla frazione organica gli inerti e contemporaneamente ottenere la purea, quest'ultima verrà successivamente inviata alla sezione impiantistica di digestione anaerobica. Dalla vasca di pre-miscelazione, il materiale organico verrà trasportato alla sezione di digestione anaerobica da un trasportatore a coclea. Qui, grazie all'azione di una pompa a pistone, verrà introdotto all'interno del bioreattore dove avverrà il processo di degradazione biologica in assenza di ossigeno con conseguente produzione di biogas. Al fine ottenere una miscela con un tenore di sostanza secca, tra il 20% e il 30%, viene aggiunto materiale strutturante (verde e/o sovrillo) opportunamente tritato avente una pezzatura fine garantendo così un intimo contatto tra il substrato e la biomassa nel reattore.

L'utilizzo del processo di digestione anaerobica di tipo "dry" per il trattamento della FORSU presenta numerosi vantaggi rispetto ad altre tecnologie. I più importanti sono:

- Efficienza nel trattamento dei rifiuti;
- Riduzione dei volumi del bioreattore/digestore;
- Riduzione delle quantità di acque di processo e delle emissioni di inquinanti quali azoto totale, ammoniaca, nitrati e nitriti;
- Elevate produttività di biogas;
- Elevata stabilizzazione della frazione organica, con produzione maggiore di digestato che permette di ottenere maggiori produzioni di compost di qualità;

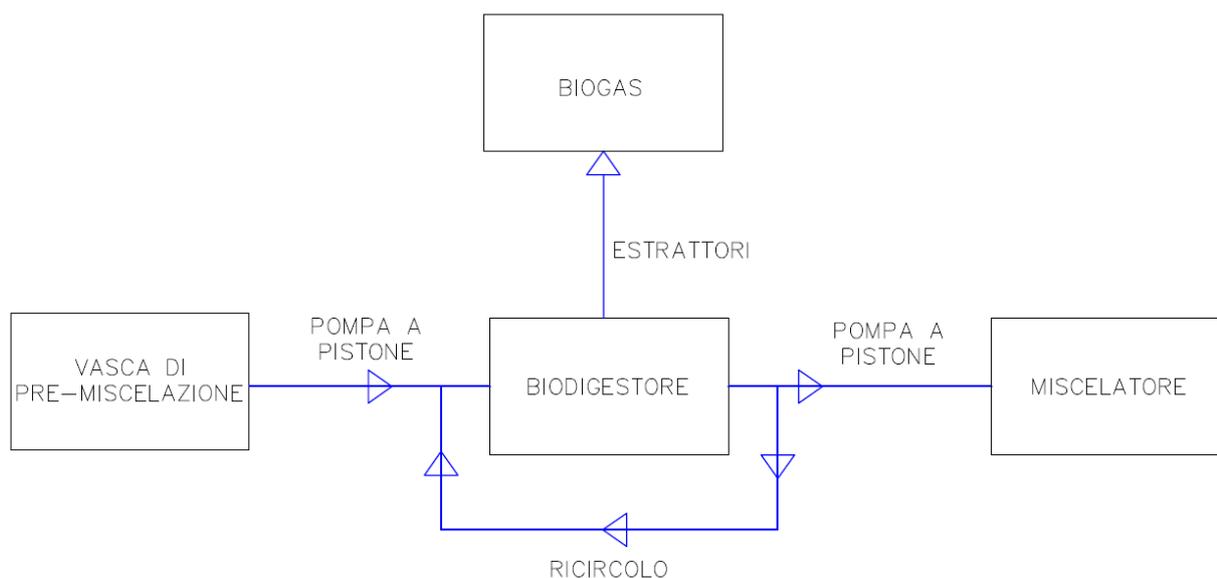


Figura 28 – Schema a blocchi relativo sistema di digestione anaerobica;

In merito all'aspetto tecnico-gestionale, l'impianto in oggetto opererà in regime termofilo con temperature di esercizio di 55°C (con oscillazioni di ± 5 °C) al fine di massimizzare la degradazione delle matrici organiche, soprattutto quelle ligneo-cellulosiche, e quindi incrementare la produzione di biogas. Tali condizioni consentono anche l'igienizzazione del rifiuto conferito abbattendo la carica batterica patogena e, allo stesso tempo, anche di diminuire il tempo di residenza della matrice organica all'interno del reattore. Infatti, rispetto ai 30 giorni previsti in condizioni mesofile il tempo di residenza all'interno del reattore sarà pari a 20 giorni.

Il reattore scelto per l'impianto, detto biodigestore o bioreattore o semplicemente digestore, è del tipo monostadio con flusso a pistone. Questo sistema è noto come Plug Flow Reactor (PFR). Come già preannunciato, una pompa a pistone adatta a materiali solidi caricherà il materiale in continuo nel reattore 24 ore al giorno, 7 giorni su 7. L'ingresso del materiale avverrà sotto il pelo libero del fluido all'interno del reattore, evitando la possibilità che il biogas formatosi possa fuoriuscire dal sistema di caricamento.

Caratteristiche della pompa a pistone

<i>Lunghezza complessiva [m]</i>	5,00
<i>Diametro pistone [m]</i>	0,40
<i>Volume di spinta [m³]</i>	0,25
<i>Potenza [kW]</i>	15,00

Tabella 7 – Dati delle pompe a pistone;

Il biodigestore è costituito da una struttura a forma di parallelepipedo in calcestruzzo armato, con il fondo in acciaio che risulta "sospeso": la struttura è realizzata in modo tale che la culla in acciaio sia appoggiata alle due pareti laterali longitudinali, consentendo così di evitare il contatto tra il fondo del digestore e la platea in cemento su cui poggia il reattore. Tutta la struttura sarà comunque protetta da un involucro esterno, termicamente isolato al fine di ridurre le dispersioni di calore.

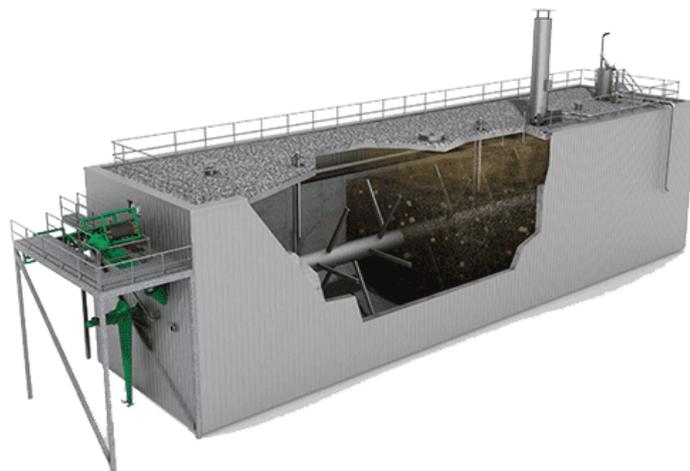


Figura 29 – Immagine del biodigestore (Fonte: Kompogas);

Caratteristiche del digestore anaerobico

<i>Volume geometrico [m³]</i>	2.600
<i>Volume utile [m³]</i>	2.250
<i>Lunghezza [m]</i>	37
<i>Larghezza [m]</i>	11
<i>Altezza [m]</i>	11
<i>Tempo di resilienza [giorni]</i>	20
<i>Temperatura di esercizio [°C]</i>	55 ± 5

Tabella 8 – Dati del digestore anaerobico;

La tipologia di biodigestore scelta prevede un sistema di miscelazione di tipo monoalbero, brevettato dall'azienda leader del settore, la quale permette di:

- 1) Assicurare una miscelazione particolarmente efficiente nella zona di immissione;
- 2) Garantire un'elevata capacità di trasporto dei sedimenti;
- 3) Equalizzare il flusso di estrazione al fine di evacuare i sedimenti;
- 4) Evitare l'accumulo di materiali inerti (sabbia) sul fondo;
- 5) Evitare la formazione di croste superficiali sul letto fluido;

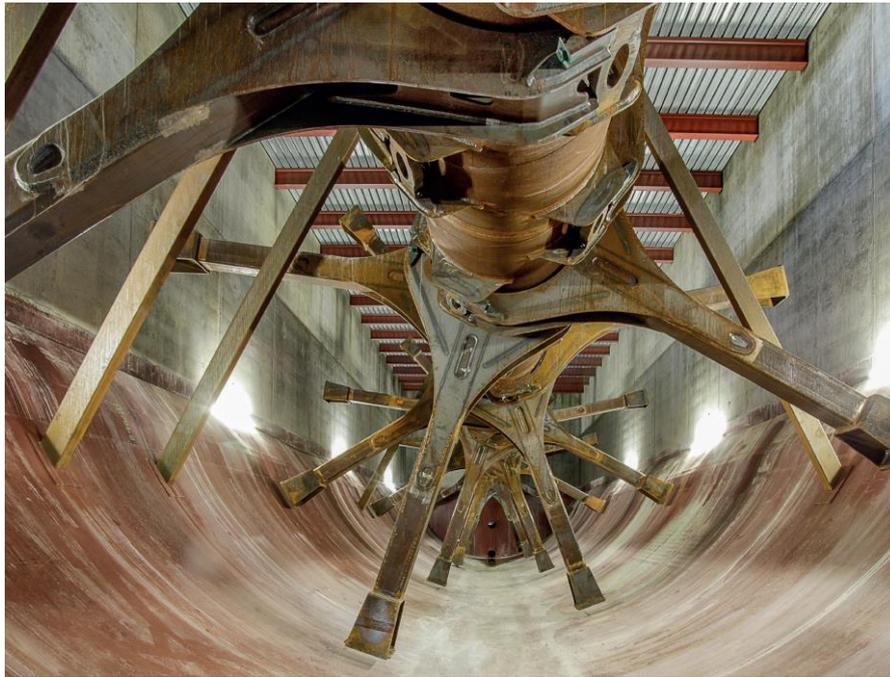


Figura 30 – Sistema di miscelazione monoalbero interno al reattore (Fonte: Thöni);

All'interno dell'involucro dove sarà contenuto il digestore, sarà quindi visibile il fondo del reattore coibentato e munito di cunicoli di passaggio per l'ispezione, dove sarà posizionato il circuito di riscaldamento. Quest'ultimo dovrà garantire la potenza termica necessaria per portare e mantenere il materiale organico alla temperatura desiderata, oltre che un'ottimale distribuzione del calore lungo tutto il reattore. I collettori di distribuzione sono dotati di valvola di regolazione di temperatura e di pressione e la mandata è azionata da comando PLC, inoltre il sistema di riscaldamento è dotato di organi di sicurezza ed intercettazione e vasi di espansione.

Dopo circa 20 giorni all'interno del reattore, il materiale organico digerito verrà estratto da un'altra pompa a pistone posta a valle del reattore. In parte verrà indirizzato alla sezione di compostaggio (ZONA C) e in parte verrà ricircolato in testa al digestore, col fine di garantire un'opportuna inoculazione della massa fresca entrante nel processo e garantire una più rapida azione dei microrganismi metanigeni. Sulla parte superiore del digestore saranno posizionati due soffianti per l'estrazione del biogas prodotto, previa filtrazione tramite filtro a candele ceramiche. Il sistema di controllo in continuo per l'estrazione del biogas agirà sull'inverter delle soffianti tramite PLC, per regolare la portata di estrazione e controllare il valore di pressione, il quale dovrà essere compreso tra i 5 e i 50 mbarg. È prevista la presenza di una valvola di sicurezza, che interverrebbe nel caso in cui la pressione continuasse ad aumentare e superasse il valore massimo di progetto: in tal caso il biogas verrebbe inviato alla torcia di sicurezza e smaltito tramite combustione. Sarà inoltre installata una guardia idraulica come seconda barriera di sicurezza, che scaricherebbe il gas direttamente in atmosfera nel caso in cui la torcia non dovesse essere operativa.

<i>Biogas in uscita dal biodigestore</i>	
<i>Portata biogas [m³/h]</i>	500 – 540
<i>Metano [%]</i>	52 – 62
<i>Anidride carbonica [%]</i>	48 – 38

Tabella 9 – Caratteristiche del biogas estratto dal reattore;

3.2.3 SEZIONE DI COMPOSTAGGIO

Successivamente alla fase di digestione anaerobica seguirà la sezione di compostaggio o digestione aerobica del digestato miscelato con lo strutturante. Tale sezione sarà divisa nelle seguenti zone:

- ZONA C: miscelazione verde con frazione solida digestato;
- ZONA D: bio-ossidazione accelerata;
- ZONA E: maturazione controllata;
- ZONA F: maturazione lenta;
- ZONA G: stoccaggio finale del compost.



Figura 31 – Schema a blocchi relativo al processo di compostaggio;

Come analizzato nel capitolo 2 del presente elaborato, il processo di compostaggio consiste in un trattamento aerobico ed esotermico di matrici organiche svolta da microrganismi. Questo processo porta alla formazione di un materiale ricco di sostanze nutritive, il compost o ammendante compostato misto. Esso garantisce un apporto sia di sostanza organica umidificata (funzione ammendante) sia di elementi fertilizzanti. L'intero processo di compostaggio ha una durata di 90 giorni ed è suddiviso in tre fasi:

1. Bio-ossidazione accelerata: la biomassa verrà inserita all'interno di reattori chiusi, detti "biocelle", dove sarà disposta in cumuli statici e subirà un trattamento aerobico intensivo, durante il quale verrà garantito il corretto apporto di ossigeno e la temperatura raggiungerà circa i 55°C;
2. Maturazione controllata: la biomassa verrà estratta dalle biocelle e verrà disposta in cumuli nella zona del capannone dedicata, dove la ventilazione sarà sempre controllata ma verrà fornito un apporto di ossigeno minore rispetto alla fase precedente;
3. Maturazione lenta: il materiale, che a questo punto risulterà stabilizzato, verrà spostato nella sezione del fabbricato adibita dove la ventilazione non risulterà più, e disposto in cumuli nell'attesa della fine del ciclo di 90 giorni;

Fase di compostaggio	Tempo di durata [giorni]
Bio-ossidazione accelerata, biocelle	10
Maturazione controllata, aie	45
Maturazione lenta	35

Tabella 10 – Suddivisione e durata delle fasi del processo di compostaggio;

Trascorsi i 90 giorni il materiale sarà sottoposto a vagliatura, dopodiché il prodotto finito sarà stoccato in un'area riparata da pioggia e vento e potrà essere utilizzato per:

- Apportare elementi di fertilità in agricoltura e migliorare le caratteristiche chimico-fisiche del terreno;
- Riempire cave;

- Ricoprire siti, ad esempio discariche;
- Produrre combustibili da rifiuti (CDR), previa essiccazione del materiale.

Di seguito si riporta un estratto del decreto legislativo 75/2010, il quale fornisce i riferimenti normativi sull'ammendante compostato misto, o più semplicemente detto compost.

L'art. 2, comma 1 del D. Lgs. 75/2010 afferma: "ai sensi del presente decreto si intendono per «fertilizzanti» i prodotti e i materiali definiti:

[...] z) «ammendanti»: i materiali da aggiungere al suolo in situ, principalmente per conservarne o migliorarne le caratteristiche fisiche o chimiche o l'attività biologica, disgiuntamente o unitamente tra loro, i cui tipi e caratteristiche sono riportati nell'allegato 2."

In particolare, il materiale prodotto e stoccato in questa zona, secondo l'Allegato 2 D. Lgs. 75/2010, è definito come ammendante compostato misto (ACM) poiché derivante da un processo di trasformazione e stabilizzazione controllata di rifiuti organici. L'art. 4, comma 1 del decreto afferma: "I fertilizzanti possono essere immessi in commercio se sono adempiute le prescrizioni riportate nel regolamento (CE) n. 2003/2003 e nel presente decreto". Inoltre l'Allegato 2 del decreto definisce i criteri di valutazione, i requisiti e le indicazioni richiesti al fine di ottenere un prodotto definibile ammendante compostato misto, qualora questo risultasse fuori specifica (CER 19.05.03) sarà opportunamente smaltito tramite ditta autorizzata.

MISCELAZIONE

La sezione di miscelazione (ZONA C) sarà situata allo scarico del digestore anaerobico. Qui il digestato sarà estratto da una pompa a pistone e confluirà in un miscelatore a doppia coclea. Tramite pala gommata, un operatore aggiungerà al miscelatore del materiale ligneo-cellulosico appositamente tritato in precedenza e proveniente dalla tettoia di stoccaggio del verde (ZONA H). La frazione verde addizionata non dovrà essere inferiore al 30% (in peso sul tal quale) e, nel caso si riutilizzi sovrappiù derivante dalla vagliatura del prodotto finale, il quantitativo utilizzato non dovrà superare il 50% della frazione verde. Lo strutturante da aggiungere e il materiale miscelato saranno stoccati in questa sezione del fabbricato principale (ZONA C), in attesa di essere trasportati.

Al fine di produrre compost di qualità, la miscela in uscita dal miscelatore sopra citato dovrà avere:

- Umidità iniziale compresa tra 50 e 65% in peso;
- Rapporto C/N (carbonio su azoto) nel range di 20 e 35;

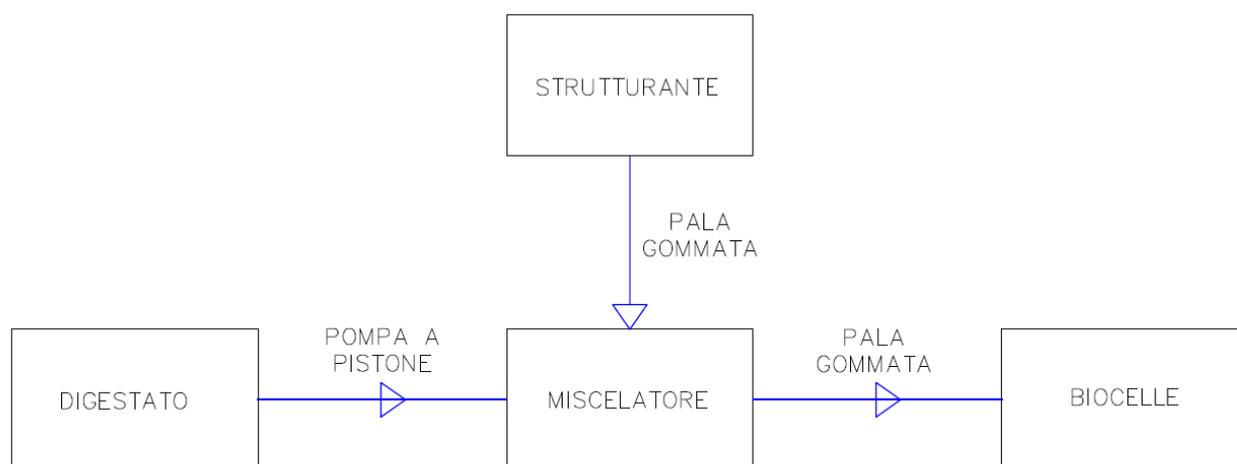


Figura 32 – Schema a blocchi relativo alla miscelazione in uscita dal reattore;

BIO-OSSIDAZIONE ACCELERATA

Una volta ottenuta la miscela, un operatore su pala gommata si occuperà di trasportarla all'interno delle dieci biocelle presenti nell'impianto (ZONA D). Le biocelle sono dei reattori chiusi a sezione rettangolare, dove la ventilazione è controllata costantemente e temperatura, umidità e tenore di ossigeno vengono monitorati. Il materiale organico permarrà 10 giorni all'interno di questi tunnel, dove avverrà la fase chiamata "bio-ossidazione accelerata".

Le biocelle, che saranno disposte in batteria, avranno pareti in calcestruzzo isolate termicamente e saranno dotate di portone metallico termoisolato a tenuta stagna. Quest'ultimo sarà il punto di accesso per l'operatore nell'ambiente.



Figura 33 – Immagine raffigurante delle biocelle in fase di realizzazione (Fonte: Smeda);

In Tabella 11 si riportano le caratteristiche dimensionali delle biocelle.

Caratteristiche dimensionali di biocelle e cumuli

<i>Numero biocelle</i>	10
<i>Larghezza biocella [m]</i>	7,50
<i>Lunghezza biocella [m]</i>	13,50
<i>Altezza biocella [m]</i>	5,00
<i>Volume biocelle [m³]</i>	506,25
<i>Altezza cumulo [m³]</i>	2,60
<i>Volume cumulo [m³]</i>	234,00

Tabella 11 – Caratteristiche delle biocelle;

Al fine di effettuare un'accurata e ottimale ventilazione, ogni biocella sarà dotata di un ventilatore a inverter dedicato che garantirà una portata massima d'aria pari a 5.000 m³/h e potenza installata pari a 15 kW,el. Sarà così possibile eseguire correttamente la fase di bio-ossidazione accelerata della materia organica. La ventilazione potrà operare sulla singola biocella in completo ricircolo, in ricircolo parziale o in assenza di ricircolo con completo ricambio di aria. L'aria necessaria sarà prelevata dalla zona frontale ai portoni, verrà insufflata dal pavimento e ripresa dal soffitto. Questo

grazie all'adozione di un particolare sistema per il controllo della ventilazione: nella pavimentazione delle biocelle saranno disposti ed annegati nel calcestruzzo dei tubi in PVC muniti di ugelli tronco conici per l'espulsione. Questi tubi saranno disposti longitudinalmente e a passo costante tra loro.



Figura 34 – Sistema di aerazione e raccolta percolati a pavimento (Fonte: MVTplant);

Il pavimento, così realizzato, sarà carrabile in quanto dovrà consentire il passaggio dei mezzi (Figura 35). Questo sistema di tubi avrà un duplice effetto: permetterà l'insufflazione dell'aria, oltre che la raccolta di possibili percolati che solitamente si producono nelle fasi iniziali di deposito della biomassa (Figura 34). Il circuito appena descritto sarà inoltre collegato alla rete di raccolta del liquido mediante guardie idrauliche, questo al fine di evitare che l'aria di processo transiti nelle condotte di raccolta del percolato.



Figura 35 – Pavimentazione delle biocelle a fine realizzazione (Fonte: MVTplant);

È stato comunque stimato che la quantità di percolato prodotto in questa fase all'interno delle biocelle sarà minima: ipotesi del tutto garantita dalla tecnologia dry scelta per il processo di digestione anaerobica, la quale, richiedendo un alto tenore di sostanza secca, fa in modo di ridurre al minimo la quantità di acqua di processo. Inoltre, com'è possibile notare dalla Figura 34, il sistema descritto risulterà essere di facile manutenzione poiché ogni tubo di adduzione dell'aria sarà accessibile ed ispezionabile. In questo modo, concluso il ciclo di bio-ossidazione accelerata, qualora fosse necessario sarà possibile ripristinare facilmente e velocemente il sistema prima di eseguire nuovamente il caricamento della biocella. Gli accorgimenti appena descritti consentiranno di garantire, durante la fase gestionale, l'assenza di intasamenti del sistema di insufflazione dell'aria e che il percolato possa essere opportunamente allontanato. La variazione legata al funzionamento del sistema di ventilazione controllata determina il susseguirsi delle diverse fasi che compongono il processo di bio-ossidazione della materia organica, riportate in Tabella 12.

