

Università degli studi di Padova

Dipartimento di ingegneria industriale

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Energetica

ANALISI DEL CICLO DI VITA DI UN IMPIANTO ORC

Relatrice: Prof.ssa Anna Stoppato

Laureando: Enrico Pittis

Matr.1159837

Anno accademico 2018/2019

Sommario

1 INTRODUZIONE.....	1
2 IL CICLO ORC	3
3 METODO LCA	5
3.1 IL METODO	6
3.2 DEFINIZIONE SCOPI ED OBIETTIVI.....	7
3.3 ANALISI DI INVENTARIO.....	8
3.4 ANALISI DEGLI IMPATTI	9
3.5 INTERPRETAZIONE	11
3.6 LCA CON SIMAPRO	11
4 MODULO ZUCCATO ENERGIA	13
4.1 SCHEMA IMPIANTO	13
4.2 COMPONENTI	15
5 MODELLAZIONE IMPIANTO	18
5.1 DEFINIZIONE SCOPI E OBIETTIVI	19
5.2 ANALISI DI INVENTARIO.....	20
5.3 MATERIALI E LAVORAZIONI	21
5.4 INVENTARIO IN SIMAPRO	27
5.5 FASE DI UTILIZZO	31
6 ANALISI DEGLI IMPATTI	33
6.1 CATEGORIE D'IMPATTO.....	33
6.2 CONDIZIONI AL CONTORNO	34
6.3 PRODUZIONE ED ASSEMBLAGGIO.....	38
6.4 INTERO CICLO DI VITA.....	41
6.5 CO ₂ BIOGENICA.....	46
6.6 CONFRONTO FLUIDI.....	48
7 INTERPRETAZIONE.....	50
7.1 EMISSIONI CO ₂ EQUIVALENTE	50
7.2 UTILIZZO DIVERSI FLUIDI.....	51
8 CONFRONTI.....	53
8.1 TURBOGAS MODALITA' ELETTRICA	53
8.2 RETE ELETTRICA	56
9 MODALITA' COGENERATIVA.....	58
9.1 RECUPERO 75 %.....	58
9.2 CONFRONTO RECUPERO 45 % - 75 %.....	60
9.3 CONFRONTO CON TG MODALITA' COGENERATIVA	62

10 CASO STANDARD 64
11 CONCLUSIONI 68

ELENCO DELLE FIGURE

Fig. 1.1 Energia Primaria

Fig. 2.1 Diagramma T-s fluido organico

Fig. 3.1 Schema LCA

Fig. 4.1 Schema impianto

Fig. 4.2 Componenti modulo

Fig. 5.1 Schema modulo vista alto

Fig. 6.1 Diagramma T-s R245fa

Fig. 6.2 Diagramma T-s R1233zd

Fig. 6.3 Caratterizzazione assemblaggio

Fig. 6.4 Pesatura assemblaggio

Fig. 6.5 Caratterizzazione Zuccato 2 %

Fig. 6.6 Pesatura Zuccato 2 %

Fig. 6.7 Caratterizzazione Zuccato 5 %

Fig. 6.8 Pesatura Zuccato 5 %

Fig. 6.9 Caratterizzazione CO₂ biogenica

Fig. 6.10 Pesatura CO₂ biogenica

Fig. 6.11 Caratterizzazione confronto fluidi

Fig. 6.12 Pesatura confronto fluidi

Fig. 8.1.1 Caratterizzazione LTE – TG

Fig. 8.1.2 Pesatura LTE - TG

Fig.8.2.1 Caratterizzazione LTE – Rete

Fig. 8.2.2 Pesatura LTE – Rete

Fig. 9.1.1 Caratterizzazione cogenerativa 75 %

Fig. 9.1.2 Pesatura cogenerativa 75 %

Fig. 9.2.1 Caratterizzazione cogenerativa 75% - 45 %

Fig. 9.2.2 Pesatura cogenerativa 75% - 45 %

Fig. 9.3.1 Pesatura cogenerativa LTE – TG Ecoindicator 99

Fig. 9.3.2 Pesatura cogenerativa LTE – TG Greenhouse Gas Protocol

Fig. 10.1 Caratterizzazione LTE – Caso Standard Ecoindicator 99

Fig. 10.2 Pesatura LTE – Caso Standard Ecoindicator 99

Fig. 10.3 Pesatura LTE – Caso Standard Greenhouse Gas Protocol

ELENCO DELLE TABELLE

Tab. 2.1 Rendimento turbina confronto

Tab. 4.1 Condensatore

Tab. 4.2 Preheater + Evaporatore

Tab. 4.3 Fluido di lavoro

Tab. 4.4 Turbina

Tab. 4.5 Generatore

Tab. 4.6 Inverter

Tab. 5.3.1 Pre – heater

Tab. 5.3.2 Evaporatore

Tab. 5.3.3 Turbina

Tab. 5.3.4 Generatore elettrico

Tab. 5.3.5 Condensatore

Tab. 5.3.6 Serbatoio raccolta condensato

Tab. 5.3.7 Tubazioni

Tab. 5.3.8 Telaio autoportante

Tab 6.7.1 Emissione specifiche CO_{2eq}

1 INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, il problema del riscaldamento globale e dell'inquinamento è sempre più sentito dall'opinione pubblica e dai governi di tutto il mondo. Recentemente, con l'accordo di Parigi del 2015, un passaggio storico ed importante è avvenuto: 196 paesi hanno sottoscritto un'intesa rivolta a ridurre le emissioni di gas ad effetto serra al fine di contenere l'aumento di temperatura ben al di sotto dei 2 °C da qui alla fine del secolo.