FASE	DESCRIZIONE	TEMPO [giorni]	MODALITA' DI AERAZIONE
Carico ed Omogeneizzazione	Carico: il materiale organico proveniente dalla miscelazione (ZONA C) viene portato tramite pala gommata all'interno della biocella. Omogeneizzazione: immissione aria da pavimento fino al raggiungimento del livello minimo di O ₂ .	1	Ricircolo totale
Riscaldamento	La temperatura sale sopra i 55°C, e viene variata la portata di aria insufflata.	1	Aspirazione parzializzata
Igienizzazione	La temperatura viene mantenuta costantemente a valori > di 55°C.	3	Aspirazione parzializzata
Compostaggio	La temperatura viene mantenuta tra 45 e 50°C.	4	Aspirazione parzializzata
Raffreddamento e Scarico	Raffreddamento: il materiale viene raffreddato grazie al ricambio totale di aria. Scarico: al decimo giorno il portone viene aperto e un operatore con pala gommata svuota la biocella.	1	Aspirazione parzializzata

Tabella 12 – Fasi del processo di bio-ossidazione;

Al fine di monitorare i principali parametri di processo relativi alla fase di bio-ossidazione accelerata, ogni biocella sarà dotata di 3 sonde di temperatura PT100 e di uno strumento che analizzerà in continuo la percentuale di ossigeno. In questo modo sarà possibile analizzare e verificare l'omogeneità della temperatura dei cumuli, oltre che regolare l'aria di processo necessaria in maniera ottimale. All'interno della biocella sarà inoltre presente un sistema di umidificazione che servirà ad assicurare l'umidità ottimale ai cumuli in modo da evitare un'essiccazione precoce che inibirebbe tutti i processi di maturazione. Il tutto sarà gestito da un programma di gestione automatico. Questo, grazie alla lettura in continuo della temperatura e della percentuale di ossigeno

rilevata, interverrà in automatico sulle serrande e sulla velocità dei ventilatori in modo da stabilizzare il sistema sui parametri ottimali richiesti.

MATURAZIONE CONTROLLATA

Concluso il ciclo di bio-ossidazione accelerata, la biomassa sarà prelevata dalle biocelle tramite pala gommata e poi trasportata alla ZONA C, dove subirà un processo di vagliatura caratterizzato da una sezione compresa tra 0 e 20 mm. Il sovrallo prodotto sarà stoccato in un cumulo adiacente al vaglio, e sarà in parte inviato alla tramoggia a monte del processo di pre-trattamento del rifiuto in ingresso all'impianto, e in parte al miscelatore in uscita del digestore anaerobico. Successivamente, il materiale vagliato sarà prelevato tramite pala gommata da un operatore e sarà disposto in cumuli nella sezione del fabbricato dedicata alla fase di maturazione controllata (ZONA E), dove rimarrà per 45 giorni. Questa zona, posta in depressione rispetto all'ambiente esterno, sarà dotata di pavimento areato a servizio della singola platea. Questo sarà realizzato con tubazioni in PVC, del tutto simili a quelle installate nelle biocelle, infatti anche in questo caso le tubazioni saranno annegate nel getto del pavimento che dovrà essere carrabile. L'aria necessaria al processo sarà assicurata grazie a tre ventilatori centrifughi, che gestiranno una portata massima di 16.000 m³/h e avranno una potenza di 30 kW ciascuno. La platea di maturazione controllata sarà divisa in 5 aree di deposito, ed ogni area potrà essere insufflata con aria attraverso il pavimento in maniera indipendente.



Figura 36 – Cumuli di materiale sottoposto a maturazione (Fonte: L'Immediato);

L'aria insufflata a pavimento verrà prelevata dall'aria del locale stesso effettuando quindi un ricircolo costante. Le tubazioni del pavimento areato saranno leggermente inclinate verso il corridoio parallelo alle biocelle in modo da poter drenare eventuali condense o liquidi. Il materiale stoccato in questa zona di maturazione controllata avrà un'umidità inferiore al 50%, la formazione di liquidi, pertanto, sarà molto limitata. Le tubazioni inclinate di ogni area di stoccaggio saranno raccordate da un collettore nella loro parte terminale, da questo collettore dipartirà un condotto

che terminerà nelle guardie idrauliche delle biocelle. I liquidi drenati saranno miscelati nella guardia idraulica assieme ai percolati delle biocelle e quindi verranno convogliati nella vasca di sedimentazione dedicata.

MATURAZIONE LENTA

Il materiale ormai stabilizzato sarà trasportato da un operatore, sempre tramite pala gommata, presso la sezione di maturazione lenta (ZONA F) e disposto in cumuli. In quest'area non sarà più presente il sistema di ventilazione controllata, il materiale rimarrà stoccato per 35 giorni in un ambiente ventilato naturalmente. Concluso il ciclo, il compost sarà trasportato al macchinario che effettuare la vagliatura finale tramite vaglio a tamburo, la cui sezione sarà compresa tra 5 e 10 mm.

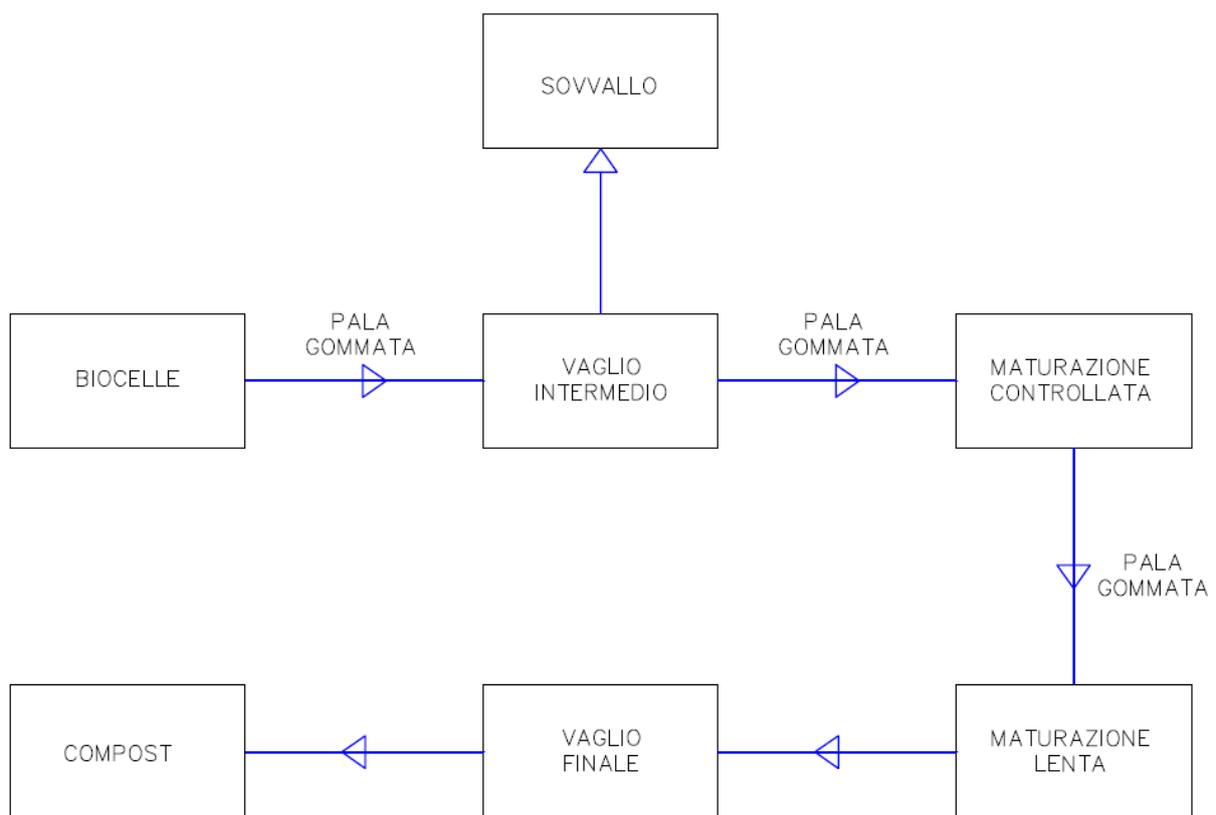


Figura 37 – Schema a blocchi relativo alle ultime due fasi del processo di compostaggio;



Figura 38 – Immagine di un vaglio a tamburo (Fonte: SEKO);

Il materiale uscente sarà trasportato, tramite operatore con pala gommata, nell'adiacente tettoia di stoccaggio del compost (ZONA G) mentre il sovrallo sarà stoccato in un cumulo adiacente alla macchina ed avviato a smaltimento (CER 19.12.12). Il materiale prodotto e stoccato in ZONA G, secondo l'Allegato 2 D. Lgs. 75/2010, è definito come ammendante compostato misto (ACM) poiché derivante da un processo di trasformazione e stabilizzazione controllata di rifiuti organici, costituiti dalla frazione organica dei rifiuti solidi urbani provenienti da raccolta differenziata.



Figura 39 – Immagine raffigurante dei cumuli di compost maturo (Fonte: riciclanews);

3.2.4 PURIFICAZIONE DEL BIOGAS, UPGRADING E RECUPERO CO₂

Il biogas prodotto all'interno del digestore sarà estratto dai soffianti posizionati sopra la struttura del reattore, e subirà le seguenti operazioni:

- Pretrattamento;
- Upgrading;

Nella sezione di pretrattamento avverranno dei processi finalizzati alla riduzione del tenore di idrogeno solforato (H₂S), dei composti organici volatili (COV), dell'umidità e all'eliminazione di inquinanti residui. Successivamente il biogas attraverserà la sezione di upgrading basato sulla tecnologia a membrane selettive ad alta pressione (HPSM) (15-20 barg). Al termine del processo gli output saranno il biometano e l'anidride carbonica, recuperata e liquefatta dall'impianto apposito. Il biometano ottenuto a questo punto avrà caratteristiche chimico fisiche adeguate, e subirà un'ulteriore compressione in modo tale da raggiungere dei valori di pressione tali da poter essere immesso nella rete di distribuzione ad alta pressione di SNAM (64 barg).

ESTRAZIONE DEL BIOGAS

Il biogas prelevato dal digestore anaerobico subirà una prima filtrazione effettuata per mezzo di un filtro a candele ceramiche al fine di eliminare il particolato (grado di filtrazione di circa 20 - 30µm) il quale normalmente è trascinato dal biogas. Questa tipologia di filtro, costruito in acciaio INOX 304, è costituito da un vaso di contenimento con scarico di fondo automatico della condensa prodotta. A valle del primo sistema di filtrazione il biogas sarà aspirato e compresso tramite l'azione di due soffianti per biogas. Le soffianti saranno poste in parallelo, azionate da motore elettrico con inverter. La portata estratta dal digestore anaerobico sarà regolata dal sistema PLC garantendo così le condizioni di pressione ottimali e di sicurezza.



Figura 40 – Immagine di un soffiante per l'estrazione del biogas (Fonte: DirectIndustry);

Caratteristiche relative ai soffianti del biogas

Pressione di aspirazione [mbar]	10 - 40
Pressione di mandata [mbar]	200
Motore elettrico [kW,el]	7,5

Tabella 13 – Dati relativi ai soffianti del biogas;

PROCESSO DI DESOLFORAZIONE, DEUMIDIFICAZIONE E CARBONI ATTIVI

Dopo essere stato estratto e aver subito una prima filtrazione grossolana, il prodotto uscente dal digestore anaerobico subirà un'ulteriore serie di trattamenti in modo tale da abbattere la presenza di sostanze indesiderate, e di effettuare in sicurezza il processo di upgrading che porterà alla separazione del metano e dell'anidride carbonica.



Figura 41 – Schema a blocchi relativo al processo di purificazione del biogas;

Il biogas sarà inviato al processo di desolfurazione di tipo microbiologico. Tale sistema di purificazione che consente l'abbattimento dell' H_2S , è operato da microrganismi solfo-riduttori aerobici che lo convertono in solfuri e solfati. La desolfurazione si svolge in reattori verticali, aventi corpi di riempimento atti a garantire sia un supporto per la biomassa sia l'aumento della superficie di contatto tra quest'ultima e il biogas, incrementando le prestazioni del sistema.

All'interno dei reattori avviene la reazione di riduzione in ambiente acquoso: a tal fine la torre sarà predisposta di un sistema di rampe a spruzzo che consentiranno di nebulizzare la soluzione acquosa, e garantire l'apporto di nutrienti necessari alla crescita della biomassa. La soluzione acquosa esausta sarà convogliata in un serbatoio interrato dedicato e smaltita periodicamente tramite ditta autorizzata.



Figura 42 – Immagine raffigurante una torre di lavaggio e il relativo sistema di sedimentazione (Fonte: Airdep);

Il sistema sarà provvisto di appositi sistemi di misura quali controllo del pH, della temperatura, del tenore di ossigeno al fine di garantire le ottimali condizioni ambientali di crescita e sviluppo della flora batterica che consentiranno una rimozione dell'idrogeno solforato generalmente non inferiore al 90%. Il biogas trattato in uscita da questa sezione di impianto avrà un tenore di idrogeno solforato minore o uguale a 200 ppm.

<i>Materiale di costruzione</i>	Polipropilene
<i>Temperatura di progetto [°C]</i>	30-35
<i>Dimensioni di ingombro [m]</i>	D: 2,8; H: 11
<i>Concentrazione H₂S in ingresso [ppm]</i>	700-1.000
<i>Concentrazione H₂S in uscita [ppm]</i>	≤200
<i>Acqua richiesta [m³/h]</i>	0,12
<i>Scarico acque esauste [m³/h]</i>	0,15

Tabella 14 – Dati relativi al desolforatore;

Il biogas in uscita dal trattamento di desolforazione, ad una temperatura compresa tra i 20°C ed i 30°C, sarà sottoposto a raffreddamento fino al raggiungimento del range di 3°C-5°C grazie ad uno scambiatore di calore. Durante tale fase avverrà l'allontanamento dell'umidità, oltre che dei composti residui solubili in acqua che potrebbero portare ad incrostazioni e/o corrosioni alle componenti meccaniche a valle.

Il biogas che si otterrà a questo punto, prima di essere inviato alla sezione di upgrading, subirà inoltre un trattamento di filtrazione su carboni attivi. Grazie a questo processo sarà possibile effettuare un'ulteriore rimozione dell'H₂S, dei silossani e dei COV, i quali saranno assorbiti. La rimozione dell'H₂S dal biogas si basa su un processo chimico di conversione, mentre la rimozione dei silossani si basa sull'adsorbimento fisico sul carbone attivo. A causa della non-selettività dell'adsorbimento, non solo i silossani verranno adsorbiti dal sistema filtrante. Per questa ragione la filtrazione basata sui carboni attivi viene effettuata a valle di altri trattamenti di purificazione e pulizia del flusso di biogas, come il processo di desolforazione menzionato in precedenza. La temperatura e l'umidità del gas influenzano l'efficienza di separazione del carbone attivo: la deumidificazione prevista prima della filtrazione a carboni attivi servirà proprio ad evitare che il materiale filtrante si saturi velocemente con l'acqua^[15].



Figura 43 – Immagini relative ad un sistema di filtrazione a carboni attivi (Fonte: Conveco);

Caratteristiche del biogas in uscita dal sistema a carboni attivi

Portata di biogas [Nm ³ /h]	500-540
Tenore di CH ₄ [%]	52-62
Tenore di CO ₂ [%]	48-38
Tenore di O ₂ [%]	0,10-1,00
Tenore di N ₂ [%]	Tracce
H ₂ O [%]	0,80
Tenore di H ₂ S [ppm]	≤10
Tenore di COV [mg/m ³]	≤10

Tabella 15 – Dati relativi al biogas risultante post filtrazione con carboni attivi;

UPGRADING, COMPRESSIONE DEL BIOMETANO E RECUPERO DELLA CO₂

Il biogas, purificato dagli inquinanti, sarà inviato alla sezione di compressione che lo porterà alla pressione di esercizio richiesta dal sistema di upgrading a membrane selettive, il quale opera normalmente tra i 15 barg e i 20barg. I compressori saranno pilotati da inverter.

Il biogas compresso sarà raffreddato mediante un sistema di raffreddamento dopo ogni stadio di compressione mediante scambiatori di calore, tipo acqua/gas, installati a bordo del telaio del compressore. Nella tabella sottostante sono riportate le principali caratteristiche dei compressori installati.

Caratteristiche della sezione di compressione del biogas

Portata di biogas [Nm ³ /h]	500-540
Pressione di aspirazione [barg]	± 0,15
Pressione di mandata [barg]	± 17
Potenza motore elettrico [kWe]	160

Tabella 16 – Dati relativi alla prima sezione di compressione;

SISTEMA A MEMBRANE

Il processo di purificazione e upgrading del biogas consiste nella rimozione dell'anidride carbonica, in modo tale da ottenere una corrente gassosa ricca in metano avente tenore superiore al 97%. Il sistema di upgrading sarà alloggiato all'interno di un container (ZONA N), il quale avrà dimensioni complessive di 12 [m] x 2,6 [m] x 2,35 [m]. I sistemi a membrana si basano sulla permeabilità dei gas rispetto alle diverse tipologie di membrane, solitamente di tipo polimerico. La separazione con membrane più utilizzata nel settore è della tipologia a permeazione gas-gas ad alta pressione, in cui le fasi ai due lati della membrana sono entrambe gassose^[16]. Questo specifico processo di upgrading è chiamato "high pressure selective membranes" (HPSM) e sfrutta particolari membrane costituite da materiali permeabili alla CO₂ (g), all'H₂O(g) e all'NH₃ (g), all'H₂S e all'O₂, ma poco al CH₄ e all'N₂. La frazione di gas che diffonde più facilmente (permeato) si separa dalla corrente principale (ritentato). In questo modo è possibile ottenere un flusso di permeato con una concentrazione di metano superiore al 97%, le cui perdite durante il processo sono molto esigue grazie all'elevata selettività della membrana utilizzata, avente efficienze di separazione che risultano superiori al 99,3%. L'efficacia di questo sistema non dipende solo dalla permeabilità del materiale costituente la membrana, solitamente acetato di cellulosa o poliammidi aromatici, ma anche e soprattutto dalla pressione: la forza motrice del processo è data dalla differenza di pressioni parziali del gas lato alimento e lato permeato^[16].

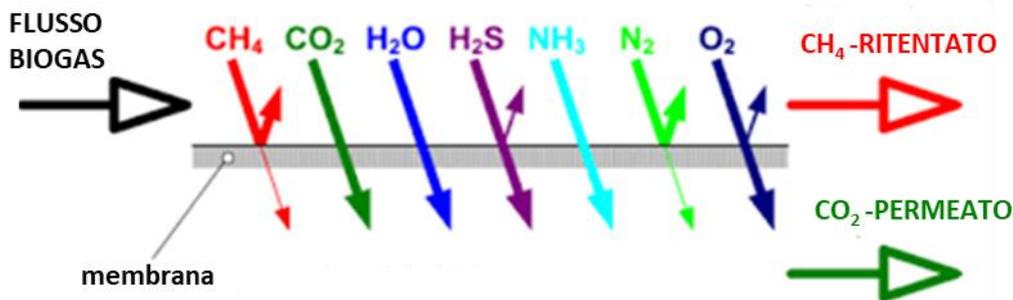


Figura 44 – Schema raffigurante il processo di filtrazione a membrane selettive ad alta pressione (Fonte: [16]);

Il processo di separazione è infatti costituito da tre stadi. I primi due incrementano il contenuto di metano fino ad oltre il 97%, mentre il terzo stadio recupera dal permeato del primo stadio il metano che andrebbe perso e lo ricicla in aspirazione al sistema di compressione.

Grazie al controllo del processo in continuo, comandato da PLC, si avrà l'ottimizzazione del processo tramite l'attivazione e/o la chiusura dei vari moduli a membrana, regolando altresì la potenza del compressore tramite inverter. Il biometano in uscita, previo controllo dei parametri di qualità principali, se risulterà conforme all'immissione in rete sarà inviato alla sezione di "compressione finale, controllo qualità, misura fiscale e immissione nella rete del gas naturale" (ZONA P). Il gas permeato residuo, denominato generalmente "offgas", risulterà avere un tenore di anidride carbonica maggiore del 98,5% e un tenore in metano non superiore all'1,5%.

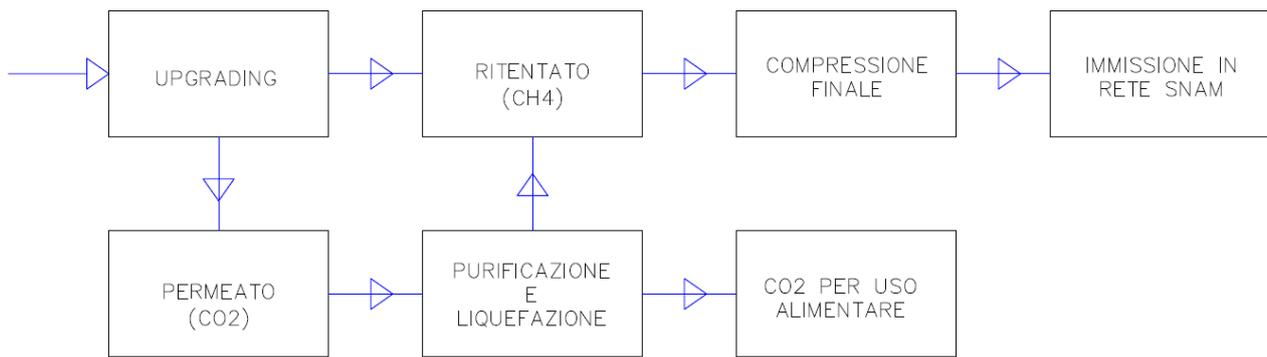


Figura 45 – Schema a blocchi relativo alla produzione di biometano ed anidride carbonica;

SEZIONE DI RECUPER OFFGAS E PURIFICAZIONE CO₂

L'offgas derivante dal processo di upgrading sarà inviato alla sezione di recupero dell'anidride carbonica. Qui la CO₂ sarà liquefatta e verrà stoccata in due serbatoi criogenici. La quota dell'1,5% di metano ancora presente nel flusso di CO₂ verrà recuperato e immesso nella rete del gas naturale.

Le principali apparecchiature meccaniche di cui è costituito il processo sono:

- Compressore offgas;
- Essiccatore misto frigorifero/adsorbimento: consentirà di ottenere un punto di rugiada sotto pressione di -30°C così di evitare fenomeni di congelamento nel liquefattore, essendo la temperatura di evaporazione del suo refrigerante pari a -25°C;
- Liquefattore: il gas compresso ed essiccato sarà inviato ad un evaporatore refrigerante con una temperatura di esercizio di -25°C, in tali condizioni l'anidride carbonica si presenta allo stato liquido (T -15°C; P 23 bar) mentre il metano, che rimarrà allo stato gassoso, verrà quindi recuperato;

COMPRESSIONE FINALE E IMMISSIONE NELLA RETE DEL GAS NATURALE

Il biometano sarà inviato alla sezione di compressione finale se possiederà le caratteristiche chimico-fisiche conformi per l'immissione in rete. In questa sezione il biometano sarà portato alla pressione di circa 64 barg e inviato alla sezione di misura fiscale (cabina R.E.MI.), per poi essere immesso nella rete SNAM. La compressione sarà effettuata tramite due compressori, del tipo a pistoncini non lubrificati, posti in parallelo e dotati ognuno di by-pass. Il corpo compressore sarà raffreddato ad acqua e il gas sarà refrigerato tramite scambiatore di calore a fascio tubiero, del tipo gas/acqua, dopo ogni stadio di compressione. I compressori saranno posizionati in un container metallico (ZONA N).

Caratteristiche della sezione di compressione del biometano

Portata [Nm ³ /h]	230 - 280
Pressione di aspirazione [barg]	16
Pressione di mandata [barg]	64
Potenza nominale del motore [kW]	37

Tabella 17 – Dati relativi alla seconda sezione di compressione;

SISTEMA DI VENTILAZIONE E PURIFICAZIONE DELL'ARIA

I processi di trattamento rifiuti sono attività soggette a peculiari emissioni odorigene dovute alla presenza di matrici fermentabili. Occorre quindi prevedere un accurato controllo delle condizioni ambientali sia interne che esterne allo stabilimento. Il controllo di queste emissioni costituisce uno dei punti chiave per la buona progettazione e gestione dell'impianto. I locali dell'impianto in cui si potrebbero generare odori molesti saranno provvisti di sistema di captazione e rinnovo aria, inoltre saranno mantenuti costantemente in leggera depressione per evitare la dispersione degli odori all'esterno. Queste criticità si riscontreranno nella sezione di stoccaggio della FORSU, a causa dello sviluppo di attività fermentative sia di tipo aerobico che anaerobico. La sezione di "ricezione e pretrattamento" (ZONA A2) sarà separata dall'ambiente esterno grazie alla predisposizione di apposito locale filtro "bussola", come già analizzata in precedenza. L'aria aspirata dalle sezioni di ricezione, pretrattamento e bussola, prima di essere inviata alla sezione di purificazione verrà impiegata come aria di processo per la zona ospitante la fase di bio-ossidazione accelerata.

In generale l'impianto di ventilazione sarà costituito da due dorsali principali. Una aspirerà aria dalla zona di maturazione controllata, e una aspirerà aria dalla zona di ricezione FORSU, pretrattamenti e bussola. Questi due flussi di aria, opportunamente bilanciati mediante due serrande, garantiranno i ricambi aria di progetto nei diversi ambienti. L'aspirazione delle arie esauste dalle varie zone del capannone verrà effettuata tramite l'utilizzo di due ventilatori, posizionati prima degli scrubber ad acqua. Tale configurazione permetterà di fornire alla corrente fluida la prevalenza necessaria per le successive operazioni di purificazione, e allo stesso tempo consentirà l'effettiva depressione dei locali e l'aspirazione dell'intera portata di progetto.

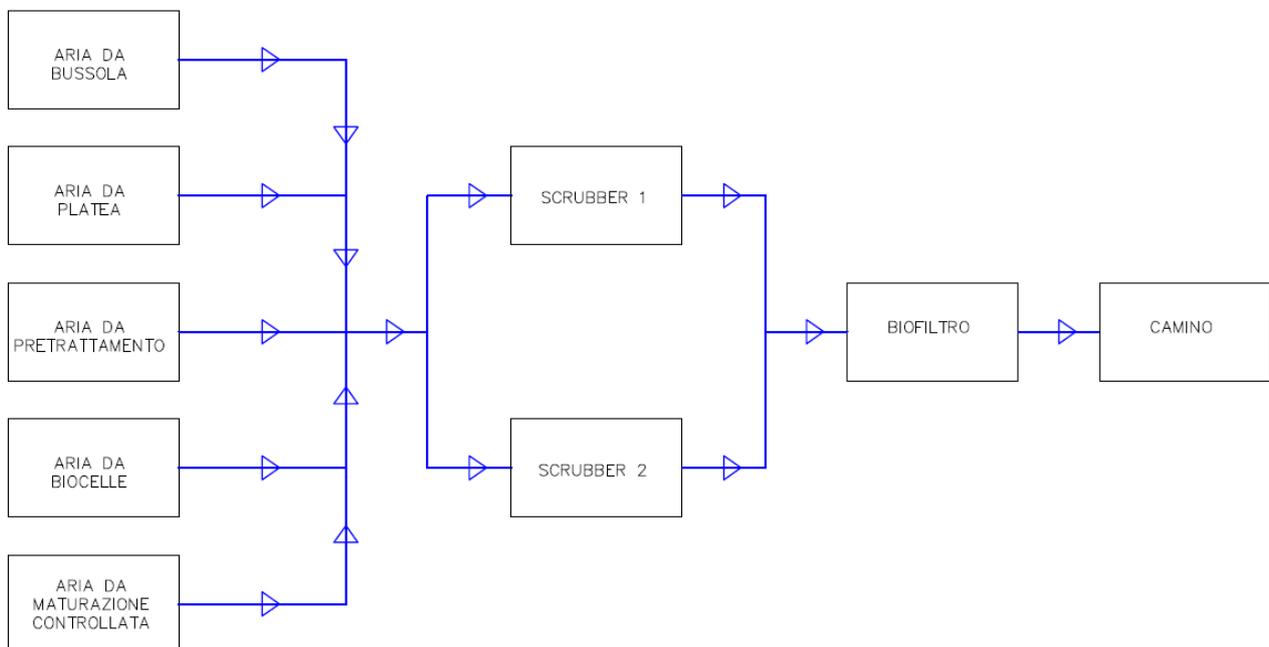


Figura 46 – Schema a blocchi relativo al sistema di ventilazione e pulizia dell'aria di processo;

SCRUBBER

L'aria captata dalle varie sezioni dell'impianto sarà convogliata alle due torri di lavaggio o scrubber a letto fisso ad acqua. Gli scrubber, che saranno in acciaio AISI 304, consentiranno di ridurre la concentrazione delle sostanze odorigene presenti nella corrente d'aria inquinata entrante grazie alla tecnologia dell'abbattimento ad umido. Come anticipato in precedenza, l'aria satura deriva dalle biocelle, dalle aree di maturazione controllata, dalla zona di stoccaggio FORSU e dalla linea di pretrattamento rifiuti. La rimozione delle sostanze inquinanti avviene per dissoluzione nel liquido di lavaggio (acqua). La torre verrà attraversata dal basso verso l'alto. La corrente gassosa entrerà quindi attraverso la flangia di entrata, posta nella parte inferiore della torre. Successivamente, l'aria dovrà intraprendere la risalita e attraversare diversi letti di corpi di riempimento dove verrà in contatto con l'acqua di lavaggio ed eventuali reagenti chimici nebulizzati tramite ugelli. Nella parte superiore della torre sarà presente un separatore di gocce lamellare che consentirà di trattenere l'acqua per poi farla condensare e cadere nella vasca presente sul fondo della colonna. La vasca sarà abbinata ad una pompa che permetterà il funzionamento in continuo del processo di lavaggio appena descritto^[17]. L'assorbimento o lavaggio dei gas permette quindi la rimozione delle componenti odorigene, tramite il loro trasferimento in fase liquida.



Figura 47 – Immagine relativa agli Scrubbers di lavaggio dell'aria (Fonte: MVTplant);

La torre di lavaggio sarà predisposta per l'aggiunta di un reagente, ovvero di acido solforico, qualora durante l'esercizio dell'impianto il semplice lavaggio ad acqua non risultasse sufficiente per l'abbattimento del tenore di ammoniaca. Il mantenimento di un adeguato trattamento dell'aria esausta e della continuità del processo sarà garantita, in caso di manutenzione straordinaria, dalla presenza di due torri di lavaggio o scrubber. Una volta compiuto il processo di lavaggio, l'aria trattata sarà inviata al biofiltro.

La tabella sottostante riporta i parametri dimensionali caratteristici degli scrubber.

Caratteristiche relative alle torri di lavaggio dell'aria

<i>Unità previste</i>	2
<i>Portata aria cad. [m³/h]</i>	70.000
<i>Diametro [m]</i>	2,9
<i>Altezza [m]</i>	11
<i>Velocità di attraversamento [m/s]</i>	1,89
<i>Tempo di contatto [s]</i>	>1 sec
<i>Potenza singolo ventilatore [kW]</i>	104
<i>Rapporto fluido abbattente totale/inquinante [l/m³/h]</i>	(1,5 – 2)/1.000 m ³
<i>Acqua esausta a smaltimento totale [m³/anno]</i>	800

Tabella 18 – Dati relativi agli Srcubbers;

BIOFILTRO

La biofiltrazione risulta essere particolarmente efficace nella rimozione dei composti rilasciati dalla sostanza organica durante il ciclo produttivo dell'impianto, come ad esempio solfuri, composti azotati, aldeidi, chetoni, alcoli ed eteri. I sistemi di biofiltrazione a letto filtrante sono dei veri e propri letti di materiale naturale (materiale ligneo cellulosico, compost, torba), attraverso i quali viene fatto passare il flusso d'aria da depurare. In questo processo viene sfruttato l'effetto di una popolazione batterica capace di degradare le componenti inquinanti per mezzo di un processo aerobico, il quale permette la conversione delle molecole odorogene in anidride carbonica ed acqua^[18]. L'umidità del letto è il parametro più importante per garantire un esercizio ottimale del biofiltro, infatti tale valore deve essere mantenuto tra il 40% ed il 60% in peso. Per questa ragione è stata prevista l'installazione di un sistema di umidificazione automatico, che irrorerà il materiale qualora il valore di umidità scendesse al di sotto di quello di set-point, che sarà impostato sul 55%. Il biofiltro sarà realizzato di forma rettangolare e avrà tre pareti fisse, mentre la quarta risulterà mobile al fine di poter svolgere le attività manutentive, sia ordinarie che straordinarie, con facilità. I muri saranno di altezza pari a 2,8 m mentre l'altezza del materiale filtrante risulterà di 1,9 m. L'aria da depurare in arrivo dalle torri di lavaggio ad acqua entrerà in un plenum posto nella parte inferiore della struttura del biofiltro stesso. I flussi d'aria verranno così gestiti e convogliati alla pavimentazione forata che si occuperà dell'insufflazione dell'aria, configurata al fine di garantire una distribuzione omogenea del flusso gassoso evitando la formazione di percorsi preferenziali che potrebbero causare delle diminuzioni delle prestazioni del sistema. Questa tipologia di pavimenti è del tutto simile a quelle precedentemente analizzate per la fase di compostaggio: hanno il doppio vantaggio di indirizzare e gestire l'immissione dell'aria e nel contempo raccogliere i percolati che potrebbero formarsi (i quali verrebbero riutilizzati dal sistema di irrigazione del biofiltro stesso), tramite guardie idrauliche e tubazioni dedicate.

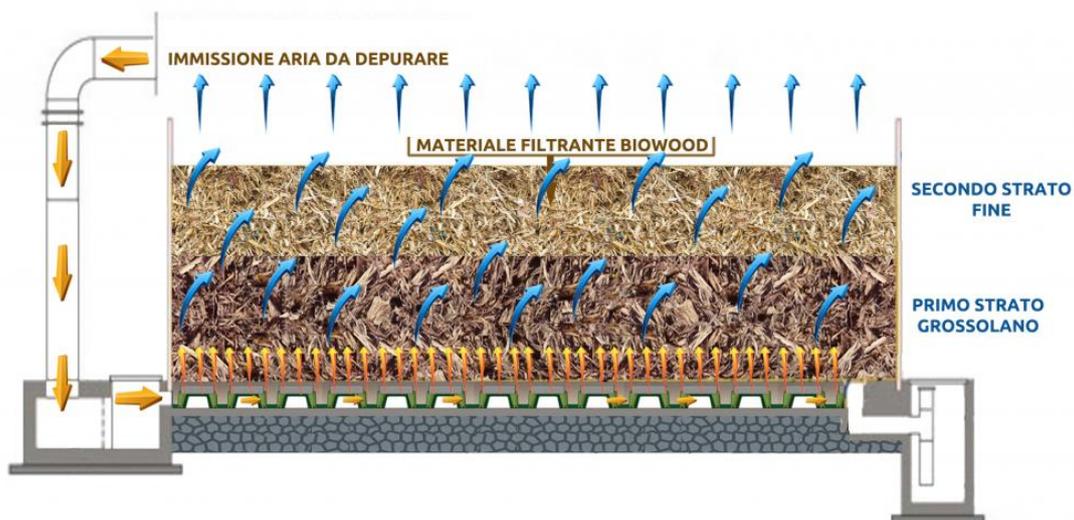


Figura 48 – Immagine rappresentativa del sistema di biofiltrazione (Fonte: biofiltrazione);

Al fine di garantire un elevato presidio ambientale ed assicurare quindi una pressoché assenza di malessere dovuto a molestia olfattive, è stato deciso di optare per un biofiltro dotato di una copertura. Infine, il flusso d'aria in uscita verrà inviato ad un camino di altezza 9 m e diametro 1,8 m. Tale soluzione impiantista permetterà di ottenere un'elevata velocità di uscita del flusso d'aria, così da favorire fenomeni di miscelazione meccanica.

La tabella sottostante riporta le caratteristiche del biofiltro in oggetto.

<i>Caratteristiche del sistema di biofiltrazione</i>	
<i>Portata trattata [m³/h]</i>	130.600
<i>Altezza letto filtrante [m]</i>	1,90
<i>Superficie operativa biofiltro [m²]</i>	950
<i>N° moduli [-]</i>	3
<i>Area modulo [m²]</i>	317
<i>Larghezza [m]</i>	10
<i>Lunghezza [m]</i>	32,0
<i>Tempo residenza [s]</i>	49,75

Tabella 19 – Dati relativi al biofiltro;

4. FABBISOGNI ENERGETICI

Questo capitolo dell'elaborato è dedicato all'analisi dei carichi termici ed elettrici, così da poter effettuare delle stime quantitative sui futuri consumi dell'impianto e le opportune riflessioni. L'obiettivo ultimo sarà quello di analizzare i diversi layout della centrale termica presi in considerazione, se prevedere l'uso di cogenerazione, con quale fonte di alimentazione e sceglierne una taglia appropriata in base ai carichi, così da poter utilizzare l'acqua calda e l'elettricità generati senza sprechi. Infine, un'analisi termo-economica fornirà i dati necessari per scegliere la soluzione termicamente ed economicamente ottimale.

4.1 FABBISOGNI TERMICI

Le principali utenze termiche dell'impianto in questione sono rappresentate da:

- Biodigestore;
- Riscaldamento/raffrescamento e Acqua Calda Sanitaria (ACS) della palazzina uffici;

4.1.1 DIGESTORE ANAEROBICO

Il digestore anaerobico, come già spiegato in precedenza, lavorerà 24 ore al giorno e 7 giorni a settimana. Perciò la temperatura del materiale organico all'interno del reattore dovrà essere mantenuta costantemente sui 55°C vista la scelta di operare in condizioni termofile, con una tolleranza di $\pm 5^\circ\text{C}$. Per riscaldare il materiale organico verranno installate delle linee di tubazioni per l'acqua calda all'interno del digestore a diretto contatto con lo stesso. Quest'opera sarà a carico del fornitore scelto, sarà però necessario effettuare la posa delle linee idrauliche dell'acqua calda che vadano dalla centrale termica (ZONA L) al collettore relativo del biodigestore.

Il fornitore che provvederà alla costruzione e all'installazione del digestore anaerobico ha fornito alcune indicazioni sul reattore:

- La potenza di picco richiesta in fase di avviamento è pari a 350 kW;
- Durante l'avviamento, l'aumento della temperatura del materiale è pari a 1,5°C al giorno;
- Si stima dunque un periodo di avviamento di circa 23 giorni;
- La potenza media richiesta per il mantenimento a regime del reattore è pari a circa 190 kW;

Partendo da queste indicazioni è stato ricavato il consumo energetico [kWh] necessario per l'avviamento del digestore. I dati utilizzati e il risultato ottenuto sono riportati in Tabella 20.

<i>Avviamento</i>	
<i>Rateo di riscaldamento [$^\circ\text{C}/\text{giorno}$]</i>	1,5
<i>Temp. ingresso materiale [$^\circ\text{C}$]</i>	20
<i>Temp. finale materiale [$^\circ\text{C}$]</i>	55
<i>N. di giorni per avviamento [giorni]</i>	~23
<i>Potenza di avviamento [kW]</i>	350
<i>Energia totale avviamento [kWh]</i>	~190.000

Tabella 20 – Dati relativi all'avviamento del digestore anaerobico;

Considerando una temperatura della materia organica in ingresso pari a 20°C, è stato ricavato un fabbisogno per l'avviamento pari a circa 190.000 kWh. Il processo di avviamento del reattore farà parte della fornitura: le operazioni, il caricamento del materiale e il monitoraggio del processo fino al raggiungimento delle condizioni di regime saranno a carico del fornitore.

Idealmente il processo di digestione anaerobica dovrà essere mantenuto costantemente, e il reattore non dovrà mai essere fermato per tutta la durata della vita dell'impianto. Di conseguenza, una volta ottenuto il fabbisogno energetico per l'avviamento del reattore che sarà fornito da una caldaia alimentata a gas di rete, è stato calcolato il carico medio necessario per mantenere in condizioni termofile il biodigestore. Il calcolo è stato svolto tenendo conto della località di installazione e della variazione della temperatura media mensile, la quale modifica sensibilmente il fabbisogno del digestore. Sono state estratte dal database di Edilclima© le temperature medie mensili relative al comune di Rondissone (Tabella 21).

Mese	T _{media} [°C]
Gen	1,7
Feb	3,3
Mar	8,5
Apr	12,3
Mag	17,3
Giu	21,1
Lug	22,6
Ago	21,7
Set	16,8
Ott	12,3
Nov	5,9
Dic	1,5

Tabella 21 – Dati climatici mensili, Rondissone (TO) (Fonte: Edilclima);

La potenza richiesta dal digestore per ogni mese è stata calcolata come indicato nella formula seguente:

$$\dot{Q}_{mese} = c_{H2O} \cdot \dot{m}_{org} \cdot (T_{termofilia} - T_{mese}) \quad [kW] \quad (4.1)$$

Dove \dot{Q}_{mese} [kW] è la potenza media mensile ricavata, c_{H2O} [kJ/kgK] il calore specifico della materia organica assunto uguale a quello dell'acqua pari a 4,186 [kJ/kgK], \dot{m}_{org} [kg/s] la portata di organico in ingresso al digestore pari a 0,7325 kg/s, $(T_{termofilia} - T_{mese})$ la differenza di temperatura relativa alle condizioni termofile (pari a 55°C) e la temperatura media mensile [°C].

Per tenere conto delle dispersioni termiche del reattore è stata applicata una maggiorazione alla potenza mensile ottenuta, in modo da ottenere una potenza totale richiesta mensilmente composta come segue: 70% potenza mensile calcolata e 30% perdite termiche. In Tabella 22 sono indicati i risultati ottenuti.

Mese	T_{media} [°C]	Perdite [kW]	Riscaldamento [kW]	Potenza totale [kW]	Consumo Digestore [kWh/mese]
Gen	1,7	72,12	163,43	235,55	171.950,21
Fen	3,3	69,95	158,52	228,48	166.788,48
Mar	8,5	62,92	142,58	205,50	150.012,85
Apr	12,3	57,78	130,93	188,70	137.753,73
Mag	17,3	51,01	115,60	166,61	121.623,32
Giu	21,1	45,87	103,95	149,81	109.364,21
Lug	22,6	43,84	99,35	143,19	104.525,08
Ago	21,7	45,06	102,11	147,16	107.428,56
Set	16,8	51,69	117,13	168,82	123.236,36
Ott	12,3	57,78	130,93	188,70	137.753,73
Nov	5,9	66,44	150,55	216,99	158.400,66
Dic	1,5	72,39	164,04	236,43	172.595,43

Tabella 22 – Potenza ed energia richiesta dal digestore durante l'anno;

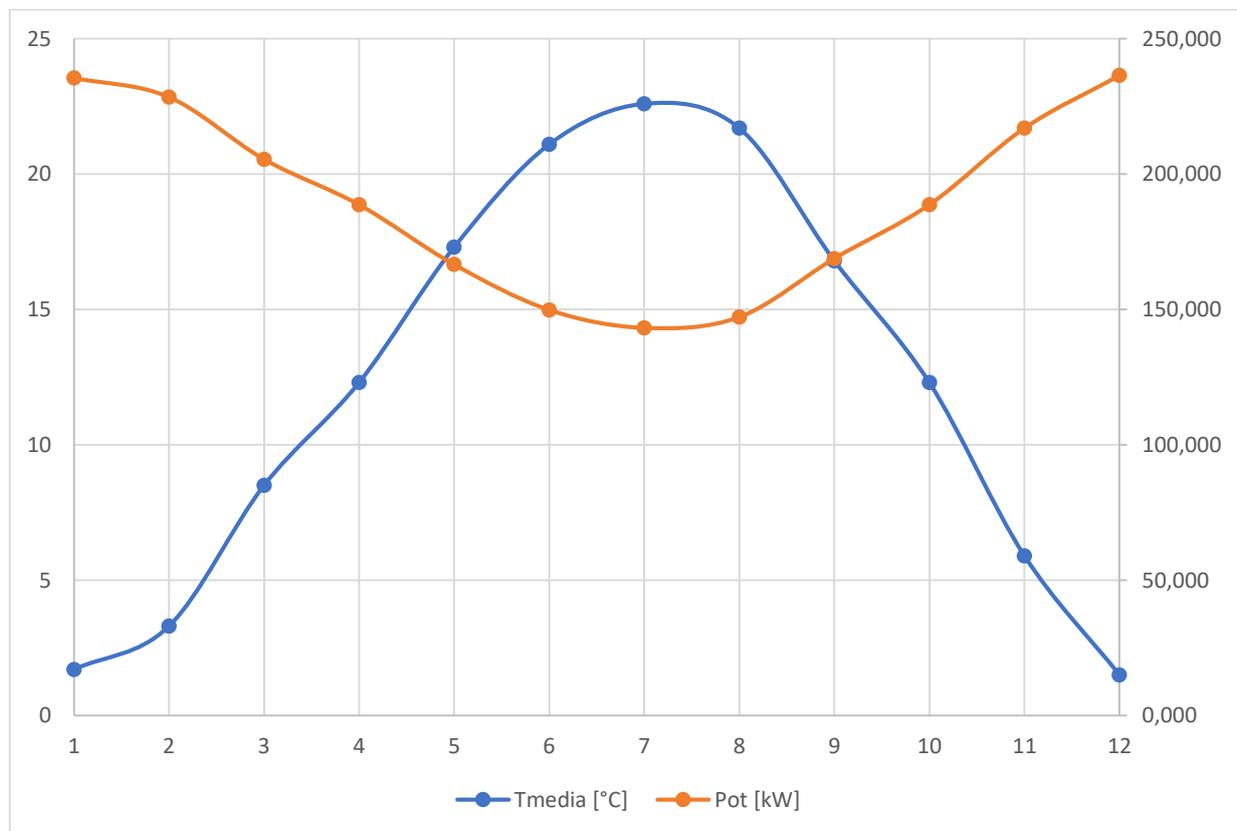


Figura 49 – Andamento del carico termico mensile richiesto dal digestore in funzione delle condizioni esterne;

Dai valori calcolati mensilmente sono stati estratti dei dati di interesse, mostrati in Tabella 23.