Il settore energetico contribuisce in modo molto significativo alle emissioni di gas ad effetto serra. Esso infatti, comprendendo anche il riscaldamento domestico ed i trasporti, è il responsabile di più dell'80 % delle emissioni di gas climalteranti in Italia. [1]

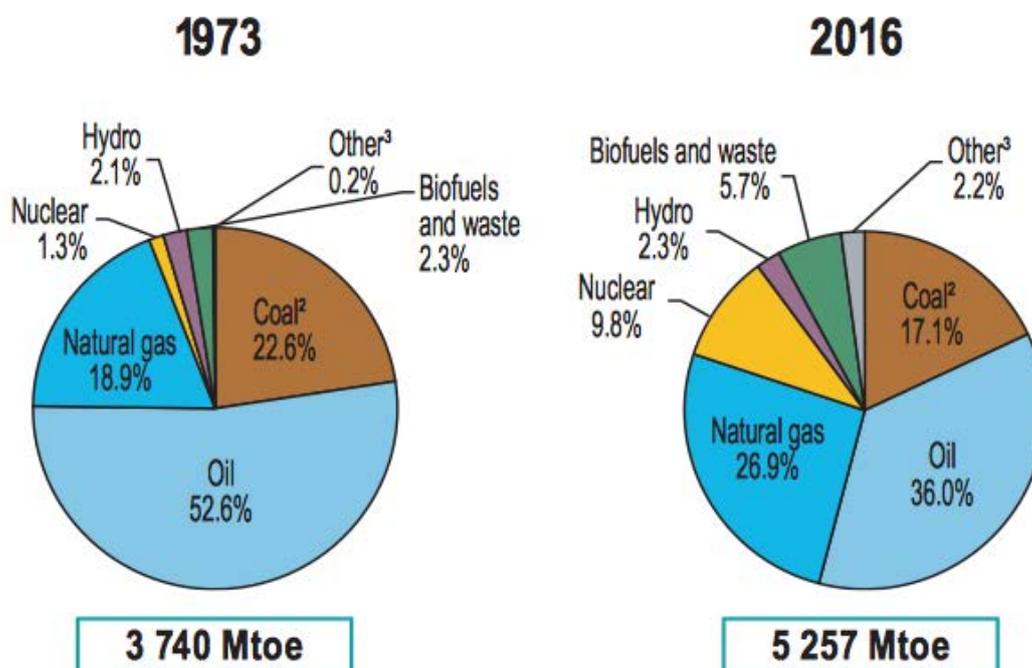


Fig. 1.1 Energia primaria [2]

Dalla Fig.1.1 si vede come, nonostante la quota di energia primaria prodotta da fonti rinnovabili sia sensibilmente aumentata dagli anni 70 ad oggi, sono ancora le fonti fossili ad avere un ruolo centrale e maggioritario. Diventa quindi sempre più pressante la necessità di utilizzare fonti energetiche alternative.

Negli ultimi decenni, l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile è aumentato in modo significativo, soprattutto per la produzione di energia elettrica [3]. Secondo i dati di Terna [3], nel 2013 il 50 % della produzione elettrica nazionale è stata soddisfatta con lo sfruttamento di fonti rinnovabili. Quelle storicamente utilizzate sono l'energia idroelettrica e quella geotermica; queste però, per motivi legati alla disponibilità ed alla ulteriore sfruttabilità della risorsa, hanno pochi margini di incremento, almeno nella loro concezione tradizionale. Le fonti che sono cresciute a ritmi molto sostenuti negli ultimi anni sono il solare, l'eolico e la biomassa. Lo sfruttamento dell'energia del sole e del vento, nelle loro varie forme, presenta però degli aspetti critici legati in modo particolare alla variabilità dell'erogazione (fatto salvo il solare cosiddetto "termodinamico" che presenta però dei limiti legati al costo d'investimento e alla necessità di essere localizzato in zone molto soleggiate) e quindi alla conseguente necessità di accumulo dell'energia prodotta nel momento in cui questa è disponibile. L'energia prodotta dalla biomassa, sia essa elettrica o termica, poiché sfrutta il tradizionale metodo della combustione, non presenta il limite della variabilità dell'erogazione. Per quanto riguarda le emissioni di gas ad effetto serra, facendo riferimento in particolar modo alla CO₂, pur venendo effettivamente emessa in conseguenza del processo di combustione della biomassa, essa è stata assorbita dall'atmosfera in egual misura dal vegetale nella sua fase di crescita. È necessario a tal proposito però considerare anche l'impatto ambientale della fase di coltivazione e trasporto della legna e quello legato al processo di produzione di energia.

In questo lavoro si intende effettuare un'analisi del ciclo di vita di un impianto ORC di potenza termica pari a 1100 kW e potenza elettrica pari a 150 kW alimentato a biomassa legnosa, sia nella modalità finalizzata alla sola produzione di energia elettrica che nella modalità cogenerativa. Viene effettuata un'analisi completa comprendendo la fase di produzione e assemblaggio dei componenti, di utilizzo dell'impianto e di smaltimento dello stesso. Considerando l'impatto significativo che la perdita di fluido organico ha in particolar modo sull'effetto serra, vengono effettuate delle simulazioni variandone la percentuale di perdita ed utilizzando fluidi differenti. Il software utilizzato per effettuare le simulazioni è Simapro, il database Ecoinvent 3.