<i>Potenza mesi freddi [kW]</i>	218,6
<i>Potenza mesi caldi [kW]</i>	160,7
<i>Potenza media [kW]</i>	189,7
<i>Energia totale annua [kWh/anno]</i>	1.661.432,6

Tabella 23 – Dati ricavati relativi al fabbisogno termico del biodigestore;

Dove si intende per “potenza mesi freddi” la potenza media ottenuta per i 6 mesi più freddi (da ottobre a marzo), per “potenza mesi caldi” la potenza media ottenuta per i 6 mesi più caldi (da aprile a settembre), per “potenza media” la media dei due valori precedenti e per “energia totale annua” il fabbisogno di calore annuo per il riscaldamento del digestore espresso in [kWh]. I valori ottenuti risultano essere perfettamente in linea con le stime effettuate dai futuri installatori.

4.1.2 PALAZZINA UFFICI

L'altra utenza termica dell'impianto è rappresentata dalla palazzina uffici (ZONA I), che sarà posizionata ad est del fabbricato principale. L'edificio in questione si svilupperà sul piano terra e sul primo piano. Al piano terra si troveranno la guardiana, la sala di controllo, il laboratorio chimico per le analisi, i bagni di servizio ed uno spazio adibito a magazzino per ricambi e officina. Il primo piano invece ospiterà una sala mensa, uno spogliatoio, i servizi con wc e docce, un ripostiglio, due uffici ed una sala riunioni. La struttura sarà di tipo prefabbricato e seguirà le prescrizioni contenute nel decreto interministeriale 26/06/2015 – “Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici” relative alle nuove costruzioni. La struttura prefabbricata di copertura sarà realizzata con travi piane in calcestruzzo armato precompresso (c.a.p.) a “T rovescio”, a “L” e da tegoli piani in c.a.p. a “TT”. I tamponamenti esterni verticali saranno composti principalmente da pannelli prefabbricati in cemento armato, con uno spessore di 30 cm, a taglio termico e coibentati con polistirene. Gli infissi saranno in alluminio e i vetri saranno di adeguata trasmittanza. Il pavimento avrà una finitura in gres. In Tabella 24 sono riportati i dati dimensionali della struttura.

<i>Palazzina Uffici</i>	
<i>Lunghezza [m]</i>	29,18
<i>Larghezza [m]</i>	8,50
<i>Altezza [m]</i>	9,00
<i>Area per piano [m²]</i>	225,85
<i>Altezza interna [m]</i>	3,7
<i>Vol. interno per piano [m³]</i>	700,14

Tabella 24 – Dati dimensionali della palazzina uffici (Zona I);

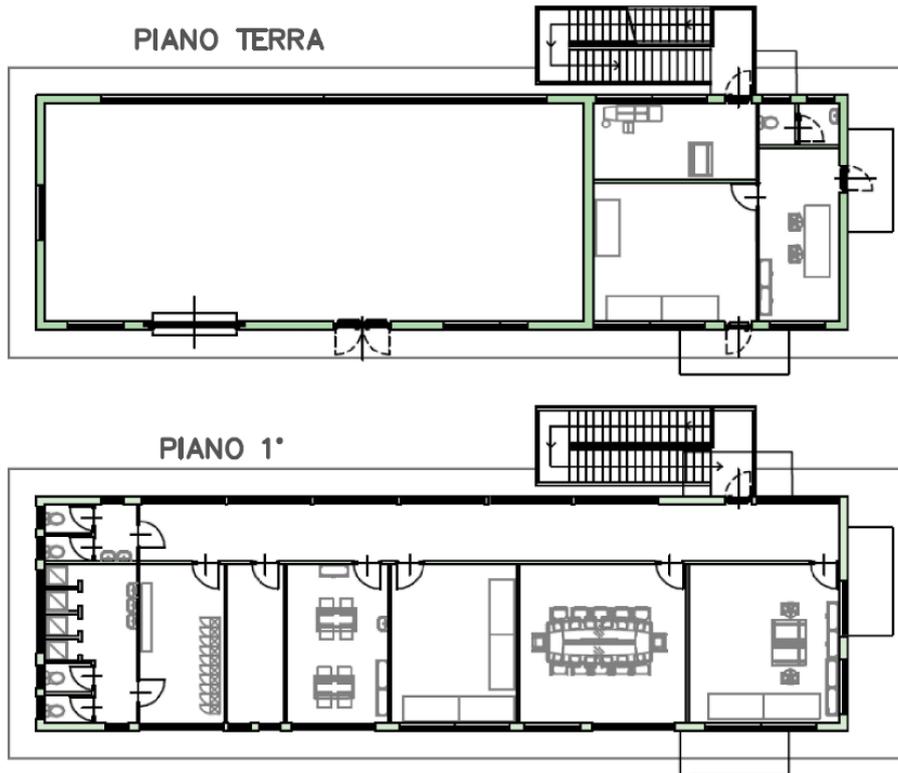


Figura 50 – Planimetria della palazzina uffici;

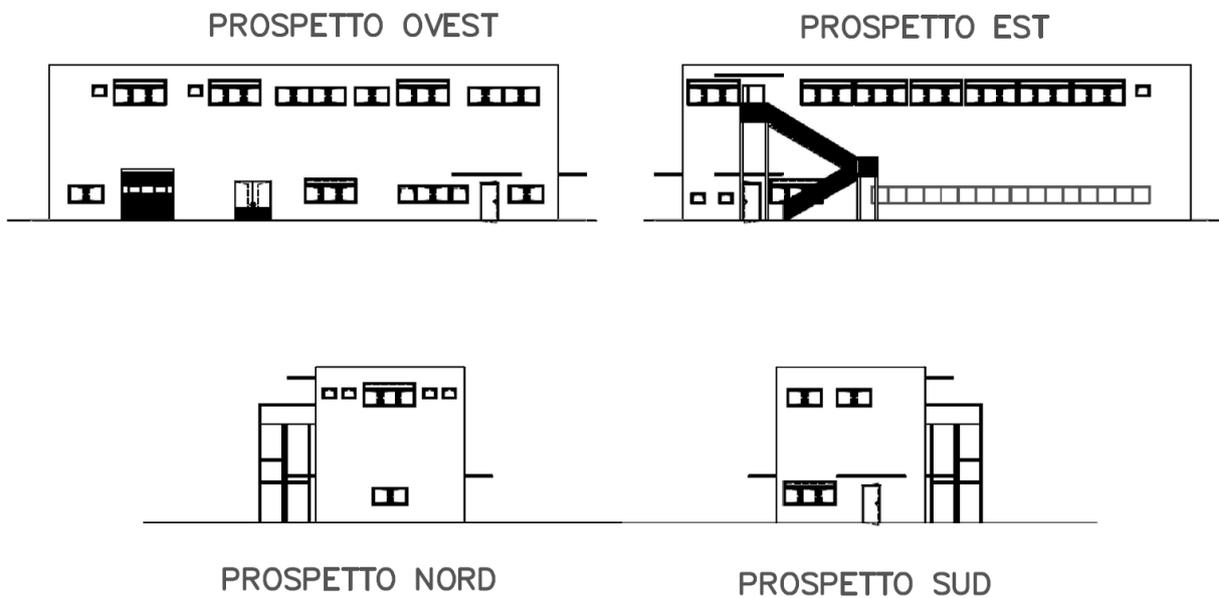


Figura 51 – Prospetti della palazzina uffici;

Vista la tipologia degli ambienti e la loro destinazione d'uso, i fabbisogni termici richiesti saranno quelli per:

- Riscaldamento invernale;
- Raffreddamento estivo;
- Acqua calda sanitaria (ACS);

Utilizzando il software Edilclima© è stato creato un modello dell'edificio in modo tale da ottenere la stima dei fabbisogni richiesti. Per prima cosa è stata indicata la posizione geografica della palazzina, in modo tale che il programma prenda in carico le opportune informazioni climatiche. Successivamente sono state create tutte le stratigrafie che compongono la palazzina, riproducendo i componenti con le stesse dimensioni e prestazioni energetiche indicate dal fornitore della struttura prefabbricata. Tutti gli ambienti all'interno dell'edificio saranno climatizzati, ad eccezione del magazzino al piano terra che risulta essere una zona non climatizzata.

<i>Piano</i>	<i>Locale</i>	<i>Zona Termica</i>	<i>Area [m²]</i>	<i>Volume [m³]</i>
<i>terra</i>	Magazzino	-	153,3	568,6
<i>terra</i>	sala controllo	2	29,6	109,7
<i>terra</i>	laboratorio	2	16,3	60,4
<i>terra</i>	guardiania	2	18,2	67,6
<i>terra</i>	wc	1	4,2	15,4
<i>1°</i>	sala riunione	2	34,5	128,0
<i>1°</i>	ufficio 1	2	31,1	115,5
<i>1°</i>	ufficio 2	2	26,0	96,3
<i>1°</i>	mensa	2	20,9	77,6
<i>1°</i>	ripostiglio	2	11,8	43,8
<i>1°</i>	spogliatoio	3	17,5	64,7
<i>1°</i>	wc	3	24,8	92,1
<i>1°</i>	corridoio	2	51,8	192,1

Tabella 25 – Dati relativi ai locali della palazzina uffici;

Dopo aver identificato sul programma le zone termiche ed aver impostato i giusti parametri di dispersione, è stato generato un semplice render 3D della struttura, rappresentato in Figura 52.



Figura 52 – Render 3D della struttura (Fonte: Edilclima);

Una volta dati in input al modello la composizione della struttura e le sue caratteristiche, è stato necessario impostare più parametri. I principali sono i seguenti: funzionamento ad intermittenza dell'impianto di riscaldamento/raffrescamento per un massimo di 11 ore al giorno e 5 giorni a settimana, terminali identificati come ventilconvettori/fancoil, presenza di accumuli sia per l'acqua calda (prodotta a 80°C) che per l'acqua a temperatura più bassa (prodotta a 12°C).

Ore massime funzionamento impianto [h/giorno]	11
Giorni settimanali di funzionamento	5
Tipologia di funzionamento	Intermittente con spegnimento (ON/OFF)
Dati invernali	
Temperatura esterna di progetto [°C]	-7,8
Stagione di riscaldamento	Dal 15 ottobre al 15 aprile
Dati estivi	
Temperatura esterna bulbo asciutto [°C]	31
Temperatura esterna bulbo umido [°C]	22,7
Umidità relativa [%]	50
Escursione termica giornaliera [°C]	11

Tabella 26 – Dati progettuali utilizzati nel modello Edilclima®;

Al termine della simulazione effettuata è stata ottenuta una potenza per il riscaldamento relativo alla stagione invernale pari a circa 50 kW.

Per quanto riguarda l'impianto di raffrescamento, è stato previsto l'uso di una macchina frigorifera ad assorbimento in modo da sfruttare la disponibilità annuale di acqua calda generata dal cogeneratore, anche se la tipologia di dispositivo ha dei valori di efficienza pari a circa il 70%, il quale risulta essere un valore decisamente inferiore rispetto a quello delle classiche pompe di calore. Per l'impianto in questione è stata prevista una macchina frigorifera ad assorbimento avente una taglia pari a 30 kW. Questo corrisponde, visto il rendimento del dispositivo, ad una richiesta pari alla potenza di 42,5 kW dal generatore di acqua calda.

Alla luce delle analisi e delle considerazioni fatte, si riportano in Tabella 27 i fabbisogni energetici e le ore di funzionamento annuali ottenuti relativi alla stagione invernale ed estiva. Relativamente all'energia richiesta per il raffrescamento estivo, si precisa che in Tabella 27 sono riportati i fabbisogni mensili "in uscita" dal generatore.

Mese	Inverno		Estate	
	Energia [kWh]	Ore di funzionamento [h]	Energia [kWh]	Ore di funzionamento [h]
Gen	10.818,00	212,76	-	-
Feb	7.416,00	145,85	-	-
Mar	2.707,00	53,24	-	-
Apr	521,00	10,25	-	-
Mag	-	-	1.891,00	63,04
Giu	-	-	4.339,00	144,66
Lug	-	-	5.529,00	184,33
Ago	-	-	4.254,00	141,82
Set	-	-	526,00	17,54
Ott	1.342,00	26,39	-	-
Nov	7.389,00	145,32	-	-
Dic	11.879,00	233,63	-	-
TOT	42.072,00	827,44	16.539,00	551,39

Tabella 27 – Fabbisogno energetico mensile per riscaldamento e raffrescamento palazzina uffici;

Il calcolo della potenza giornaliera richiesta al fine di generare l'acqua calda sanitaria è stato invece svolto utilizzando il tool della Caleffi S.p.a. disponibile online, direttamente sul sito ufficiale dell'azienda. La destinazione d'uso scelta è stata quella di "Palestre e centri sportivi". Questo per tener conto della presenza delle numerose docce nei servizi presenti al primo piano e del fatto che, vista la natura dell'impianto, è stato ipotizzato che ogni operaio effettuerà almeno una doccia per turno durante il futuro funzionamento dello stabile. I risultati ottenuti sono i seguenti:

A.C.S.	
Consumo totale [l]	960
Volume calcolato [l]	342,86
Potenza [kW]	18,6
Volume suggerito [l]	400
Ore di funzionamento [h]	2
Ore annuali [h/anno]	912,5
Fabbisogno annuale stimato [kWh/anno]	16.972,5

Tabella 28 – Tabella relativa ai risultati ottenuto sulla produzione di ACS;

La quantificazione delle ore di funzionamento annuali dell'impianto di riscaldamento, dell'impianto di raffrescamento e dell'ACS verrà utilizzata in seguito al fine di tracciare la curva di carico e scegliere la taglia più appropriata di un possibile cogeneratore.

Alla luce di quanto analizzato fino a questo punto, è stato possibile calcolare il fabbisogno energetico espresso in [kWh,th/anno] di tutto l'impianto, tenendo conto di tutti i contributi dati dalla palazzina uffici e dal biodigestore. Il fabbisogno risulta essere pari a 1.736.981,77 kWh,th/anno.

4.2 FABBISOGNI ELETTRICI

I fabbisogni di energia elettrica dell'impianto sono notevoli e concentrati maggiormente in alcuni settori rispetto che ad altri. Per quantificare i fabbisogni relativi ad ogni sezione impiantistica e identificare quelle con la richiesta di energia elettrica maggiore è stata condotta un'analisi legata ai consumi suddivisa per zone, così come indicate nel paragrafo 3.1.4. In Tabella 29 sono riportati i principali componenti alimentati a corrente elettrica e le rispettive potenze installate, prese dalle offerte tecniche richieste ai fornitori.

Zona	Voce	Potenza Installata [kW,el]	Quantità Dispositivi
zona A	Portone ad avvolgimento rapido	12	6
	Aprisacchi	45	1
	Nastro	20	1
	Deferrizzatore	10	1
	Bio-spremitrice	115	1
	Carroponte	30	1
	Pompa rilancio	4	1
	Tot	296	-
zona B, C	Coclea di alimentazione	7	1
	Pompa a pistone	15	2
	Motore del miscelatore	18,5	1
	Soffianti	7,5	2
	Tot	70,5	-
zona D	Pompe spruzzamento	0,3	5
	Ventilatori	15	10
	Tot	151,5	-
zona E	Ventilatori AIE	30	6
	Vaglio	11	1
	Miscelatore verde	160	1
	Tot	351	-
zona M	Aspiratore scrubber	104	2
	Ventilatore biofiltro	20	2
	Tot	304	-
zona N	Soffianti	5,5	2
	Chiller	30	1

	Compressore Biometano	37	1
	Compressore Biogas	160	1
	Compressore CO ₂	55	1
	Essiccatore CO ₂	7,15	1
	Motore liquefazione CO ₂	75	1
	Tot	375,15	-
	Illuminazione	Illuminazione ricezione	3,6
Illuminazione capannone		5,2	1
Illuminazione zona di maturazione		3,6	1
Illuminazione uffici		2	1
Illuminazione esterna		6	1
Ausiliari		30	1
Tot		50,4	-

Tabella 29 – Componentistica prevista e relativa potenza installata per zone dell’impianto;

Note le potenze installate zona per zona, è stato possibile quantificare il consumo energetico annuo dell’impianto. Le effettive ore di funzionamento dei componenti e il loro funzionamento in simultaneo sono stati quantificati attraverso l’uso di due fattori:

- Fattore di utilizzo “ f ”;
- Fattore di contemporaneità “ f_c ”;

A questi fattori sono stati assegnati dei valori diversi per ogni componente, seguendo indicazioni dirette dei fornitori estraendoli dalle offerte tecniche ricevute o, in mancanza di tali, cercando di utilizzare dei valori ritenuti logicamente appropriati.

Nella Tabella 30 sono indicati i fattori di utilizzo e contemporaneità, i consumi annuali ricavati componente per ogni componente. I consumi sono stati calcolati utilizzando la seguente formula:

$$E = \dot{Q}_{installata} \cdot n_{dispositivi} \cdot f \cdot f_c \cdot 8760 \quad [kWh] \quad (4.2)$$

Zona	Voce	Potenza Installata [kW,el]	Quantità Dispositivi	f [%]	f _c [%]	Fabbisogno Energetico [kWh/y]
zona A	Portone ad avvolgimento rapido	12	6	10	10	6.307,20
	Aprisacchi	45	1	50	75	147.825,00
	Nastro	20	1	50	75	65.700,00
	Deferrizzatore	10	1	50	75	32.850,00
	Bio-spremitrice	115	1	50	75	377.775,00
	Carroponte	30	1	50	75	98.550,00
	Pompa rilancio	4	1	75	75	19.710,00
	Tot	224	-	-	-	748.717,20
zona B, C	Coclea di alimentazione	7	1	50	75	22.995,00
	Pompa a pistone	15	2	75	75	147.825,00

	Motore del miscelatore	18,5	1	25	75	30.386,25
	Soffianti	7,5	2	75	100	98.550,00
	Tot	70,5	-	-	-	299.756,25
zona D	Pompe spruzzamento	0,3	5	75	75	7.391,25
	Ventilatori	15	10	75	70	689.850,00
	Tot	151,5	-	-	-	697.241,25
zona E	Ventilatori AIE	30	6	75	70	827.820,00
	Vaglio	11	1	35	75	25.294,50
	Miscelatore verde	160	1	35	75	367.920,00
	Tot	351	-	-	-	1.221.034,50
zona M	Aspiratore scrubber	104	2	75	75	1.024.920,00
	Ventilatore biofiltro	20	2	75	75	197.100,00
	Tot	304	-	-	-	1.222.020,00
zona N	Soffianti	5,5	2	75	75	54.202,50
	Chiller	30	1	75	75	147.825,00
	Compressore biometano	37	1	75	75	182.317,50
	Compressore biogas	160	1	50	75	525.600,00
	Compressore CO ₂	55	1	50	50	120.450,00
	Essicatore CO ₂	7,15	1	50	50	15.658,50
	Motore liquefazione CO ₂	75	1	50	50	164.250,00
	Tot	375,15	-	-	-	1.210.303,50
III.	Illuminazione ricezione	3,6	1	50	100	15.768,00
	Illuminazione capannone	5,2	1	50	100	22.776,00
	Illuminazione zona di maturazione	3,6	1	50	100	15.768,00
	Illuminazione uffici	2	1	35	100	6.132,00
	Illuminazione esterna	6	1	50	100	26.280,00
	Ausiliari	30	1	50	75	98.550,00
	Tot	50,4	-	-	-	185.274,00

Tabella 30 – Dati ottenuti relativi alla stima dei consumi dell'impianto suddivisi per zone;

Osservando i risultati, si nota come ci siano tre zone (D, E, F) con un fabbisogno annuale circa uguale tra loro ma maggiore rispetto a quelli degli altri settori dell'impianto.

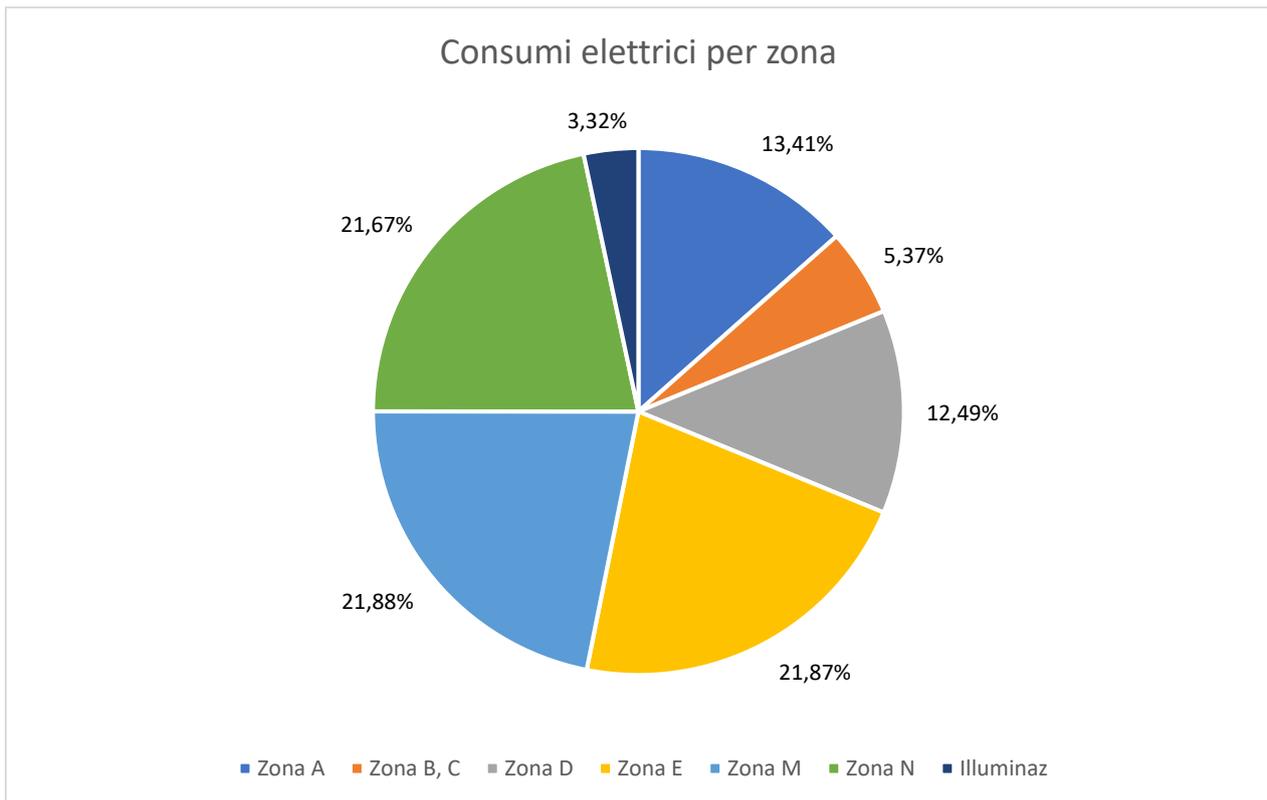


Figura 53 – Diagramma a torta rappresentante le ripartizioni dei consumi elettrici zona per zona;

Per sopperire alla grande richiesta di energia, è stata prevista l'installazione di un impianto fotovoltaico sulla copertura del capannone principale, per una potenza totale di 500 kW. Al fine di effettuare la stima dell'energia annua sviluppata dall'impianto fotovoltaico, la potenza di picco è stata moltiplicata per un fattore di 1100 [kWh/kW/y]:

$$E_{fv} = \dot{Q}_{fv,inst} \cdot 1100 \quad [kWh/y] \quad (4.3)$$

Dove E_{fv} [kWh/y] è l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico annualmente e $\dot{Q}_{fv,inst}$ [kW] la potenza installata pari a 500 kW.

Nella Tabella 31 vengono riportati i principali risultati ottenuti legati ai consumi annui di energia elettrica:

<i>Consumi elettrici interni</i>	
<i>Potenza installata totale [kW,el]</i>	1.442,55
<i>Consumo giornaliero[kWh,el/giorno]</i>	15.285,18
<i>Consumo annuale[kWh,el/anno]</i>	5.579.090,70
<i>Energia generata del fotovoltaico annualmente [kWh,el/anno]</i>	550.000,00

Tabella 31 – Dati ottenuti relativi ai consumi e alla produzione dovuta al fotovoltaico di energia elettrica;

4.3 CENTRALE TERMICA: 3 LAYOUT CONSIDERATI

La stima dei consumi energetici e l'analisi dei carichi sono stati svolti con l'obiettivo finale di scegliere la configurazione ottimale della centrale termica. L'idea iniziale del proponente dell'impianto è stata quella di prevedere un cogeneratore alimentato a biogas prodotto internamente. Questo significherebbe da un lato sfruttare una fonte energetica prodotta internamente, e da un altro privarsi dei ricavi dati dalla vendita e dall'incentivazione del mancato biometano prodotto. La scelta legata alla presenza e alla tipologia del cogeneratore richiede quindi uno studio termo-economico dedicato, così da poter individuare la configurazione più adatta e conveniente.

Affinché un cogeneratore funzioni in modo efficiente, è necessario dimensionare in modo corretto la sua potenza. Il dimensionamento può essere effettuato:

- In funzione dell'elettricità generata/consumata;
- In funzione del calore generato/consumato;

Lo scopo è quindi quello di scegliere una taglia in modo tale che la macchina lavori più tempo possibile a pieno carico nel corso dell'anno^[19]. Vista la costanza dell'elevata richiesta di energia elettrica dell'impianto, non si presenta la possibilità di non riuscire ad utilizzare l'elettricità prodotta dal cogeneratore; di conseguenza il dimensionamento è da effettuare sulla produzione termica della macchina, analizzando più approfonditamente l'andamento stagionale dei carichi. In Tabella 32 sono riassunti i carichi termici ricavati e le ore annuali in cui si verificano:

<i>Tipologia di carico</i>	<i>Potenza [kW]</i>	<i>Ore annuali [h]</i>
<i>Riscaldamento biodigestore estate</i>	160,7	4380
<i>Riscaldamento biodigestore inverno</i>	218,6	4380
<i>Riscaldamento palazzina uffici</i>	50,0	827,4
<i>Raffreddamento palazzina uffici</i>	42,5	552,4
<i>ACS palazzina uffici</i>	18,6	912,5

Tabella 32 – Riassunto sui fabbisogni di energia termica calcolati fino a questo punto;

Grazie al modello di calcolo costruito per il digestore e il modello sviluppato con il software Edilclima© per il riscaldamento/raffrescamento della palazzina uffici è stato possibile quantificare i fabbisogni termici, conoscere il quantitativo di ore annuali corrispondenti e quantificare il numero di ore di richiesta in concomitanza delle varie utenze. Questo per costruire la curva cumulata dei carichi termici, rappresentata dalla Figura 54.

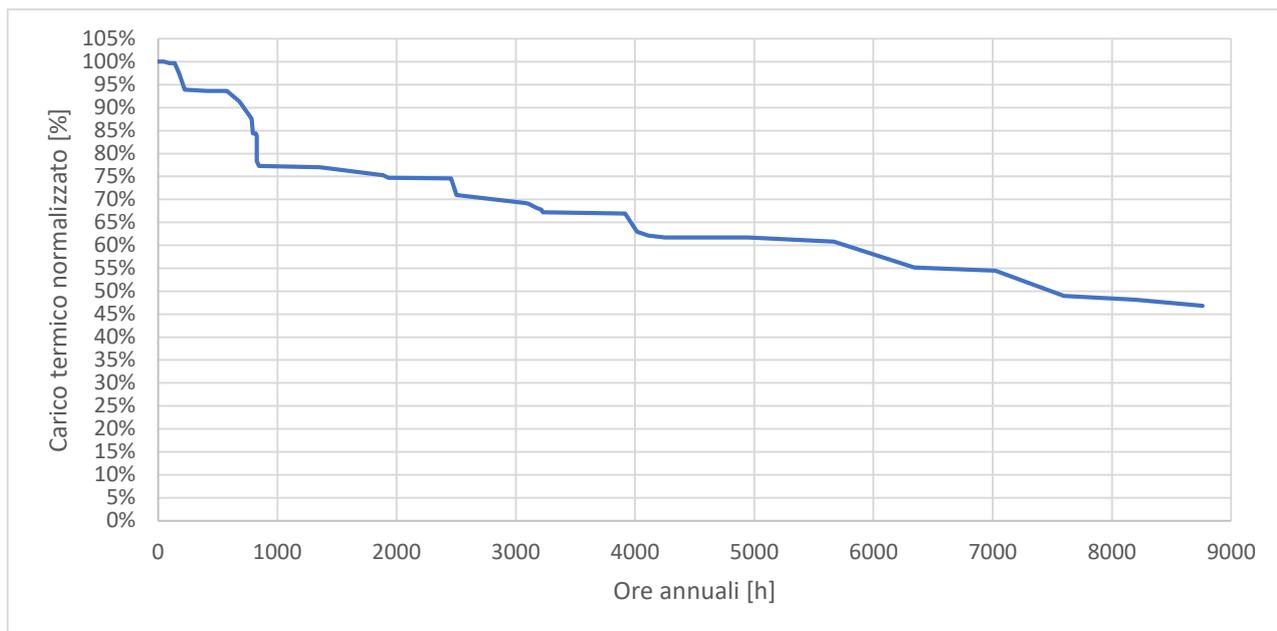


Figura 54 – Curva cumulata dei carichi termici;

Analizzata la curva e note le taglie di cogeneratori disponibili offerti dal fornitore individuato, è stato deciso di scegliere un cogeneratore di una taglia che ricopra il 55% del carico termico massimo. Di conseguenza sono state richieste delle offerte per un cogeneratore alimentato a metano di rete avente potenza termica pari a 168 kW, e per un cogeneratore alimentato a biogas prodotto da FORSU avente potenza termica pari a 155 kW. In questo modo si avrebbe una macchina che lavora a pieno carico per circa 7030 h/y e in modulazione per il resto delle ore annuali disponibili, tolti i fermi per la manutenzione della macchina. La taglia del gruppo elettrogeno scelto rappresenta quindi il modello, tra quelli disponibili, che ha la capacità di lavorare il maggior numero di ore a pieno carico durante il corso dell'anno.

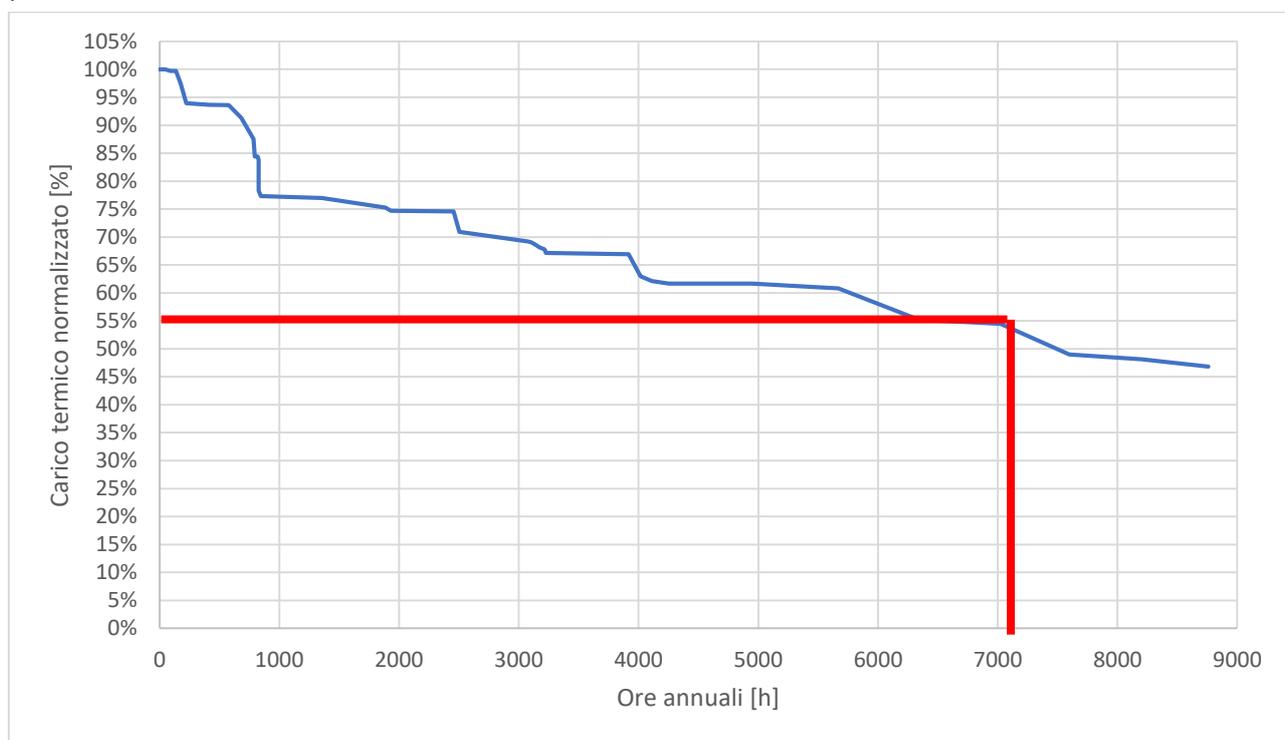


Figura 55 – Curva cumulata dei carichi termici e identificazione del carico soddisfatto dal cogeneratore scelto;

Risulta evidente la necessità di prevedere in ogni caso l'installazione di una caldaia, per più ragioni:

- Arrivare a soddisfare i carichi termici più elevati durante l'anno, colmando il quantitativo di calore richiesto non fornito dal cogeneratore;
- Poter fornire la potenza necessaria al biodigestore in fase di avviamento che, come noto, ammonta a 350 kW;
- Poter soddisfare il fabbisogno termico quando il cogeneratore risulta spento per manutenzione o a causa di possibili malfunzionamenti;

La taglia della caldaia sarà quindi pari a 350 kW e al carico massimo richiesto dall'impianto.

Alla luce di quanto detto ed analizzato fino ad ora, sono stati presi in considerazione tre possibili layout della centrale termica:

- Layout 1: utilizzo di un cogeneratore alimentato a biogas prodotto (e caldaia di backup);
- Layout 2: utilizzo di un cogeneratore alimentato a gas di rete (e caldaia di backup);
- Layout 3: utilizzo di una caldaia alimentata a gas di rete (no cogeneratore);

Noto il potere calorifico inferiore (PCI) del metano e la composizione volumetrica del biogas prodotto dalla digestione anaerobica, ne è stato ricavato il relativo PCI. Nella Tabella 33 sono riportati i dati relativi al biogas:

Voce	Valore
PCI,metano [kWh/m ³]	9,94
PCI,biogas [kWh/m ³]	5,47

Tabella 33 – Poteri calorifici di metano e biogas prodotto;

In Tabella 34 sono riportati i dati relativi ai flussi nominali di biogas e biometano prodotti internamente all'impianto, che verranno utilizzati in seguito.

Voce	Valore
Materia organica in ingresso al digestore [ton/anno]	24,000.00
%CH ₄ nel biogas	55
Produzione specifica biogas [Nm ³ /ton _{organico}]	169,70
Produzione biogas [Nm ³ /anno]	4.072.727,27
Produzione biogas [Nm ³ /h]	464,92
Produzione biometano [Nm ³ /anno]	2.240.000,00
Produzione biometano [Nm ³ /h]	255,71

Tabella 34 – Dati relativi alla produttività dell'impianto;

Per la parte economica dell'analisi sono state fatte delle assunzioni legate al costo dell'energia elettrica, al costo del metano di rete, al prezzo di vendita del biometano prodotto. Inoltre, sono stati calcolati i CIC seguendo le indicazioni contenute nel D.M. del 2 marzo 2018 legati all'intera produzione annua di biometano senza considerare un possibile riuso interno tramite cogeneratore,

la generazione specifica di CIC al metro cubo di biometano prodotto, e il ricavo dato sia dalla vendita che dall'incentivazione in euro al metro cubo di biometano prodotto. Tutti questi valori sono indicati in Tabella 35.

Voce	Valore
N° CIC,max [CIC/anno]	3633,73
Prezzo energia elettrica [euro/kWh,el]	0,25
Prezzo CH ₄ [euro/Nm ³]	0,70
Prezzo vendita biometano [euro/Nm ³]	0,35
Generazione specifica di CIC [CIC/Nm ³ _{biometano}]	0,00162
Ricavo specifico dai CIC [euro/Nm ³ _{biometano}]	0,60833
Ricavo specifico totale [euro/Nm ³ _{biometano}]	0,95833

Tabella 35 – Dati economici legati alla produzione di biometano;

4.3.1 LAYOUT 1

Come già detto precedentemente, questa opzione è stata la prima ad essere presa in considerazione da Ferplant durante la fase di progettazione. In questa configurazione una parte del biogas estratto dal digestore verrebbe indirizzata direttamente al cogeneratore senza che venga prima processato o trattato.

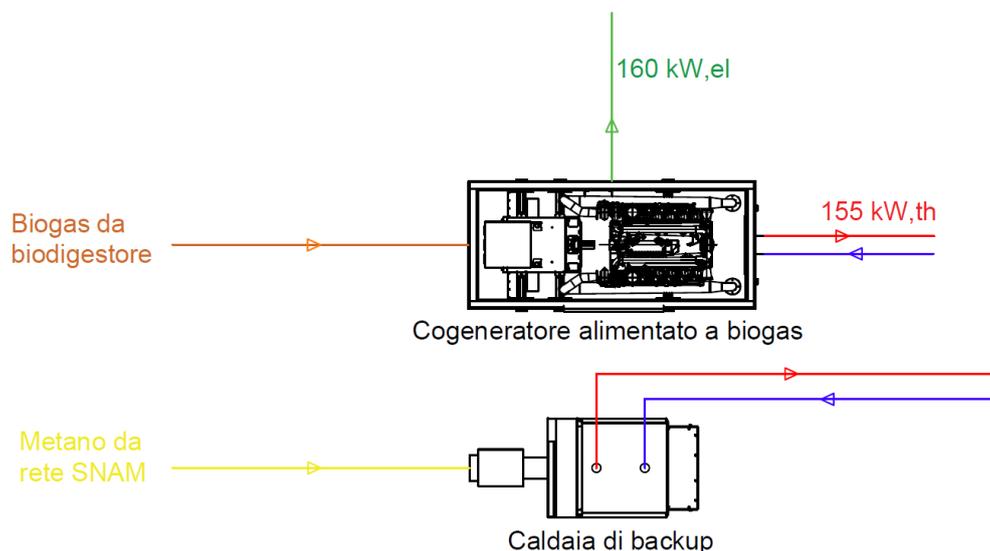


Figura 56 – Schema rappresentativo del Layout 1;

Scelto il carico, è stata richiesta un'offerta per un cogeneratore alimentato a biogas della taglia più appropriata presente in catalogo. In Tabella 36 si riportano i dati della macchina presenti in scheda tecnica.

Dati Cogeneratore a Biogas

$Pot_termica [kW,th]$	155
$Pot_ele [kW,el]$	160
$\eta_{th} [\%]$	40,2
$\eta_{el} [\%]$	41,5
$\eta_{globale} [\%]$	81,7

Tabella 36 – Dati di targa del cogeneratore alimentato a biogas;

Successivamente, in base alla taglia e le ore di funzionamento annue scelti, sono stati calcolati la produzione di energia elettrica [kWh,el] e termica annuali [kWh,th]. È stato così possibile ottenere il quantitativo di energia elettrica da acquistare al netto della produzione del cogeneratore e del fotovoltaico, quantificare il consumo di biogas e il corrispettivo equivalente in biometano, ed infine il numero di CIC non maturati a causa dell'uso interno del prodotto. In Tabella 37 sono riportate le grandezze appena elencate relativi ai consumi e alle prestazioni del gruppo elettrogeno.

Voce	Valore
En. El. prodotta [kWh,el/anno]	1.256.000,00
En. Th. prodotta [kWh,th/anno]	1.216.750,00
En. El. Acquistata [kWh,el/anno]	3.773.090,70
Costo En. El. [euro/anno]	943.272,68
Perdita da autoconsumo biogas [euro/anno]	278.726,68
Ricavo da biometano [euro/anno]	1.867.921,32
Risparmio da coge. [euro/anno]	314.000,00
Consumo coge. [$Nm^3_{biogas}/anno$]	523.724,80
Consumo coge. [Nm^3_{biogas}/h]	68,91
Consumo coge. in biometano [$Nm^3_{biometano}/h$]	37,90
Consumo coge. in biometano [$Nm^3_{biometano} /anno$]	288.048,64
N° CIC non generati [CIC/anno]	467,27
Produzione caldaia [kWh,th/anno]	520.231,77
Consumo caldaia [$Nm^3_{metano} /anno$]	36.636,04

Tabella 37 – Risultati ottenuti per il Layout 1;

4.3.2 LAYOUT 2

La seconda configurazione presa in considerazione prevede l'installazione di un cogeneratore ed una caldaia entrambi alimentati a gas di rete proveniente dalla rete di distribuzione. In questo caso l'intera produzione di biometano verrebbe ceduta alla rete SNAM.

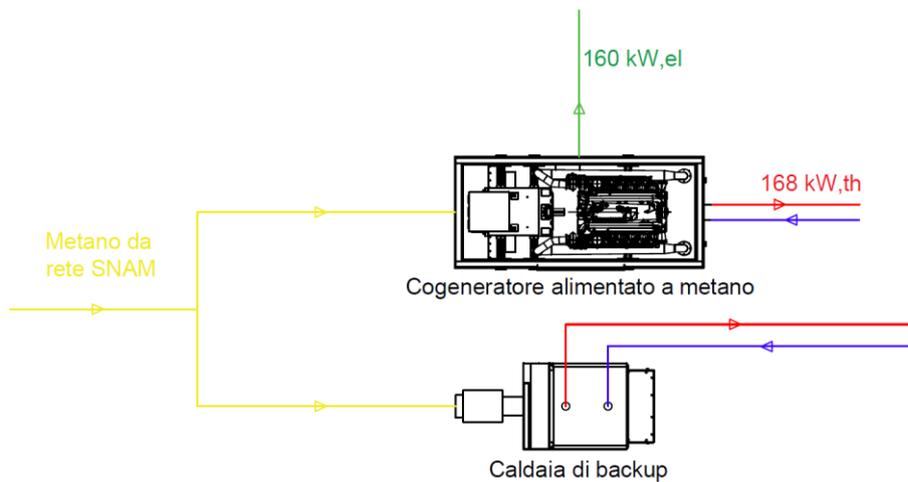


Figura 57 – Schema rappresentativo del Layout 2;

I dati tecnici riguardanti il cogeneratore per cui è stata richiesta un'offerta sono riportati in tabella 38.

Dati Cogeneratore a Gas di rete

<i>Pot_termica [kW,th]</i>	168
<i>Pot_ele [kW,el]</i>	160
<i>η_{th} [%]</i>	41,0
<i>η_{el} [%]</i>	43,0
<i>$\eta_{globale}$ [%]</i>	84,0

Tabella 38 – Dati di targa del cogeneratore alimentato a gas di rete;

Come per il layout precedentemente analizzato, sono stati calcolati i consumi e la produzione annuale della macchina (Tabella 39).