Nella prima fase di questo lavoro verranno illustrate brevemente le caratteristiche di un ciclo ORC e del metodo di analisi del ciclo di vita LCA (Life Cycle Analysis); successivamente si entrerà nel merito dello studio dello specifico dispositivo.

2 IL CICLO ORC

I cicli Rankine a fluido organico o Organic Rankine Cycle, sono cicli termodinamici che convertono calore in energia elettrica mediante un ciclo Rankine che utilizza come fluido operativo un fluido organico ad elevato peso molecolare. Al fine di ottimizzare il rendimento, il fluido dovrebbe avere un piccolo calore specifico in fase liquida, una temperatura critica superiore alla temperatura massima di ciclo, una pressione al condensatore maggiore della pressione atmosferica e un volume specifico del vapore a fine espansione ridotto per contenere le dimensioni dello stadio di bassa pressione della turbina. Per applicazioni di modesta potenza, il fluido dovrebbe inoltre avere elevata massa molecolare per ridurre la velocità di rotazione ed il numero di stadi della turbina ed ottenere valori di portata massica ed aree di passaggio nelle palettature non troppo piccoli; sarebbe inoltre opportuno che avesse buone caratteristiche di scambio termico, che non fosse costoso, infiammabile, corrosivo e tossico.

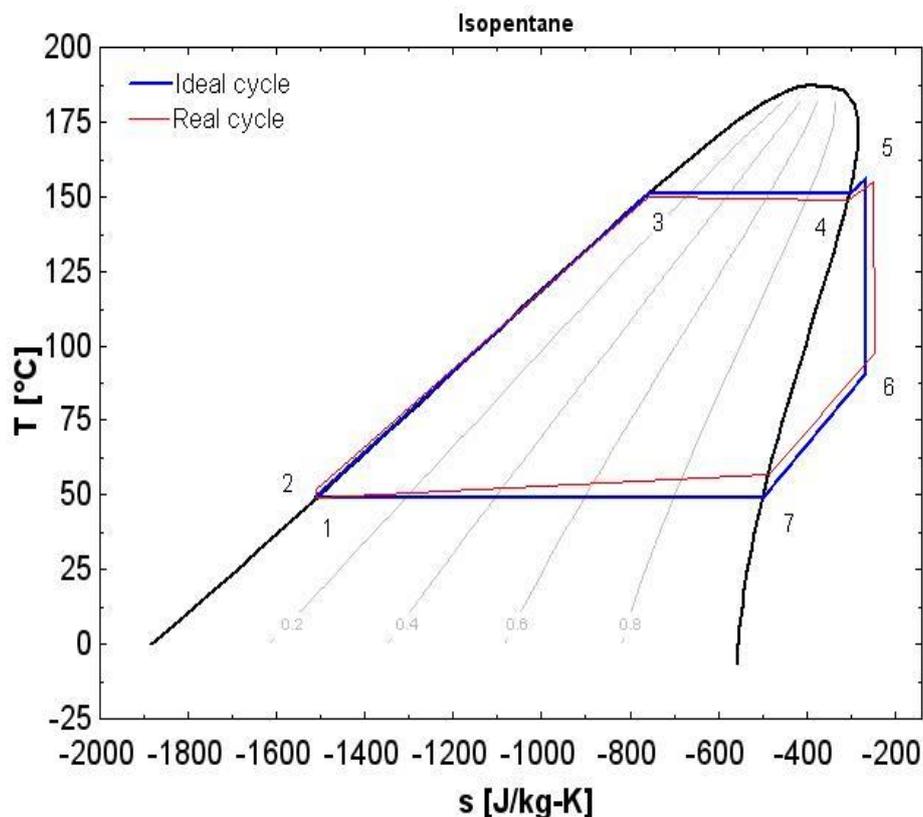


Fig 2.1 Diagramma T-s fluido organico

Rispetto all'acqua, il fluido organico consente di avere un salto entalpico più basso e di progettare una turbina a singolo stadio avente alta efficienza.

Vediamo un confronto tra il rendimento isoentropico di espansione in turbina di acqua e fluido organico:

<i>Campo di Potenza</i>	<i>Rendimento isoentropico di turbina [%]</i>	
	<i>H₂O</i>	<i>AMM</i>
<i>>10 MW</i>	<i>70-80</i>	<i>75-80</i>
<i>1-5 MW</i>	<i>50-70</i>	<i>75-80</i>
<i>200-500 kW</i>	<i>30-50</i>	<i>75-80</i>
<i>10-100 kW</i>	<i>25-50</i>	<i>60-75</i>

Tab. 2.1 Rendimento turbina confronto [4]

Come si può vedere nella Tab. 2.1, per potenze minori, il rendimento isoentropico di espansione in turbina utilizzando il fluido organico, è nettamente superiore a quello del vapore d'acqua. Salendo con la potenza il vapore d'acqua raggiunge rendimenti simili ed è quindi sicuramente più conveniente da utilizzare in primis per il suo minore costo. In impianti di grande potenza, le portate di fluido operativo necessarie renderebbero sicuramente antieconomico l'utilizzo di un fluido organico.