Voce	Valore
En. El. prodotta [kWh,el/anno]	1.256.720,00
En. Th. prodotta [kWh,th/anno]	1.319.556,00
En. El. Acquistata [kWh,el/anno]	3.772.370,70
Costo En. El. [euro/anno]	943.092,68
Perdita da autoconsumo biogas [euro/anno]	0,00
Ricavo da biometano [euro/anno]	2.146.648,00
Risparmio da coge. [euro/anno]	314.180,00
Consumo coge. [$\text{Nm}^3_{\text{metano}}/\text{h}$]	38,50

Consumo coge. [$\text{Nm}^3_{\text{metano}}/\text{anno}$]	292.582,16
Costo metano di rete al coge. [euro/anno]	204.807,51
Produzione caldaia [kWh,th/anno]	417.425,77
Consumo caldaia [$\text{Nm}^3_{\text{metano}}/\text{anno}$]	41.994,54

Tabella 39 – Risultati ottenuti per il Layout 2;

In questa configurazione, invece che i metri cubi annui di biogas consumato sono stati calcolati i metri cubi annui di gas metano da rete utilizzato e il relativo costo.

4.3.3 LAYOUT 3

Nella terza ed ultima configurazione è prevista la sola installazione di una caldaia alimentata a gas prelevato dalla rete di distribuzione SNAM. Come già detto in precedenza, la potenza nominale della caldaia dovrà essere pari a 350 kW. Il modello di questa taglia identificato presenta un rendimento pari al 98%.

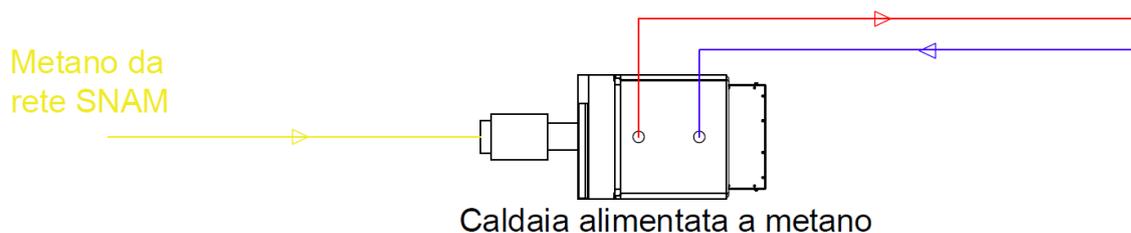


Figura 58 - Schema rappresentativo del Layout 3;

Per stimare i consumi annuali di gas da rete, è stato escluso il procedimento di avviamento del digestore poiché questo processo avverrà una volta sola e durante la fase di partenza dell'impianto. Noto il consumo annuale dell'impianto, è stato possibile ricavare il quantitativo di gas di rete necessario. In Tabella 40 si riportano i consumi annuali di calore ed energia elettrica in assenza di cogenerazione.

Voce	Valore
En. El. Acquistata [kWh,el/anno]	5.029.090,70
Costo En. El. [euro/anno]	1.257.272,68
Perdita da autoconsumo biogas [euro/anno]	0,00
Ricavo da biometano [euro/anno]	2.146.648,00

Tabella 40 – Risultati ottenuti per il Layout 3;

Anche in questo caso, come nel secondo, i ricavi dati dalla vendita e dagli incentivi sulla produzione di biometano restano i massimi possibili.

4.4 CONFRONTO ECONOMICO

Analizzati tutti e tre gli scenari lo step successivo è stato quello di mettere a confronto i risultati ottenuti relativi ai consumi, ai ricavi e ai costi. In questo modo è stato possibile identificare la soluzione ottimale da adottare. Per effettuare questo confronto sono stati quindi messi in comparazione i consumi annui di energia elettrica, calore, portata di gas di rete utilizzato, i ricavi dati dalla produzione e vendita di biometano, e i risparmi generati dalla relativa configurazione.

In Tabella 41 sono riportati i risultati ottenuti.

	Layout 1	Layout 2	Layout 3
Consumo di Energia Elettrica [kWh/anno]	5.029.090,70		
Fabbisogno di Energia Termica [kWh/anno]	1.736.981,77		
Produzione Caldaia [kWh/anno]	3.773.090,70	3.772.370,70	5.029.090,70
Consumo CH ₄ di rete [m ³ /anno]	52.337,20	334.576,70	180.151,19
Costo Energia Elettrica [euro/kWh/anno]	943.272,68	943.092,68	1.257.272,68
Costo CH ₄ di rete [euro/anno]	36.636,04	234.203,69	201.825,73
Totale costi energetici [euro/anno]	979.908,72	1.177.296,37	1.459.098,41
Risparmi energetici [euro/anno]	479.189,69	281.802,04	0,00
Ricavi da Biometano (CIC + Vendita) [euro/anno]	1.870.603,79	2.146.648,00	2.146.648,00
Ricavi Toali: Biometano + Risparmi energetici [euro/anno]	2.349.793,48	2.428.450,04	2.146.648,00

Tabella 41 – Confronto tra i risultati ottenuti per i tre diversi layout;

I risultati ottenuti fanno chiarezza su quelli che sono i consumi e i costi legati alle casistiche analizzate. Facendo riferimento ai ricavi totali generati con i diversi layout è chiaro come la soluzione più conveniente sia dal punto di vista di ottimizzazione energetica che dal punto di vista economico da adottare, sia l'assetto chiamato "Layout 2".

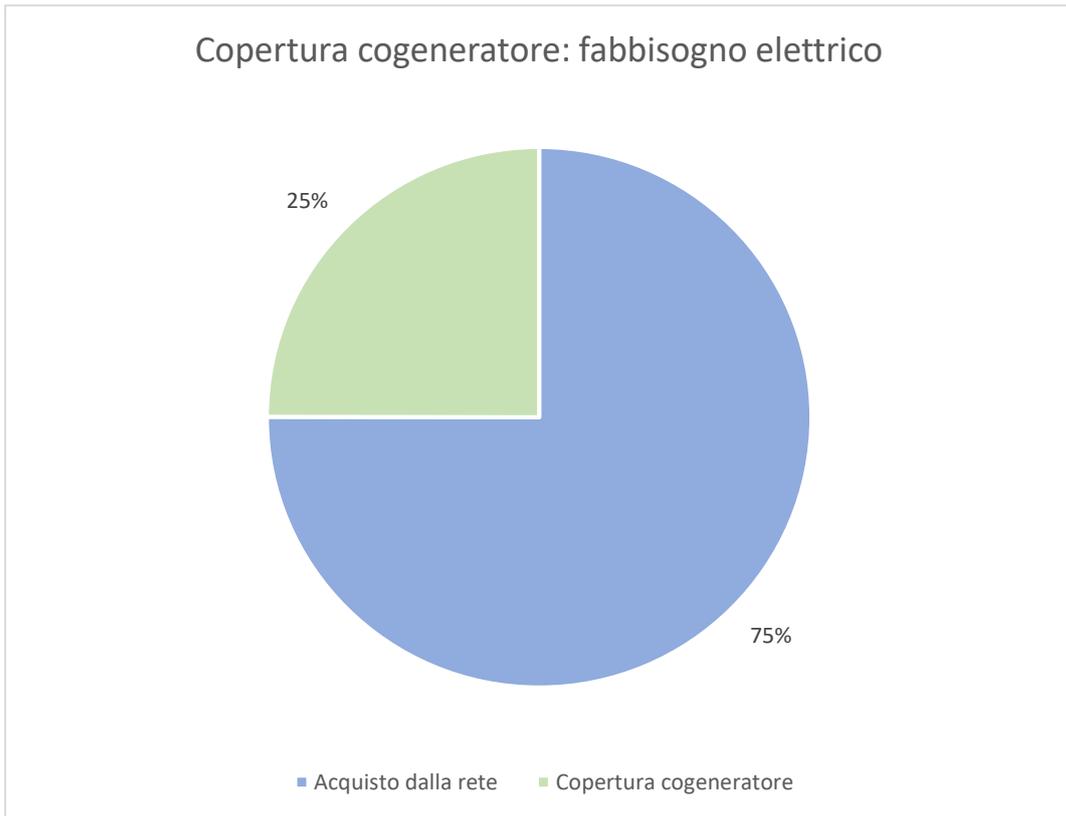


Figura 59 – Copertura dei fabbisogni elettrici a carico del cogeneratore;

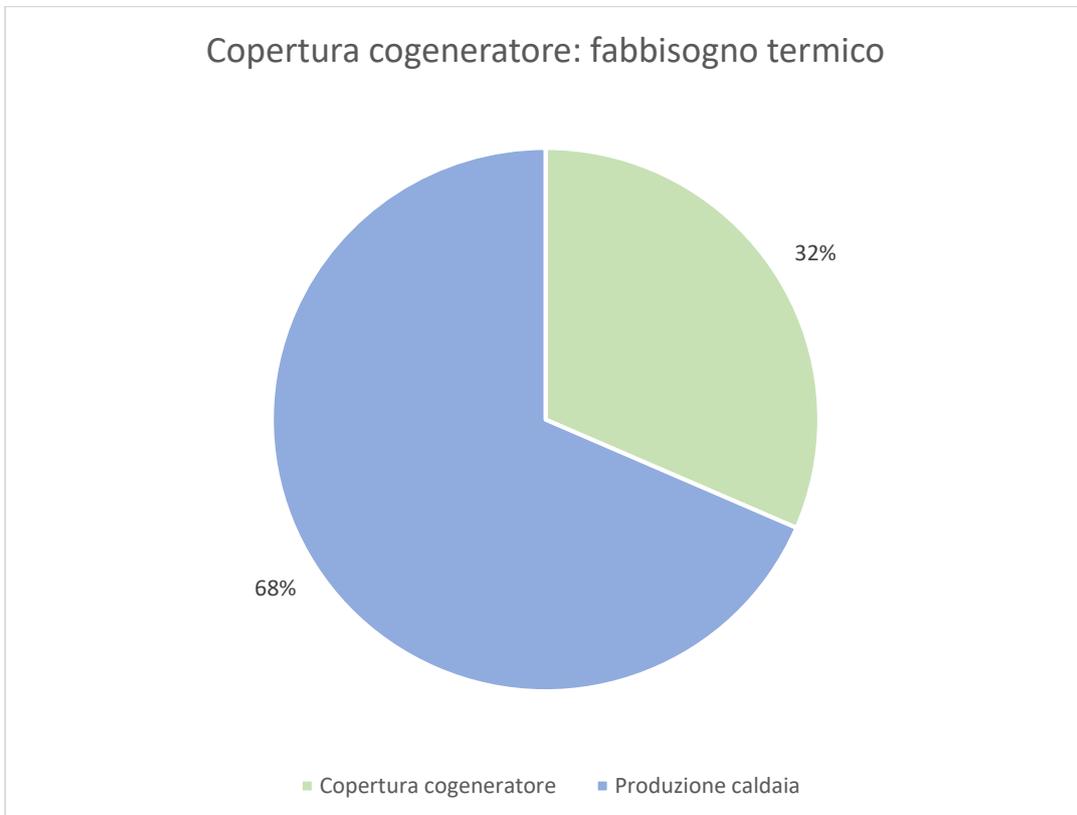


Figura 60 – Copertura dei fabbisogni termici a carico del cogeneratore;

5. PROGETTAZIONE DELLA CENTRALE TERMICA

L'obiettivo finale dell'analisi svolta legata ai fabbisogni energetici dell'impianto era quello di ottenere i dati necessari per stabilire quale fosse, tra quelli considerati, l'assetto migliore della centrale termica. I risultati ottenuti fino a questo punto dimostrano come il "Layout 2" sia l'opzione più ragionevole da adottare, sia dal punto di vista dei consumi che dal punto di vista dei costi. L'ultimo passaggio del presente lavoro di tesi è stato quindi quello di svolgere la progettazione definitiva relativa alla centrale termica. Note le taglie e le tipologie dei generatori di calore da prevedere, il primo passo è stato quello di produrre uno schema funzionale della centrale termica e una tavola planimetrica della rete di distribuzione idraulica con un livello di dettaglio preliminare. In questo modo è stato possibile avere una prima rappresentazione grafica relativa alla struttura e alla logica dell'impianto. Infine, dopo aver svolto i dimensionamenti della componentistica necessaria, il livello di dettaglio dello schema funzionale è stato portato ad un livello definitivo, riportando dimensioni e caratteristiche dei vari componenti principali e secondari.

<i>Componente</i>	<i>Potenza [kW,th]</i>
<i>Caldaia</i>	350,0
<i>Cogeneratore</i>	168,0
<i>Fabbisogno invernale palazzina uffici</i>	50,0
<i>Macchina frigo ad assorbimento</i>	30,0
<i>Fabbisogno macchina frigo ad assorbimento</i>	42,5
<i>Acqua Calda Sanitaria</i>	18,6

Tabella 42 – Riassunto delle potenze in gioco ottenute;

5.1 INDIVIDUAZIONE DELLO SPAZIO ADIBITO

All'interno del progetto di Ferplant è presente uno spazio a fianco del pre-fabbricato principale dedicato alla centrale impianti (ZONA L). Qui saranno posizionati il cogeneratore e la caldaia, entrambi alimentati a gas prelevato dalla rete di distribuzione SNAM. La struttura in questione che conterrà la caldaia e il cogeneratore costituisce compartimento antincendio, pertanto i componenti di involucro saranno di tipologia REI120 e saranno realizzati in muratura di laterizio con intonaco in malta di cemento, per uno spessore complessivo di 20 cm. Il solaio verso l'esterno sarà invece costituito da calcestruzzo armato di spessore 30 cm, sempre con resistenza al fuoco REI120. Tutte le strutture saranno realizzate con materiale di classe A1 di reazione al fuoco.

L'utenza più vicina ai generatori di calore è il digestore anaerobico, il quale si trova ad una distanza di circa 10 metri dal locale tecnico sopra citato. La palazzina uffici invece risulta più distante dalla ZONA L, posizionata ad una distanza di circa 100 metri dalla centrale termica. All'interno della struttura del biodigestore è presente uno spazio percorribile adibito ad ispezione e installazione di dispositivi. Per quanto riguarda la palazzina uffici, verrà utilizzata una parte dello spazio adibito a magazzino ed officina per l'installazione e il posizionamento dei dispositivi necessari. In questi spazi appena citati sono state quindi identificate delle "sotto-centrali termiche", nelle quali verranno

installati tutti i componenti richiesti al fine di garantire il corretto funzionamento dell'impianto di distribuzione idraulico.

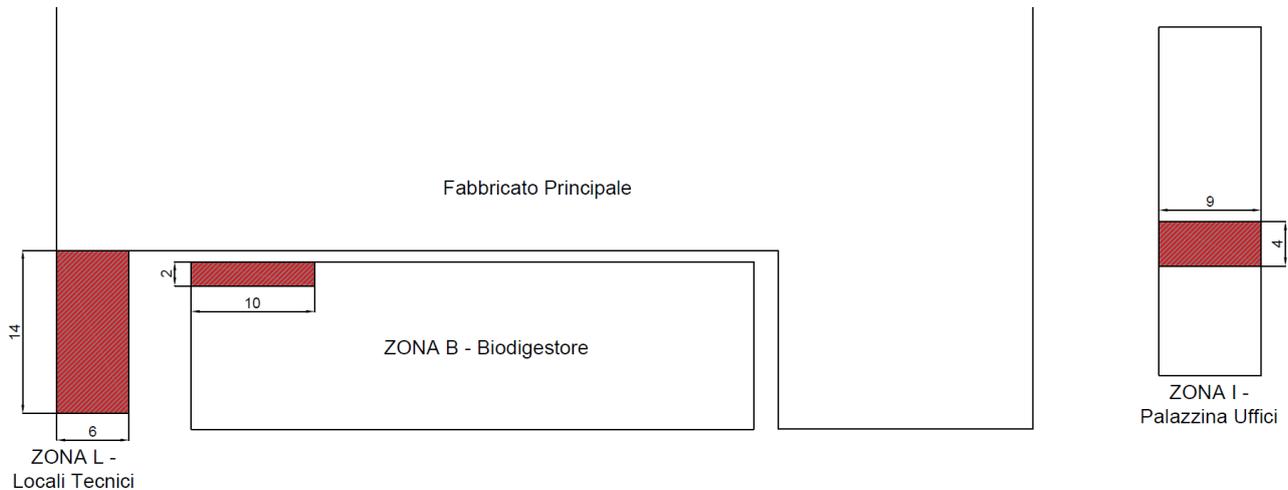


Figura 61 – Individuazione delle sotto-centrali termiche e della Zona L;

5.2 DIMENSIONAMENTO RETE IDRAULICA

5.2.1 SCELTE PROGETTUALI

In questo paragrafo è descritta la procedura adottata per il dimensionamento della rete idraulica. Come già preannunciato, sono stati prodotti uno schema funzionale della centrale termica e un elaborato planimetrico della rete di distribuzione idraulica con livello di dettaglio preliminare, in modo da definire la logica di distribuzione dell'impianto e la sua logica di funzionamento. Hanno permesso di quantificare la lunghezza del sistema di tubazioni presenti e di determinare il posizionamento dei terminali negli ambienti e dei dispositivi nelle zone precedentemente definite "sotto centrali termiche", nella palazzina uffici e all'interno della struttura di contenimento del digestore anaerobico. È necessario specificare però che, contrariamente a quanto concerne la parte di impianto legata alla palazzina uffici, il sistema di riscaldamento del biodigestore verrà gestito completamente dal fornitore; per tanto il dimensionamento della parte dell'impianto per il riscaldamento del reattore si ferma al collettore principale.

La logica adottata è stata quella di dividere la rete in più circuiti: circuiti primari dei generatori di calore, circuiti secondari intermedi tra caldaia e cogeneratore e gli accumuli termici, circuiti terziari finali tra gli accumuli termici e collettori, dai quali partiranno le linee che raggiungeranno i terminali. Uno schema rappresentativo del criterio utilizzato è riportato in Figura 62.

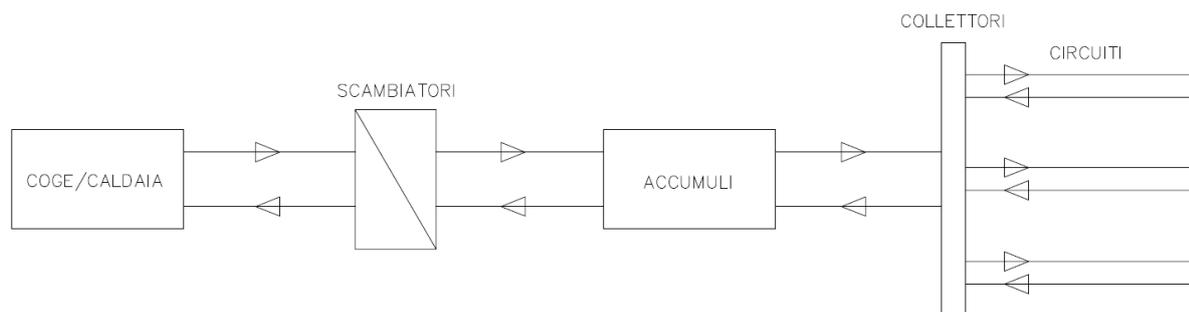


Figura 62 – Schema rappresentativo della logica adottata;

Nel complesso, i componenti principali e secondari di maggiore interesse che sono stati identificati sono:

- Un cogeneratore (ZONA L);
- Una caldaia (ZONA L);
- Una macchina frigorifera ad assorbimento (sotto-centrale palazzina uffici);
- Quattro scambiatori a piastre (sotto-centrali);
- Quattro accumuli termici (uno dedicato al biodigestore e presente nella relativa sotto-centrale termica; uno per il riscaldamento, uno per il raffrescamento estivo e uno per l'acqua calda sanitaria, tutti situati nella sotto-centrale della palazzina uffici);

In Figura 63 si riporta una versione semplificata dello schema funzionale dell'impianto, con i dispositivi appena citati e dei capisaldi definiti col l'obiettivo di rendere più efficiente il riconoscimento dei diversi tratti di tubazione, che verranno dimensionate in seguito.

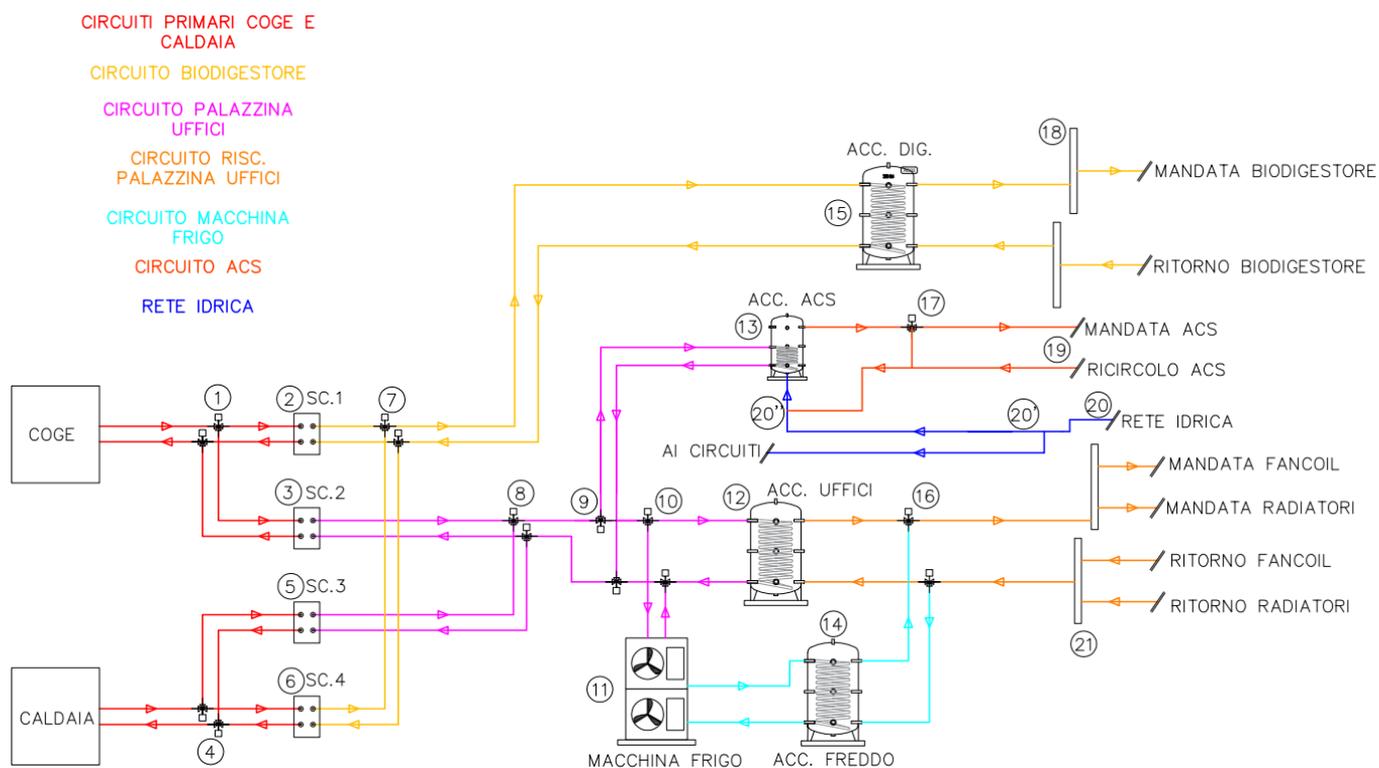


Figura 63 – Prima versione semplificata dello schema funzionale;

Come è noto dall'analisi svolta in precedenza all'interno del presente elaborato, il cogeneratore e la caldaia andranno a lavorare simultaneamente per soddisfare il carico termico richiesto delle utenze. Le uniche situazioni dove la caldaia coprirà la richiesta di calore dell'impianto sono durante l'avviamento del digestore anaerobico e durante le operazioni di manutenzione del cogeneratore. Viceversa, il cogeneratore non sarà affiancato dalla caldaia durante i fermi dovuti alla manutenzione di quest'ultima: le alternanze dei generatori di calore saranno opportunamente programmate in modo tale da riuscire sempre a fornire il calore richiesto dal biodigestore e non fermare mai la produzione di biogas. Il circuito del biodigestore sarà dimensionato in base alla potenza necessaria per il suo avviamento che, come è stato analizzato in precedenza, coincide ad una potenza pari a 350 kW. Sono stati previsti due scambiatori a piastre per ogni generatore di calore in modo tale che entrambi possano alimentare i due circuiti intermedi di riscaldamento della palazzina uffici e del digestore anaerobico. La regolazione dei flussi di acqua calda verrà effettuata tramite delle valvole a tre vie gestite dal sistema automatico di controllo. Quindi sia il digestore che la palazzina uffici potranno essere serviti termicamente da entrambi i generatori. All'interno del circuito della palazzina uffici saranno inoltre presenti delle ulteriori valvole a tre vie. All'occorrenza devieranno l'acqua verso l'accumulo dell'acs e, in estate, verso la macchina frigorifera ad assorbimento per la produzione di acqua fredda a 12°C. Anche quest'ultima parte di impianto è stata fornita di accumulo termico. L'acqua per il raffrescamento, sempre grazie a delle valvole a tre vie deviatrici, durante la commutazione stagionale verrà inviata al collettore primario, dal quale partiranno i circuiti verso gli ambienti.

Il dimensionamento della rete di distribuzione idraulica è stato effettuato utilizzando il metodo delle perdite di carico costanti, secondo il quale l'intera rete idraulica viene dimensionata mantenendo costante la perdita di carico per metro lineare di tubi; questa metodologia di calcolo risulta particolarmente affidabile in quanto consente un buon bilanciamento delle diramazioni[].

Per tutta la rete è stato scelto di adottare dei tubi in polietilene reticolato, il quale viene trattato in modo da ottenere molecole disposte a reticolo e legate fra loro. Questa specifica struttura molecolare permette ai tubi di avere una buona resistenza meccanica e una proprietà chiamata "memoria termica", la quale consente di riportare alla forma originaria i tubi anche nel caso di curve sbagliate o di schiacciamenti^[20]. Il materiale plastico scelto, le cui caratteristiche, riportate in Tabella 43, risultano compatibili con le condizioni progettuali imposte.

Polietilene reticolato	
Pressione max di esercizio [atm]	6-10
Temperatura max di esercizio [°C]	95

Tabella 43 – Dati caratteristici del polietilene reticolato;

5.2.2 DA GENERATORI DI CALORE A SCAMBIATORI

Il dimensionamento dei circuiti tra i due generatori di calore e gli scambiatori è stato svolto partendo dai dati noti grazie alle richieste di offerta dei fornitori: potenze nominali della caldaia e del cogeneratore, temperature di generazione dell'acqua calda e diametri degli attacchi di uscita. Dopo di ch , imponendo un salto di temperatura di 20 C, sono state ricavate la portata d'acqua necessaria e la velocit  del fluido vettore.

La portata d'acqua   stata ottenuta assumendo il calore specifico dell'acqua pari a 4,186 kJ/kgK. Una volta noti la portata e il diametro,   stato possibile calcolare la velocit . Essendo il tratto di tubazioni uscente dai generatori di calore il primo tratto del circuito,   stato utilizzato per determinare il coefficiente di perdita di pressione lineare che   stato successivamente applicato al resto del circuito. Note portata, diametro e velocit  sono state ricavati i $\Delta p/l$ dalle tabelle Caleffi, che risultano essere pari a 35 m.c.a. e 12 m.c.a., rispettivamente per i circuiti del cogeneratore e della caldaia.

Potenza nominale [kW,th]	168
Temp. di mandata [�C]	80
Temp. di ritorno [�C]	60
DN attacco	40
Portata [m ³ /h]	7,2
Velocit� [m/s]	1,5
Delta p su l [m.c.a.]	35

Tabella 44 – Dati relativi al cogeneratore;

Potenza nominale [kW,th]	350
Temp. di mandata [�C]	80
Temp. di ritorno [�C]	60
DN attacco	80
Portata [m ³ /h]	15,0
Velocit� [m/s]	1,0
Delta p su l [m.c.a.]	12

Tabella 45 – Dati relativi alla caldaia;

Per quanto riguarda gli scambiatori a piastre e, in generale, i salti di temperatura imposti nel processo di dimensionamento della rete, si riportano in Tabella 46 i valori:

Circuito	T. di mandata [°C]	T. di ritorno [°C]	ΔT [°C]
Primario Coge	80	60	20
Primario Caldaia	80	60	20
Secondario Digestore	75	65	10
Terziario Digestore	70	60	10
Secondario Uffici	75	65	10
ACS Uffici	50	10	40
Macchina Frigo	7	12	5
Fan Coil (Estivo)	12	17	5
Fan Coil (Invernale)	70	60	10
Radiatori	70	60	10

Tabella 46 – Dati relativi alle temperature nei diversi circuiti individuati;

5.2.3 DA SCAMBIATORI AD ACCUMULI TERMICI

In questo paragrafo si tratta il dimensionamento dei circuiti che portano il fluido termovettore dagli scambiatori a piastre agli accumuli termici di digestore e palazzina uffici. Per quanto riguarda il raffrescamento estivo della palazzina uffici è stato inserito sul relativo circuito secondario lo stacco che, grazie a commutazione stagionale, collegherà la macchina frigorifera agli scambiatori. È inoltre presente un piccolo circuito aggiuntivo dedicato che collegherà il generatore di freddo col relativo accumulo.

Note le potenze necessarie e le temperature di mandata e ritorno ai circuiti secondari tra gli scambiatori di calore e gli accumuli termici, è stato possibile dimensionare le tubazioni. Il procedimento seguito risulta essere identico rispetto a quanto detto per il circuito primario. Per il circuito del digestore la potenza usata per il dimensionamento risulta essere sempre 350 kW, mentre per il circuito della palazzina uffici la potenza scelta è quella del caso più gravoso da soddisfare contemporaneamente, ovvero la somma del fabbisogno di riscaldamento e di produzione dell'acs: 70 kW. Per quanto riguarda i collegamenti agli accumuli di ACS e al circuito di generazione del freddo della palazzina uffici, sono state adottate per il dimensionamento le potenze di 18,6 e 42,5 kW rispettivamente.

5.2.4 DA ACCUMULI TERMICI A COLLETTORI E TERMINALI

Per procedere al dimensionamento del circuito terziario tra gli accumuli e i collettori principali è stato necessario prima dimensionare i terminali di riscaldamento/raffrescamento presenti in ambiente. Come già accennato precedentemente, non si hanno molte informazioni relative al circuito di riscaldamento del biodigestore: è stata quindi svolta la progettazione di questa parte di impianto dai generatori di calore al collettore relativo, il quale sarà posizionato nella sotto-centrale del digestore. Da questo punto in poi, la parte impiantistica che servirà a riscaldare la materia organica sarà preso in carico dal fornitore. Per quanto riguarda invece l'impianto della palazzina

uffici, sono stati individuati due circuiti di tipo diretto che partono dal collettore primario e andranno ai terminali posizionati in ambiente:

- Un circuito dedicato ai radiatori, posizionati nei servizi al piano terra e nei servizi al primo piano;
- Circuito dedicato ai ventilconvettori, posizionati in tutte le altre zone termiche della palazzina;

Il circuito dei fan coil lavorerà in commutazione stagionale, quindi il relativo dimensionamento è stato svolto su dei ventilconvettori a due tubi.

Note le potenze per ogni ambiente ricavate durante lo svolgimento dell'analisi, e riportate in Tabella 47, grazie alla simulazione energetica condotta con Edilclima© è stato possibile svolgere il dimensionamento dei terminali.

Piano	Locale	Volume [m ³]	T _{set,invernale} [°C]	Q̇ _{invernale} [kW]	T _{set,estiva} [°C]	Q̇ _{estiva} [kW]
Terra	Magazzino	153,3	-	-	-	-
Terra	Sala di controllo	109,7	20	4,0	26	3,4
Terra	Laboratorio	60,4	20	2,2	26	1,9
Terra	Guardiana	67,6	20	2,5	26	2,1
Terra	Servizi	15,4	24	1,7	-	-
1°	Sala riunioni	128,0	20	4,7	26	4,0
1°	Ufficio 1	115,5	20	4,2	26	3,6
1°	Ufficio 2	96,3	20	3,5	26	3,0
1°	Mensa	77,6	20	2,9	26	2,4
1°	Ripostiglio	43,8	20	1,6	26	1,4
1°	Spogliatoio	64,7	24	7,1	26	2,0
1°	Servizi	92,4	24	10,1	-	-
1°	Corridoio	192,1	20	7,1	26	6,0

Tabella 47 – Dati progettuali relativi alla palazzina uffici;

Per quanto riguarda il dimensionamento dei radiatori, è stato svolto ridistribuendo il carico termico del locale in oggetto in base al numero di terminali scelto al suo interno. A titolo di esempio, è riportato di seguito il procedimento di dimensionamento di uno dei sei radiatori previsti per il riscaldamento dei servizi al primo piano della palazzina uffici.

Sono stati assunti i seguenti dati necessari: differenza tra temperatura media dell'acqua e temperatura ambiente ΔT uguale a 41°C, temperatura interna di progetto pari a 24°C, temperatura di ingresso T_{in} pari a 70°C, temperatura di uscita T_{out} pari a 60°C, quindi una differenza di temperatura dell'acqua di progetto ($T_{in}-T_{out}$) di 10°C. Il catalogo utilizzato fornisce diverse altezze disponibili dei singoli elementi che andranno a comporre il radiatore, con i seguenti dati: numero di colonne, la differenza nominale tra temperatura media dell'acqua e la temperatura ambiente ΔT_0 .

pari a 50°C, il coefficiente m. Una volta scelta l'altezza desiderata, l'emissione nominale del singolo elemento è stata ricavata tramite la formula:

$$\phi = \phi_o \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_o} \right)^m \quad [W] \quad (5.1)$$

Dopo di che il numero di elementi è stato scelto dividendo il carico termico del singolo radiatore con l'emissione nominale del singolo elemento. Ottenuti il numero di elementi che compongono il terminale e la sua emissione effettiva, la portata è stata ricavata ipotizzando come in precedenza il calore specifico dell'acqua pari a 4,186 [kJ/kgK]. L'operazione è stata ripetuta per ogni radiatore, trovando così la portata totale dell'intero circuito.

Il dimensionamento del circuito dei ventilconvettori è stato invece condotto facendo riferimento al fabbisogno di raffrescamento estivo. È stato verificato che, dimensionando i fan-coil per il caso estivo, il carico invernale risulta abbondantemente soddisfatto. Sono state utilizzate le tabelle dedicate contenute nel catalogo di un fornitore per trovare i terminali più appropriati. Sono stati assunti i seguenti dati di progetto: differenza tra temperatura dell'acqua in ingresso (12°C) e in uscita dal terminale (17°C) ΔT pari a 5°C, temperatura di bulbo secco T_{bs} pari a 26°C, temperatura di bulbo umido T_{bu} pari a 16°C. Come nel caso precedente, per ogni ambiente il carico termico è stato ridistribuito in base al corrispondente numero di terminali scelto. Dalla tabella sono stati scelti i terminali leggendo e interpolando, quando necessario, i dati presenti. Una volta terminato il dimensionamento dei ventilconvettori è stato quindi possibile determinare la portata totale del circuito fancoil e le dimensioni delle tubazioni. Arrivati a questo punto, il procedimento svolto nei punti precedenti si è ripetuto nuovamente per dimensionare i tratti di tubi che vanno dagli accumuli ai collettori principali di centrale.

In Tabella 48 sono riportati i dati relativi alla rete idraulica ottenuti dall'uscita dei generatori di calore alla mandata dei circuiti dei terminali, che partono dai collettori primari.

Tratto	DN [mm]	DN ["]	Velocità [m/s]	Portata [m ³ /h]	Δp/l [m.c.a.]
COGE-1	40	1 ½"	1,5	7,2	35
1-2	40	1 ½"	1,5	7,2	35
1-3	32	1 ¼"	1,1	3,0	35
CALDAIA-4	80	3"	1,1	15,0	12
4-5	32	1 ¼"	0,9	3,0	12
4-6	80	3"	1,1	15,0	12
2-7	65	2 ½"	0,9	7,2	12
6-7	80	3"	1,5	15,0	12
7-15	80	3"	1,0	15,0	12
3-8	40	1 ½"	1,2	6,0	30
5-8	40	1 ½"	1,2	6,0	30
8-9	40	1 ½"	1,2	6,0	30
9-13	25	1"	0,9	1,6	30
9-10	40	1 ½"	1,15	4,4	30
10-11	40	1 ½"	1,1	3,7	30
10-12	40	1 ½"	1,15	4,4	30
11-14	32	1 ¼"	1,7	5,2	90
15-18	80	3"	1,0	15,0	35
18-MANDATA	80	3"	1,0	15,0	35
13-17	25	1"	0,4	0,54	14
17-MANDATA	25	1"	0,4	0,54	14
RICIRCOLO-19	25	1"	0,4	0,54	14
19-13	25	1"	0,4	0,54	14
20-21	15	½"	-	-	-
21-19	25	1"	0,9	0,54	14
21-AI CIRCUITI	15	½"	-	-	-
12-16	40	1 ½"	0,9	4,4	16
16-22	40	1 ½"	0,9	4,4	16
14-16	40	1 ½"	0,8	5,2	16
22- MANDATA FANCOIL	40	1 ½"	0,8	5,2	16
22-MANDATA RADIATORI	25	1"	0,6	1,0	16

Tabella 48 – Dati ottenuti relativi alle caratteristiche della rete idraulica dimensionata;

5.3 DIMENSIONAMENTO E IDENTIFICAZIONE DEI DISPOSITIVI SECONDARI

5.3.1 POMPE

Data la divisione dei circuiti adottata e la struttura della rete, sono state posizionate all'interno dello schema funzionale 9 elettropompe. Queste permetteranno la circolazione dell'acqua all'interno dei circuiti della rete di distribuzione idraulica. Nell'effettuare il dimensionamento delle tubazioni con il metodo delle perdite di carico linearmente costanti, si calcolano le cosiddette perdite distribuite. Per ottenere la prevalenza richiesta dalle pompe è stato necessario calcolare anche le perdite di carico localizzate. Queste ultime sono state ottenute grazie alle tabelle Caleffi© di riferimento, che forniscono i coefficienti di perdita localizzata (β) relativi alle varie tipologie di resistenze localizzate. Sono stati quindi letti i coefficienti di perdita beta dalle tabelle e successivamente utilizzati nella seguente formula:

$$\Delta p_{loc} = \beta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad [m. c. a.] \quad (5.2)$$

La metodologia di calcolo scelta prevede che il dimensionamento della pompa venga effettuato usando come riferimento il punto più "sfavorito" del circuito, ovvero il punto del circuito in esame tale per cui il suo raggiungimento da parte del fluido rappresenta il caso di maggiore generazione di perdite di carico rispetto a tutti gli altri punti del circuito stesso. Individuati questi punti per ogni circuito, è stata moltiplicata la lunghezza del tratto per il $\Delta p/l$ ricavato in precedenza, ottenendo così il totale delle perdite distribuite. Il risultato è stato successivamente sommato al totale delle perdite concentrate del tratto in oggetto, ricavate sommando le singole perdite di carico per ogni punto di resistenza localizzata. Infine, una volta ottenute le perdite di carico totali sono state ricavate la potenza meccanica delle pompe e, utilizzando un valore di rendimento medio pari a 0,6 (η_p), le rispettive potenze elettriche con le seguenti formule:

$$|P_m| = \dot{m} \cdot \frac{\Delta p}{\rho} \quad [W] \quad (5.3)$$

$$|P_{el}| = \frac{P_m}{\eta_p} \quad [W] \quad (5.4)$$

In Tabella 49 sono riportati i risultati ottenuti.

Circuito	Sigla	Prevalenza [m.c.a.]	Portata [m3/h]	Potenza El. [kW]
Cogeneratore	P01	23,3	7,22	0,78
Caldaia	P02	9,8	15,05	0,68
Accumulo biodigestore	P03	6,9	15,05	0,49
Biodigestore	P04	-	15,05	-
Accumulo riscaldamento uffici	P05	13,2	5,97	0,36
Accumulo ACS	P06	14,3	0,54	1,06
Macchina Frigo.	P07	7,2	5,16	0,17
Ventilconvettori	P08	67,4	4,37	1,36
Radiatori	P09	9,8	1,01	0,13

Tabella 49 – Dati ottenuti relativi al dimensionamento delle pompe;

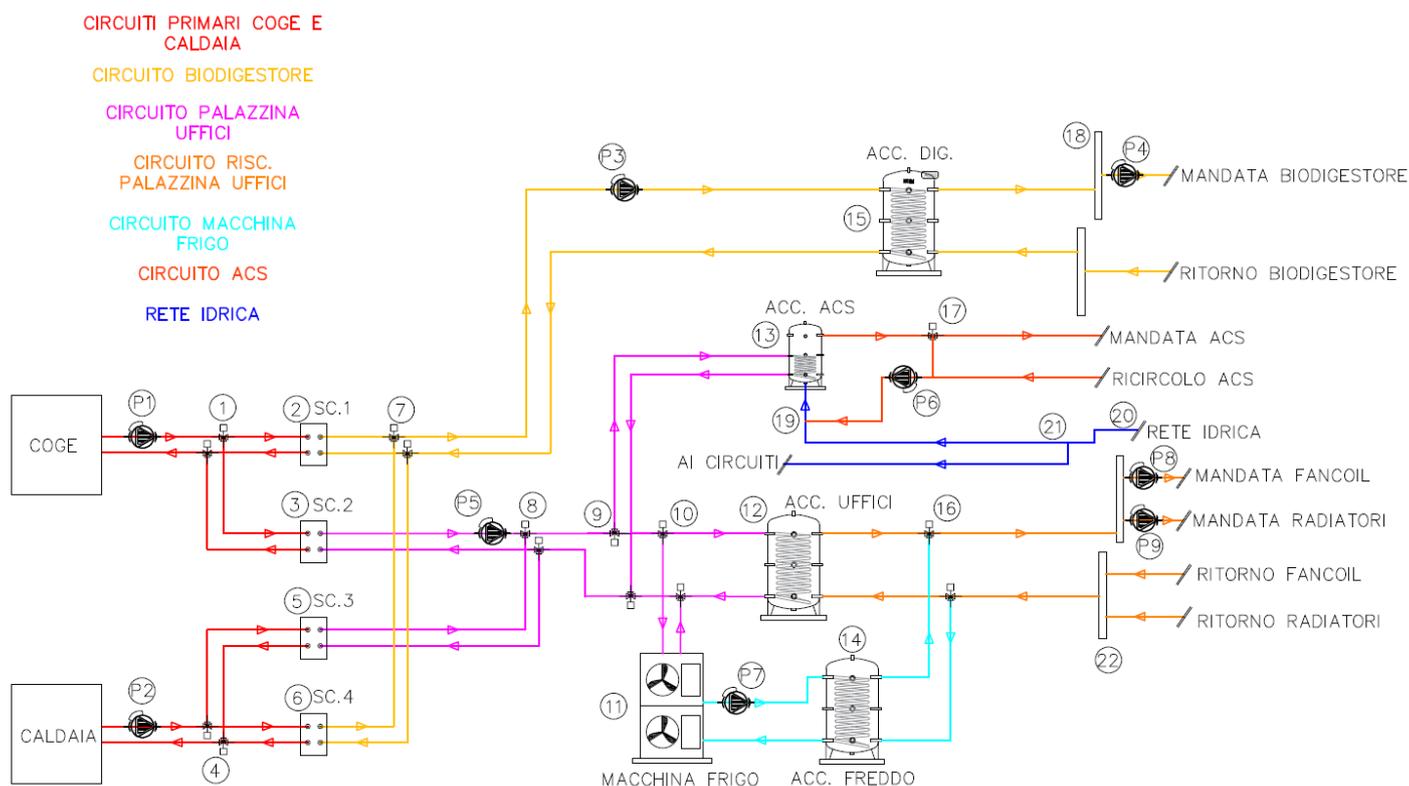


Figura 64 – Seconda versione semplificata dello schema funzionale;

In una fase successiva di progettazione, per raggiungere un livello esecutivo/costruttivo sarà necessario individuare un fornitore. Dopo di che i dati necessari per richiedere delle offerte saranno già disponibili grazie al dimensionamento svolto: utilizzando la portata e i metri di colonna d'acqua di prevalenza calcolati sarà possibile scegliere il modello e la taglia più appropriata.

5.3.2 ACCUMULI TERMICI

Per il dimensionamento degli accumuli termici è stato utilizzato un valore standard, pari a 30 litri per ogni kW installato [l/kW]. Mentre per dimensionare l'accumulo dell'ACS è stato utilizzato il tool sviluppato da Caleffi©, messo a disposizione sul sito ufficiale dell'azienda.

Componente	Volume [l]
Accumulo Biodigestore	10.500
Accumulo Palazzina Uffici	1.530
Accumulo Macchina Frigo	900
Accumulo ACS	400

Tabella 50 – Dati relativi agli accumuli termici ottenuti;

5.3.3 KIT INAIL

La normativa prevede l'installazione di una serie di dispositivi di sicurezza, protezione e controllo da installare negli impianti di riscaldamento. Nello specifico, le disposizioni emanate come specificazioni tecniche applicative del Titolo II del D.M. 1.12.75 ai sensi dell'art. 26 del decreto medesimo sono riportate nella Raccolta R Inail (ex ISPEL), la quale costituisce la regolamentazione tecnica sugli impianti di riscaldamento ad acqua. Il campo di applicazione è attribuibile agli impianti centrali di riscaldamento utilizzando acqua calda sotto pressione con temperatura non superiore a 110°C, e potenza nominale massima complessiva dei focolari (o portata termica massima complessiva dei focolari) superiore a 35 kW^[21].