Si riassumono i principali vantaggi tecnici della tecnologia [5]:

- Alta efficienza del ciclo termodinamico
- Elevata efficienza turbina
- Bassa sollecitazione meccanica turbina
- Basso numero di giri della turbina
- Mancanza di erosione delle palette della turbina

Per quanto riguarda gli impianti di piccole dimensioni ($P < 1\text{MWel}$) alimentati a biomassa solida, la combustione diretta è la soluzione più frequentemente utilizzata. Un'alternativa è rappresentata dalla gassificazione della biomassa e dalla successiva combustione del gas così ottenuto; per ragioni di investimento economico e di complessità impiantistica tale soluzione è più adatta ad impianti di taglia maggiore.

Nel caso di sistemi a combustione diretta del solido, il rendimento elettrico varia solitamente tra il 17 % ed il 20 % [6]; mediamente sono affidabili e disponibili nel mercato già da una potenza di 100 kW elettrici. Un altro vantaggio di questo tipo di soluzione impiantistica è la compattezza, come nel caso del modulo che viene analizzato in questo studio, è possibile acquistare direttamente lo skid comprensivo di evaporatore e di condensatore. I fluidi più utilizzati sono i silossani ed i refrigeranti. La massima temperatura raggiungibile dal ciclo si attesta attorno i 300 °C per questioni legate alla sicurezza ed alla tossicità. Per raggiungere temperature maggiori sarebbe necessario utilizzare differenti tipologie di fluido con caratteristiche non adatte in termini di sicurezza.

3 METODO LCA

3.1 IL METODO

Il termine Life Cycle Assessment (LCA) fu coniato durante il congresso SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) del 1990 nel Vermont e negli ultimi anni sta diventando una metodologia sempre più diffusa. Le norme di riferimento per l'esecuzione di un'analisi LCA sono le ISO14040.

La definizione proposta dalla SETAC è la seguente: "è un procedimento oggettivo di valutazione dei carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso e lo smaltimento finale". [7]

La struttura di una LCA è sintetizzabile in 4 fasi principali [8]:

- 1) Definizione degli scopi e degli obiettivi: è la fase preliminare in cui vengono definite chiaramente le finalità dello studio, l'unità funzionale di riferimento e i confini del sistema
- 2) Analisi di inventario: vengono definiti in maniera precisa i flussi di materia ed energia, si costruisce un modello del sistema che si vuole analizzare tramite dati primari o secondari
- 3) Analisi degli impatti: valuta l'entità delle modificazioni ambientali causate dal rilascio in ambiente di inquinanti e dal consumo di risorse.
- 4) Interpretazione e miglioramento: è la parte conclusiva che prevede un'analisi critica e ha lo scopo di analizzare l'intero processo, di evidenziare i punti critici o migliorabili ed eventualmente proporre modifiche per ridurre gli impatti ambientali dell'intero ciclo.

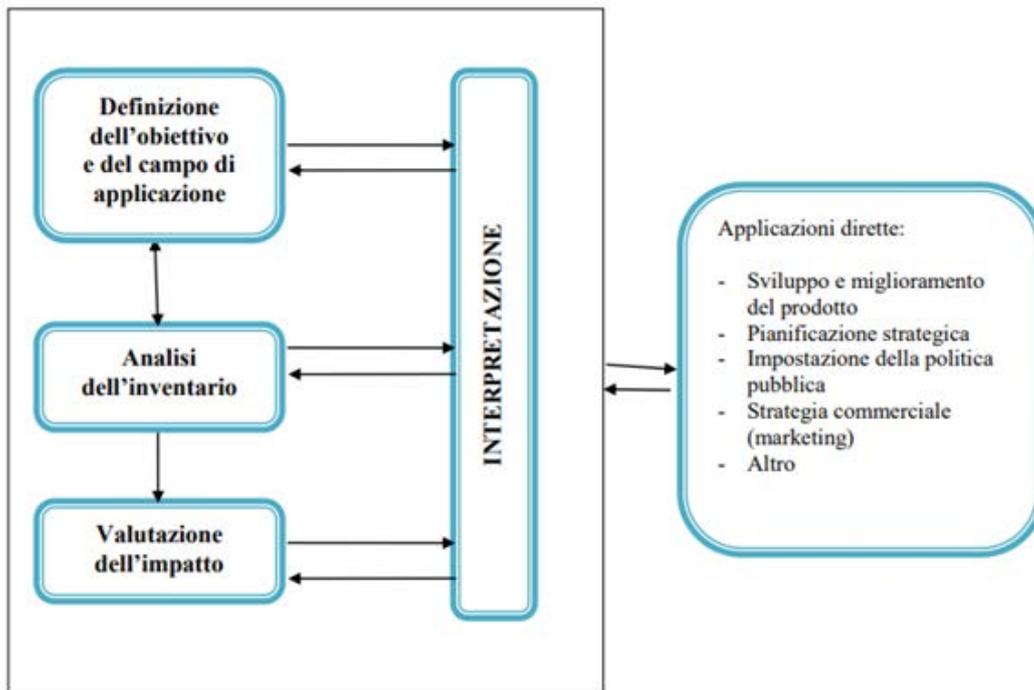


Fig. 3.1 Schema LCA

3.2 DEFINIZIONE SCOPI ED OBIETTIVI

Gli obiettivi e le finalità dello studio devono essere dichiarati fin da subito. Riveste una certa rilevanza anche la tipologia di pubblico a cui l'analisi è destinata. È necessario innanzitutto che le singole operazioni che compongono i vari componenti e processi siano definite. Di essenziale importanza in questa fase è anche la definizione dell'unità funzionale, che è il riferimento e l'unità di misura a cui i risultati dovranno rapportarsi. Una tipica unità funzionale è il kWh di energia prodotta. Un altro aspetto importante da definire sono i confini del sistema che devono essere stabiliti in modo coerente rispetto lo specifico studio.

Un'attenzione particolare deve essere posta all'analisi energetica. I carichi energetici sono di vario tipo e possono essere classificati in questo modo:

- Energia di investimento: considera l'energia spesa per la realizzazione dell'infrastruttura necessaria

- Energia diretta: è la quota di energia direttamente consumata per il funzionamento del processo
- Energia di feedstock: è l'energia fittizia contenuta nei materiali che potrebbe essere rilasciata se questi venissero utilizzati in un processo chimico quale una combustione.
- Energia dei lavoratori e per il loro trasporto: molto spesso si trascura

3.3 ANALISI DI INVENTARIO

Questa fase prevede la quantificazione degli input e degli output per ogni componente dell'intero complesso. Non è prevista una valutazione degli impatti o un'analisi critica, ma solo una organizzazione oggettiva dei flussi di materia ed energia. I dati utilizzati in questa fase possono essere di natura primaria o secondaria. I primi sono ricavati direttamente da una conoscenza diretta dello specifico processo, da informazioni del costruttore o da analisi specifiche. I dati secondari si possono invece ricavare dalla letteratura scientifica o da banche dati dedicate come quelle presenti nel software SimaPro. Talvolta risulta difficile ottenere dati secondari completamente affidabili e adattabili al caso in questione; sta all'analista giustificare l'utilizzo ed eventualmente dichiarare l'inevitabile margine di errore. L'analisi di inventario si conclude quindi con la presentazione dei risultati in 6 categorie:

- Materie prime
- Combustibili primari
- Feedstock
- Rifiuti solidi
- Emissioni gassose
- Emissioni liquide

Di importanza non secondaria in questa fase è la definizione del fine vita. Le realtà possibili sono tre: recupero di materia, recupero di energia, conferimento in discarica. A sua volta il recupero di materia può articolarsi nel riciclo e nel riuso. Nel primo caso viene utilizzata la materia prima per creare un nuovo componente, nel secondo caso viene riutilizzato lo specifico oggetto nella sua funzione originaria dopo aver subito eventualmente un'adeguata manutenzione.

3.4 ANALISI DEGLI IMPATTI

È la terza fase di un'analisi LCA. Si quantificano gli elementi inseriti nell'inventario in termini di impatto ambientale; le categorie sono le sostanze rilasciate in ambiente, il consumo di suolo e il consumo di risorse. Le due fasi principali che compongono l'analisi degli impatti sono innanzitutto la conversione dei risultati dell'inventario in indicatori di impatto ed eventualmente la normalizzazione degli stessi per ottenere indici più facilmente utilizzabili per l'analisi del sistema.

I principi generali per il raggruppamento delle categorie d'impatto sono:

- Ecologia, quindi effetti sulla popolazione ed ecosistema;
- Salute, comprendendo anche la sicurezza nei confronti dell'uomo;
- Risorse, considera l'esaurimento di risorse ed energia;
- Riflessi Sociali, considera l'impatto su tutte le attività umane che interagiscono con il sistema considerato.

Le categorie d'impatto risultano così definite:

- Assottigliamento della fascia di ozono;
- Acidificazione;
- Eutrofizzazione;
- Formazione di smog fotochimico
- Tossicità per l'uomo e per l'ambiente;

A questo punto è necessario classificare i processi della fase di inventario nelle categorie sopracitate.

Analizziamo singolarmente alcune categorie:

- **Effetto serra:**

Per la valutazione dell'effetto quantitativo in termini di effetto serra, l'indicatore utilizzato è il GWP (Global Warming Potential). Si considera come standard l'anidride carbonica che presenta un GWP pari a 1. Altre sostanze possono possedere GWP differenti da quello unitario, talvolta i valori possono raggiungere valori superiori a 1000. Ciò sta a significare che 1 kg di sostanza rilasciata in

atmosfera con GWP pari a 1000, causa gli stessi effetti in termini di effetto serra di 1000 kg di anidride carbonica.

- **Assottigliamento della fascia di ozono:**

In questo caso l'indicatore è l'ODP (Ozone Depletion Potential), la sostanza di riferimento è l'R12, il principio di calcolo è identico a quello del GWP

- **Acidificazione:**

In questo caso l'indicatore è l'AP (Acidification Potentials) espresso in termini di kg SO₂ equivalente o di H⁺ equivalente.

- **Eutrofizzazione:**

In questo caso viene definito un indice chiamato Nutrification Potenzial (NP), quantifica il potenziale contributo alla formazione di biomasse, il principio di calcolo è identico a quello del GWP, è espresso in termini di NO₃⁻.

- **Formazione di smog fotochimico:**

In questo caso vengono definiti degli indici chiamati POCP (Photochemical Ozone Creation Potential) espressi in termini di C₂H₄ equivalente.

- **Tossicità per l'uomo e per l'ambiente:**

Questo tipo di effetto è molto complesso da valutare a causa della spiccata caratteristica di località dell'impatto, in quanto il danno dipende sia dalla modalità di esposizione, sia dalla naturale predisposizione dell'organismo interessato.