Come riportato nella Raccolta R Inail, per la tipologia di impianti sopra citati vanno installati obbligatoriamente una serie di dispositivi di sicurezza, protezione e controllo entro 1 metro dal generatore di calore^[21]. I dispositivi, raffigurati in Figura 65, sono i seguenti:

- a) Pozzetto di controllo;
- b) Manometro accoppiato a riccio ammortizzatore e rubinetto porta manometro;
- c) Valvola di sicurezza accoppiato a imbuto di scarico con curva orientabile;
- d) Termometro di controllo;
- e) Pressostato di minima;
- f) Pressostato di sicurezza;
- g) Termostato ad immersione regolabile;
- h) Termostato ad immersione di sicurezza omologato;
- i) Vaso di espansione;
- j) Valvola di intercettazione combustibile;

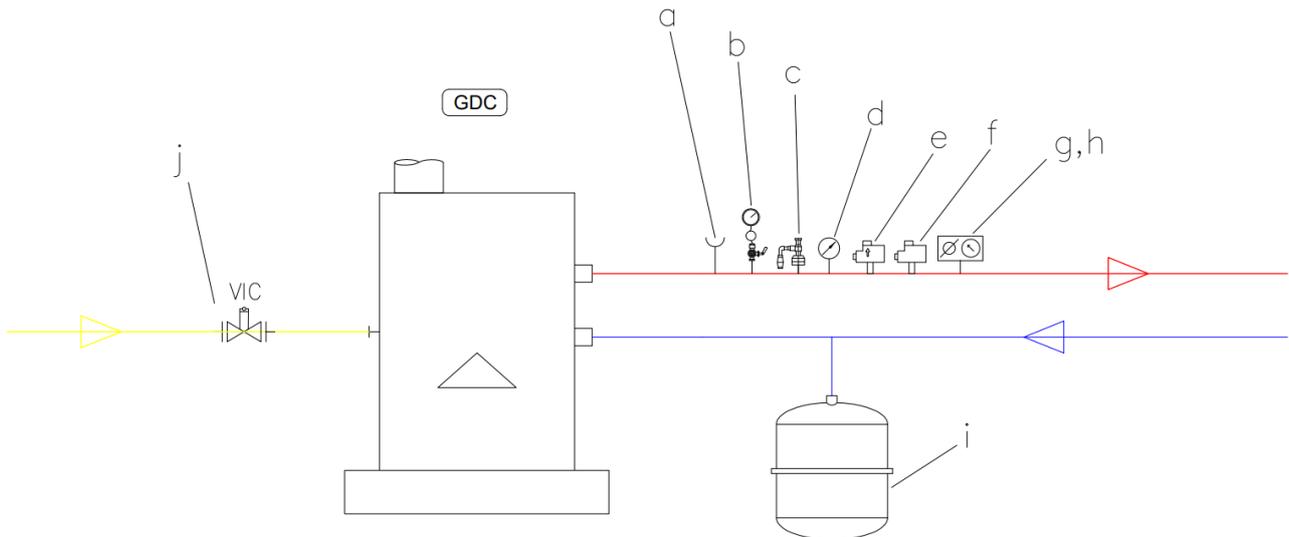


Figura 65 – Rappresentazione grafica del kit di dispositivi INAIL adottata;

5.3.4 VALVOLE DI SICUREZZA

Le valvole di sicurezza sono dei dispositivi tipicamente installati per il controllo della pressione sui generatori di calore negli impianti di riscaldamento. Una volta raggiunta la pressione di taratura la valvola si apre e scarica in atmosfera. Questa azione evita che la pressione dell'impianto possa raggiungere valori di pressione pericolosi per il generatore e i componenti dell'impianto^[22].

Per il dimensionamento delle valvole di sicurezza da installare sono state seguite le indicazioni presenti nel fascicolo R.2, sezione dispositivi di sicurezza, della Raccolta R^[21]. Dalle schede tecniche sono note le pressioni massime di esercizio dei due generatori di calore, 6 bar per il cogeneratore e 5 bar per la caldaia, e le pressioni massime degli accumuli scelti.

Secondo quanto riportato dalla Raccolta R Inail, le valvole di sicurezza vanno dimensionate con la seguente formula:

$$A = 0,005 \cdot W \cdot \frac{F}{0,9 \cdot K} \quad [cm^2] \quad (5.5)$$

Dove A [cm²] è l'area minima della sezione trasversale netta dell'orifizio della valvola, W [kg/h] è la capacità di scarico della valvola, F è il fattore di pressione desunto dalla tabella mostrata in Figura 66 in funzione della pressione di scarico, K è il coefficiente di efflusso desunto dal certificato di accettazione del dispositivo, 0,9 è invece un coefficiente di sicurezza.

p	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70
F	2,47	2,32	2,19	2,07	1,97	1,87	1,79	1,71	1,63	1,57	1,51	1,45	1,40
p	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00
F	1,35	1,31	1,26	1,22	1,19	1,15	1,12	1,09	1,06	1,03	1,01	0,98	0,96
p	3,10	3,20	3,30	3,40	3,50	3,60	3,70	3,80	3,90	4,00	4,20	4,40	4,60
F	0,93	0,91	0,89	0,87	0,85	0,84	0,82	0,80	0,79	0,77	0,74	0,71	0,69
p	4,80	5,00	5,20	5,40	5,60	5,80	6,00	6,20	6,40	6,60	6,80	7,00	7,20
F	0,67	0,65	0,62	0,61	0,59	0,57	0,56	0,54	0,53	0,51	0,50	0,49	0,48
p	7,40	7,60	7,80	8,00	8,20	8,40	8,60	8,80	9,00	9,50	10,0	10,5	11,0
F	0,46	0,45	0,44	0,43	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,37	0,36	0,34	0,32

Figura 66 – Valori di F per pressioni di scarico da 0,5 a 11 bar (Fonte: Raccolta R);

Il valore della capacità di scarico della valvola W espresso in [kg/h] può essere ricavato in base alla seguente formula di natura empirica:

$$W = \frac{Pot_{installata}}{0,58} \quad [kg/h] \quad (5.6)$$

Seguendo i passaggi sopra indicati presenti nel fascicolo e usando la scheda tecnica fornita da Caleffi© per le sue valvole di sicurezza presenti sul mercato, sono state scelte le valvole delle taglie più opportune: è stata verificata che l'area dell'orifizio della valvola scelta da catalogo fosse maggiore dell'area minima A ricavata numericamente. I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 51:

Componente	Pressione massima di esercizio [bar]	Misura valvola di sicurezza [pollici]
Cogeneratore	6	½"
Caldaia	5	1"
Accumulo Biodigestore	6	1"
Accumulo Palazzina Uffici	6	½"
Accumulo Macchina Frigo.	6	½"
Accumulo ACS	6	½"

Tabella 51 – Dati relativi alle valvole di sicurezza dimensionate per ogni dispositivo necessario;

5.3.5 VASI D'ESPANSIONE

I vasi d'espansione sono dei dispositivi utilizzati per compensare l'aumento di volume dell'acqua dovuto alla crescita di temperatura all'interno del circuito. Questo sia negli impianti di riscaldamento che negli impianti di produzione di acqua calda sanitaria^[23].

In questo caso sono stati scelti dei vasi d'espansione chiusi a membrana, dimensionati per ogni circuito e per gli accumuli presenti in centrale termica utilizzando le seguenti formule:

$$V = \frac{E}{1 - \frac{p_i}{p_f}} \quad [l] \quad (5.7)$$

$$E = e \cdot C \quad [l] \quad (5.8)$$

Dove V [l] è il volume del vaso, E [l] è il volume d'espansione, e è il coefficiente adimensionale di dilatazione pari a 0,035, C [l] è il contenuto d'acqua del circuito/impianto analizzato (stimato tramite un parametro standard pari a 12,5 litri ogni kW installato), p_i [m.c.a.] è la pressione iniziale data dalla somma della precarica (assunta pari a 3 m.c.a.) e del contributo idrostatico p_{idr} [bar], p_f [bar] è la pressione finale o pressione di taratura della valvola di sicurezza. La Tabella 52 contiene i valori dei volumi calcolati per ogni vaso d'espansione.

Componente	Volume Vaso [l]
Vaso Cogeneratore	120
Vaso Caldaia	280
Vaso Circuito Secondario Biodigestore	245
Vaso Circuito Secondario Palazzina Uffici	50
Vaso Circuito Macchina Frigo	40
Vaso Circuito Terziario Biodigestore	255
Vaso Circuito ACS	15
Vaso Circuito Terziario Palazzina Uffici	40
Vaso Accumulo Biodigestore	590
Vaso Accumulo Palazzina Uffici	85
Vaso Accumulo Macchina Frigo	50
Vaso Accumulo ACS	30

Tabella 52 – Dati relativi ai volumi dei vasi d'espansione dimensionati;

5.3.6 LINEA DI CONSEGNA DEL GAS

Note le potenze dei generatori di calore è stato possibile stimare il diametro delle tubazioni in acciaio che collegheranno la consegna del gas dal contatore al cogeneratore e alla caldaia. Assumendo i valori di potere calorifico inferiore e di densità del gas di rete indicati in Tabella 53, sono state ricavate le portate necessarie ad alimentare i due generatori di calore.

H _c [kJ/m ³]	35.790,0
ρ _c [kg/m ³]	0,71

Tabella 53 – Dati relativi al metano;

Ipotizzando la velocità del gas di circa 6 m/s, è stata infine ricavata la sezione e successivamente il diametro corrispondente. Con l'ausilio di tabelle contenenti i diametri nominali convenzionali per l'acciaio sono stati scelti i diametri più appropriati.

Linea di consegna combustibile	Potenza [kW]	\dot{V}_c [m ³ /s]	\dot{m}_c [kg/s]	Diametro Nominale
Cogeneratore	390,5	10,91 e-3	7,75 e-3	DN 40
Caldaia	350,0	9,78 e-3	6,94 e-3	DN 40

Tabella 54 – Dati relativi alla linea di combustibile dimensionata;

5.3.7 LINEA DI SCARICO DEI FUMI

Successivamente è stato effettuato un dimensionamento di massima della sezione dei tubi del camino di scarico dei fumi, per entrambi i generatori di calore. Sono state fatte delle ipotesi a tal fine: combustione con un eccesso d'aria pari al 20%, densità dei fumi uguale alla densità dell'aria calcolata con la legge dei gas (pari a circa 1,03 kg/m³), velocità dei fumi pari a 4 m/s.

È stato effettuato un bilancio di massa al fine di stimare la portata massica dei fumi, espressa nella formula seguente:

$$\dot{m}_{fumi} = \dot{m}_{aria} + \dot{m}_{comb} \quad [kg/s] \quad (5.9)$$

La portata di combustibile è già nota dai calcoli precedenti, mentre per ricavare la portata di aria comburente è stata utilizzata la seguente formula:

$$\dot{m}_{aria} = 1,2 \cdot A_{tm} \cdot \dot{m}_{comb} \quad [kg/s] \quad (5.10)$$

Dove A_{tm} [kg_{aria}/kg_{metano}] è la quantità di aria teorica necessaria per l'ossidazione di un chilo di gas metano pari a 17,3, mentre 1,2 quantifica l'eccesso d'aria ipotizzato.

Note portate di combustibile e di aria comburente è stato possibile ricavare mediante (5.9) la portata di fumi prodotti dal processo di combustione. Utilizzando successivamente la velocità dei fumi ipotizzata in precedenza, sono stati ricavati sezione e diametro dei tubi di scarico in acciaio, riportati in Tabella 55.

Linea di scarico fumi	Potenza [kW]	\dot{V}_f [m ³ /s]	A tubi [m ²]	Diametro Nominale
Cogeneratore	390,5	16,38 e-3	0,041	DN 20
Caldaia	350,0	14,68 e-3	0,037	DN 20

Tabella 55 – Dati relativi alla linea di scarico fumi dimensionata;

5.3.8 DEFANGATORI E FILTRI A Y

Per completare lo schema funzionale e portare il livello di dettaglio a definitivo, sono stati aggiunti altri componenti secondari. In prossimità dell'allaccio dell'impianto alla rete idrica, verranno installati due gruppi di riempimento: uno per il circuito dell'acqua calda sanitaria e uno per il resto dell'intera rete idraulica. Il dispositivo chiamato gruppo di riempimento ha lo scopo di mantenere stabile la pressione dell'impianto ad un valore preimpostato, integrando automaticamente l'acqua mancante all'occorrenza. Una volta attivatosi, l'alimentazione si fermerà nel momento in cui la pressione di taratura verrà raggiunta. È formato da un riduttore di pressione, un filtro in entrata e due valvole di intercettazione, una a monte e una a valle^[24].

Altri dispositivi aggiunti alla rete sono i defangatori accoppiati a dei filtri a Y, su ogni circuito chiuso della rete. Il defangatore ha infatti lo scopo di separare le impurità circolanti, quali particelle di sabbia e fanghi, nei circuiti chiusi degli impianti.

Sono stati infine aggiunte delle sonde di temperatura posizionate:

- A monte e a valle degli scambiatori e accumuli;
- Sugli accumuli termici;
- Sulle mandate e sui ritorni dei circuiti finali;

La temperatura verrà letta dal sistema di regolazione elettronico che verrà implementato. Il sistema PLC userà i dati letti dai sensori digitali ed analogici che verranno installati nell'impianto per effettuare le regolazioni più opportune, in modo da garantire l'efficienza di funzionamento più alta possibile. Questo aspetto non è stato approfondito nel corso di questo elaborato: costituisce un'ulteriore parte di impianto da affrontare e progettare per arrivare ad ottenere un progetto di livello esecutivo/costruttivo dell'impianto trattato.

L'elaborato relativo allo schema funzionale ottenuto fino a questo punto della fase di progettazione è stato allegato al presente lavoro (ALLEGATO 01).

6. CONCLUSIONI

I risultati degli studi e delle analisi condotte dalla comunità scientifica internazionale mostrano come l'attività antropica abbia ormai segnato pesantemente l'ecosistema e le condizioni presenti sul pianeta. Al fine di intervenire prima che questi cambiamenti risultino irreversibili, c'è la necessità collettiva di cercare delle soluzioni più efficaci e di rivalutare lo stile di vita odierno delle persone. Il presente elaborato di tesi vuole fornire delle nozioni tecniche relative al biometano, così da fare chiarezza e contestualizzare l'opportunità rappresentata da questa fonte rinnovabile soprattutto visti l'attuale periodo storico, i cambiamenti climatici, la situazione geopolitica più recente e la non adeguata capacità di trattamento dei rifiuti organici del territorio torinese. Un incremento considerevole della produzione di questo gas a livello nazionale porterebbe diversi vantaggi. Primo tra tutti l'acquisizione di una maggiore indipendenza nazionale legata all'import di fonti energetiche dall'estero: le vicende geopolitiche delle ultime settimane ci mostrano come uno spostamento di equilibri politici possa causare enormi ripercussioni in questo senso, creando delle problematiche non risolvibili nell'immediato. Un altro vantaggio sarebbe quello di aumentare la capacità di smaltimento e valorizzazione di rifiuti organici, che al momento risultano ancora non sufficienti e disomogenei sul tutto il territorio nazionale. Gli impianti di compostaggio della F.O.R.S.U. sono realizzati ormai da decenni, anche se oggi non risultano ancora sufficienti per lo smaltimento di questa tipologia di rifiuto. Sempre ragionando nell'ottica di creare le basi di un'economia circolare, sarà opportuno aumentare ed incentivare sempre di più la realizzazione di impianti di digestione anaerobica per la produzione di biometano, preferibilmente in assetto combinato in modo tale da valorizzare il più possibile la materia organica ed evitare il ricorso alle discariche. Un esempio impiantistico che sfrutta entrambe le tipologie di digestione, anaerobica e aerobica, del rifiuto organico è rappresentato proprio dall'impianto trattato in questo lavoro. Alla luce delle considerazioni fatte, l'impianto progettato da Ferplant risulta essere una proposta di enorme valore e importanza, oltre che perfettamente in linea con gli ultimi provvedimenti e stanziamenti economici approvati dall'Unione Europea, dati i suoi ambiziosi obiettivi di transizione energetica ed ecologica. La sua produzione annuale di biometano, finalizzato ad uso nel settore dei trasporti, permetterà non solo di alimentare automezzi a metano con un bilancio relativo alle emissioni di CO₂ pari a zero, ma anche di aumentare la capacità territoriale di valorizzazione del rifiuto organico, che oggi viene trattato in grandi quantitativi in impianti fuori provincia. Riguardo a quest'ultimo aspetto, è stato calcolato che il solo risparmio di gasolio utilizzato dalla flotta gommata per il trasporto delle 30.000 tonnellate all'anno di F.O.R.S.U. al di fuori del territorio torinese, eviterebbe il rilascio in atmosfera di circa 1.500 tonnellate di CO₂.

Per quanto riguarda la parte del progetto di Ferplant relativa alla generazione e all'uso interno di energia, lo stato progettuale era tale per cui molti aspetti del sistema erano ancora da definire nei dettagli. Questo ha inciso sulla scelta di incentrare la parte tecnica dell'elaborato sull'analisi energetica dell'intero impianto e, di conseguenza, sulla ricerca del migliore assetto del sistema di generazione sia in termini di efficienza energetica che dal punto di vista economico. Inizialmente sono stati quindi quantificati i consumi energetici e i costi annuali necessari per sostenere tutto il processo descritto in precedenza. Date le condizioni progettuali, i risultati dell'analisi termoeconomica svolta hanno stabilito che il miglior layout è dato dal funzionamento contemporaneo di una caldaia e di un cogeneratore, entrambi alimentati a gas metano prelevato dalla rete di distribuzione. Mentre la potenza nominale della caldaia da prevedere è legata, come visto, al

processo di avviamento del digestore anaerobico, è stato opportuno dimensionare il cogeneratore scegliendone la taglia più appropriata. Quest'ultimo passaggio è stato effettuato grazie alla cumulata dei carichi termici richiesti dall'impianto durante il corso dell'anno tipo di funzionamento. Ne sono emerse le potenze termiche ed elettriche nominali del gruppo elettrogeno, grazie alle quali è stato possibile scegliere un modello del fornitore individuato, caratterizzato dai seguenti dati di targa: 168 kW termici, 160 kW elettrici e un rendimento globale dell'84%. A tale scopo sono stati utilizzati un software di simulazione energetica e le informazioni fornite dall'azienda leader che si occuperà della realizzazione e dell'installazione del biodigestore. Una volta individuate le taglie dei due generatori di calore, e stabilito l'assetto che permetterà il loro funzionamento ottimale, è stato possibile passare alla progettazione della centrale termica e del sistema di distribuzione idraulico. Infine, grazie al dimensionamento dei tratti di tubazione della rete tramite la metodologia di calcolo delle perdite di carico linearmente costanti, e grazie al dimensionamento dei componenti principali e secondari di maggiore interesse, è stato raggiunto un livello di dettaglio progettuale di tipo definitivo. Lo schema funzionale e i risultati prodotti sono sufficienti per approfondire gli ultimi aspetti mancanti e individuare i dispositivi necessari al completamento del progetto del sistema di riscaldamento dell'intero impianto, in modo tale da portare il livello di dettaglio da definitivo ad esecutivo/costruttivo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sannino G. “Energia e cambiamento climatico”, DOI 10.12910/EAI2019-020, 2019.
- [2] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- [3] [2030 Climate Target Plan \(europa.eu\)](https://european-council.europa.eu/media/e300042c-323d-4761-991b-6d9eb360442c/asset-main.pdf)
- [4] “Comunicazione della commissione al parlamento europeo, al consiglio, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni, Il Green Deal europeo”, Bruxelles, 2019.
- [5] “Piano nazionale di ripresa e resilienza”, Mise, 2021.
- [6] “L’impegno dell’Unione Europea per un’economia circolare”, Parlamento Europeo, Ufficio d’informazione a Milano.
- [7] Ballabio A., Berardi D., Valle N. “Il ruolo del waste-to-energy”, Laboratorio SPL Collana Ambiente, 2020.
- [8] <https://www.eni.com/it-IT/attivita/waste-to-fuel.html>, sito ufficiale ENI.
- [9] “Rapporto sullo stato del sistema di gestione dei rifiuti”, Città Metropolitana di Torino-Osservatorio Metropolitan Rifiuti, 2021.
- [10] “Biometano”, Comitato Termotecnico Italiano, Milano.
- [11] https://www.snam.it/it/transizione_energetica/biometano/biometano, sito ufficiale SNAM Rete e Gas.
- [12] Saracco A.M., Antonini M. “Dal biogas al biometano, un’opportunità per l’agricoltura”, Accademia di agricoltura di Torino, 2014.
- [13] “Digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi: Aspetti fondamentali, progettuali, gestionali, di impatto ambientale ed integrazione con la depurazione delle acque reflue”, APAT, 2005.
- [14] Venetoagricoltura.org.

- [15] “Filtro a carbone attivo per biogas, tipo FGAC”, Ecoplants.
- [16] Corbellini V., Insabato G., Malpei F. “Biometano, Tecnologie di upgrade, norme e valutazioni economiche”, La Fabbrica della Bioenergia-Politecnico di Milano, 2015.
- [17] <https://www.mvtplant.com/prodotti/scrubber-a-letto-fisso>, sito ufficiale MVTplant.
- [18] “Gli odori negli impianti di depurazione acque”, Capitolo 5 - Sistemi di controllo e di trattamento degli odori.
- [19] “Guida alla cogenerazione nelle imprese”, Viessmann Italia, 2019.
- [20] Doninelli M., “Le reti di distribuzione”, “Quaderni Caleffi”, 1° numero, Italia.
- [21] “Raccolta R”, Inail, regolamentazione tecnica sugli impianti di riscaldamento ad acqua calda.
- [22] “Valvole di sicurezza certificata e tarata a banco INAIL (Ex ISPESL), serie 527”, scheda tecnica, Caleffi.
- [23] “Vasi d’espansione, serie 556 – 568 – 5557”, scheda tecnica, Caleffi.
- [24] “Defangatori DIRTCAL® - DIRTMAG®, serie 5462 – 5463 -5465 – 5466 – 5468 – 5469”, scheda tecnica, Caleffi.