- **Consumo di risorse non rinnovabili:**

In generale il consumo di risorse non rinnovabili viene espresso come MJ o come kg di materiali consumati. Essendo il concetto di risorsa non rinnovabile direttamente collegato con il concetto di riserva, può risultare utile come indicatore il consumo corrente su base annua rapportato alle riserve totali accertate.

3.5 INTERPRETAZIONE

È la quarta ed ultima fase di un'analisi LCA. Utilizzando i risultati ottenuti dalle precedenti fasi si devono trarre delle raccomandazioni e delle proposte di modifica utili al miglioramento del processo sotto il profilo degli impatti su una o più categorie. È compito dell'analista, in relazione alle finalità dello studio, valutare quali siano gli aspetti critici e le eventuali modifiche maggiormente significative per un miglioramento.

3.6 LCA CON SIMAPRO

L'impostazione del software SimaPro per l'analisi LCA, segue le fasi descritte in precedenza. L'aspetto certamente significativo di poter usare un'applicazione di questo tipo è innanzitutto quello di avere accesso ad una serie di banche dati molto dettagliate frutto del lavoro di molti professionisti e centri di ricerca, una delle più utilizzate è il database Ecoinvent3. L'altro aspetto fondamentale è la potenza di calcolo e la possibilità di scegliere tra svariati metodi per la valutazione del danno. Verrà brevemente descritto ora il metodo Eco-indicator 99, uno dei più utilizzati e quello implementato in questo lavoro.

Eco-indicator99 [6]:

È un metodo sviluppato dal Ministero dell'Ambiente Olandese.

Si considerano emissioni in aria, acqua e suolo. Le tipologie di danno ambientale valutate sono:

- Human Health (Salute Umana)
- Ecosystem Quality (Qualità dell'Ecosistema)
- Resources (Esaurimento delle Risorse)

Le categorie di impatto sono:

Per Human Health (Salute Umana):

- Danni causati da sostanze cancerogene
- Danni causati da sostanze organiche alle vie respiratorie
- Danni causati da sostanze inorganiche alle vie respiratorie

- Danni causati dai cambiamenti climatici
- Danni causati dalle radiazioni ionizzanti
- Danni causati dall'assottigliamento dello strato d'ozono

Per la categoria Ecosystem Quality vengono considerati gli impatti delle emissioni tossiche e di quelle che modificano i livelli nutritivi.

Per la categoria Resources vengono considerati dei fattori che valutano la diminuzione delle risorse e il conseguente maggiore consumo di energia per l'estrazione delle stesse.

4 MODULO ZUCCATO ENERGIA

4.1 SCHEMA IMPIANTO

Nello schema in Fig 4.1 è presente una fonte di calore (1) che può essere una caldaia o una qualsiasi sorgente con caratteristiche termiche adatte all'impianto. Attraverso un circuito ad acqua calda (fluido vettore) ed un evaporatore (2), viene scambiato calore con il fluido organico posto all'interno di un circuito chiuso. Il vapore in pressione che si viene a creare va ad espandere in turbina (3). La rotazione è ad alta velocità (12.000-18.000 Rpm); l'albero turbina mette in rotazione il rotore di un alternatore direttamente calettato sull'albero, producendo elettricità (4). All'uscita della turbina il fluido viene fatto condensare (5), torna alla fase liquida e viene raccolto in un serbatoio. Il liquido viene poi successivamente pompato nuovamente nello scambiatore primario ed il ciclo si ripete. Se il calore residuo non viene riutilizzato, può essere dissipato tramite una torre evaporativa (6). [9]

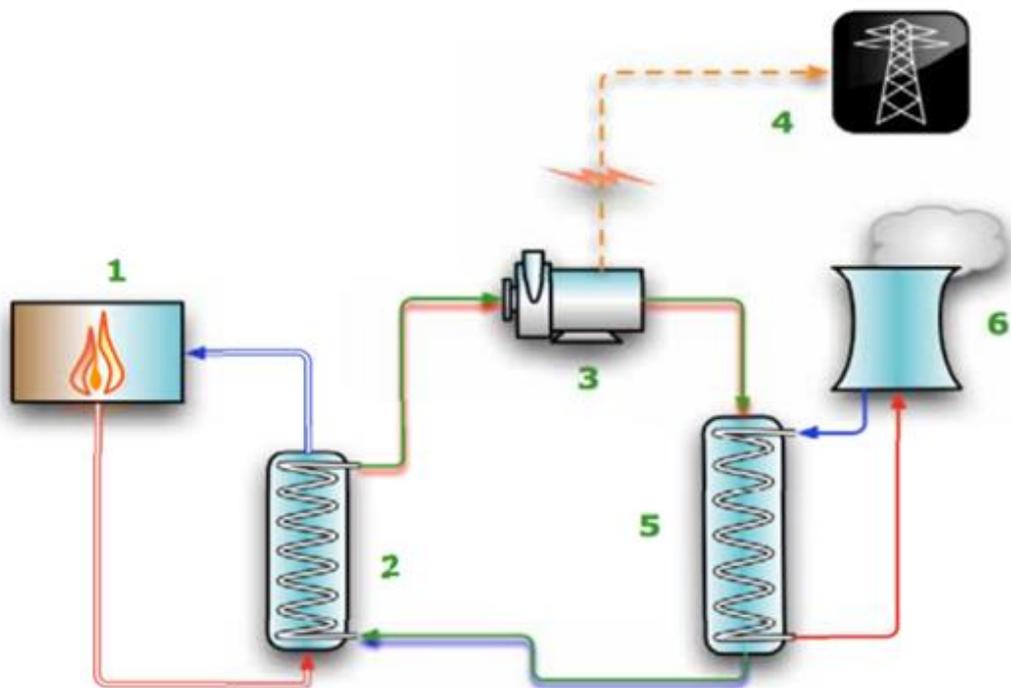


Fig. 4.1 Schema impianto [9]

I componenti sono dimensionati per una potenza termica in ingresso di 1100 kW cui corrisponde una potenza elettrica prodotta pari a 150 kW. Il rendimento nominale è quindi pari al 13,6 %. Il fluido vettore è acqua surriscaldata e la sua temperatura in ingresso è pari a 160 °C. La portata nominale del fluido vettore è 13,14 kg/s. Il fluido di lavoro condensa a 33 °C e presenta una pressione operativa pari a 20 bar. Le temperature di ingresso e di uscita dalla turbina sono pari a 145 °C e 100 °C. La pressione di stadio della turbina è pari a 16 bar.

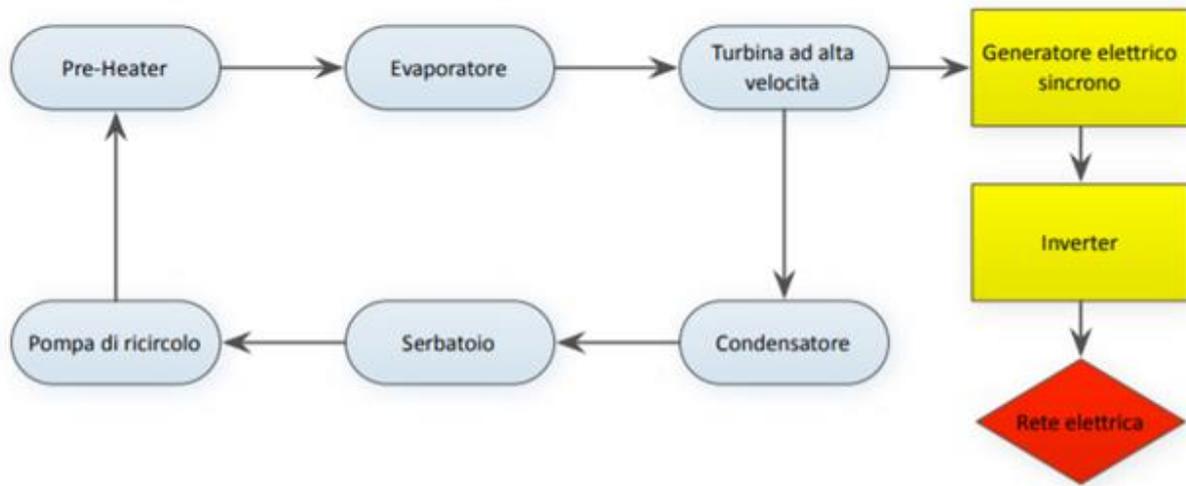


Fig 4.2. Componenti modulo [9]

4.2 COMPONENTI

Si descrivono i vari componenti e se ne riportano le caratteristiche [9]:

- Pre-Heater: preriscalda il fluido di lavoro attraverso l'acqua calda che alimenta il sistema ORC
- Evaporatore: l'acqua calda proveniente dalla sorgente di calore viene utilizzata per far evaporare il fluido di lavoro e mandarlo successivamente all'espansione in turbina. Il salto di temperatura dell'acqua surriscaldata è pari a 20 °C e la portata massima è 13,4 kg/s.
- Turbina: nella turbina avviene l'espansione del fluido di lavoro che cede potenza meccanica alla girante che a sua volta la cede all'alternatore. È di tipo radiale ad ugelli fissi, la temperatura del fluido in ingresso è pari a 145 °C; il corpo turbina è in acciaio saldato e la girante in lega di alluminio.
- Generatore elettrico sincrono: è direttamente collegato alla turbina e produce energia elettrica, a magneti permanenti, potenza massima pari a 160 kW.
- Inverter: in caso si voglia cedere corrente elettrica alla rete, adegua le caratteristiche della corrente (fase, voltaggio, frequenza) alle caratteristiche di rete. Tipologia IGBT, sincronizzato alla rete, potenza 150 kW, tensione 400V.
- Condensatore: permette la cessione di calore del fluido di lavoro e la sua trasformazione in fase liquida per poter essere successivamente pompato. La potenza da dissipare è pari a 940 kW termici in modalità di sola produzione elettrica, le temperature dell'acqua in ingresso ed in uscita sono pari a 36 °C e 26 °C e la portata di acqua al condensatore è pari a 22,46 kg/s.
- Serbatoio di raccolta fluido di lavoro
- Circolatore o pompa di ricircolo

Si riportano i dati di processo dell'impianto più significativi forniti dal costruttore: [9]

Potenza termica da dissipare	940	[kWth]
Temperatura acqua uscita condensatore	36	[°C]
Temperatura acqua ingresso condensatore	26	[°C]
Portata acqua circuito condensazione	22,46	[kg/s]

Tab. 4.1 Condensatore

Potenza termica totale in ingresso alla turbina	1100	[kWth]
Temperatura acqua surriscaldata in ingresso	= > 160	[°C]
Temperatura acqua surriscaldata ritorno	140	[°C]
Portata massima acqua surriscaldata mandata	13,14	[kg/s]
Potenza elettrica erogata dalla turbina	150	[kWe]

Tab. 4.2 Preheater + Evaporatore

Range di lavoro	60-165°C
Temperatura di condensazione	~33°C
Pressioni operative	max. 20 bar
Fluido vettore del ciclo ORC	n.d.
Temperatura in ingresso	145 °C
Pressione in ingresso	16,08 bar
Potenza termica richiesta	1100 kW _T (145/40°C) con rigeneratore
Temperatura di condensazione	40°C
Pressione in uscita dal condensatore	1,17 bar
Portata massica di vapore organico	5,26 kg/s (145/40°C)

Tab. 4.3 Fluido di lavoro

Tipo	Radiale ad ugelli fissi, direttamente accoppiata all'albero del generatore
Temperatura in ingresso	145°C
Temperatura in uscita	ca. 100°C
Pressione di stadio	PS 16 (test pressione a 24 bar)
Corpo turbina	Acciaio saldato
Girante	Lega di alluminio
Controllo di velocità	Anello di retroazione sulla corrente in uscita dal generatore
Tenuta	Labirinto sigillato su retro girante Opzionale: labirinto assiale sigillato all'interfaccia con il generatore. Verso l'esterno: statiche, O-rings

Tab. 4.4 Turbina

Tipo	Sincrono, a magneti permanenti
Potenza	160 kWe
Velocità	17.000 Rpm (12...18 kRpm)
Raddrizzatore	Incorporato
Sincronizzatore di rete	Compreso
Tensione	650- 850 VDC
Raffreddamento	Camera ad acqua
Raffreddamento ad acqua richiesto	15 kW _r
Fluido refrigerante	Acqua /glicole
Temperatura di ingresso acqua	< 40°C
Portata volumetrica di acqua	30 l/min
Refrigerante aggiuntivo (opzionale)	Iniezione di fluido di processo
Tenuta generatore	2,5 bar (tenuta gas)

Tab. 4.5 Generatore

Tipo	IGBT- sincronizzato alla rete
Potenza	150 kWe
Tensione	400 V + 5% Tol.
Frequenza	50 Hz +0,5% Tol.
Raffreddamento	Ad aria
Temperatura ambiente	40°C
Chopper di frenatura	Incluso, 200 kJ

Tab. 4.6 Inverter

5 MODELLAZIONE IMPIANTO

5.1 DEFINIZIONE SCOPI E OBIETTIVI

L'obiettivo di questo studio è l'analisi del ciclo di vita del modulo ZE-150-LT prodotto dall'azienda Zuccato Energia, alimentato a biomassa sia in regime di sola produzione elettrica che cogenerativo. Si intende poi confrontare queste configurazioni impiantistiche con altre soluzioni quali l'utilizzo di una turbina a gas per produrre energia elettrica e calore e successivamente si effettua un confronto con la rete elettrica.

L'unità funzionale a cui si fa riferimento è il kWh elettrico prodotto.

Il sistema comprende l'intero ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime al loro riciclo o dismissione.

I dati sono in parte primari, in particolar modo quelli riguardanti i singoli componenti di cui il modulo è costituito, e in parte secondari, ricavati dalle banche dati di SimaPro. Questi ultimi riguardano principalmente i processi di lavorazione dei metalli, rispetto ai quali non è stato possibile ottenere dei dati direttamente dal costruttore, quelli legati alle materie prime, alla combustione e allo smaltimento.

La metodologia di calcolo degli impatti utilizzata in questo studio è la Eco-indicator 99 descritta in precedenza.

5.2 ANALISI DI INVENTARIO

Per la produzione delle materie prime si fa riferimento ai dati presenti nel database di Simapro, in particolar modo alla banca dati Ecoinvent 3.

Ecoinvent 3 è una banca dati che comprende una grandissima mole di informazioni riguardanti materiali e processi. Permette di effettuare l'analisi LCA in modo molto accurato poiché è frutto del lavoro di numerosi esperti di prestigiosi istituti quali l'EPFL di Losanna e l'ETH di Zurigo.

Utilizzando il software SimaPro, vengono inserite le quantità di materiali per ogni singolo componente del modulo, utilizzando i dati primari di cui si è in possesso.

Per la fase di lavorazione ed assemblaggio, essendo molto difficile valutare i carichi energetici ed ambientali, si fa riferimento a valori medi presenti nel database, riguardanti la lavorazione dei metalli.

5.3 MATERIALI E LAVORAZIONI

I dati che verranno successivamente esposti sono di natura primaria [10].

Pre-heater:

È uno scambiatore di calore a piastre in controcorrente. In questo componente l'acqua surriscaldata permette di pre-riscaldare il fluido organico. Le piastre sono costituite da acciaio AISI 316.

Se ne riportano le caratteristiche nella seguente tabella:

Piastre	Altezza	0,875 m
	Larghezza	0,386 m
	Spessore	0,00045 m
	Numero	90
Lavorazione	Saldobrasatura	
Trasporto		835 km
Materiali	Acciaio inox AISI 306	125 kg
	Rame 99,9 %	27 kg
Portata acqua surriscaldata		13,14 kg/s
Portata fluido organico		5,26 kg/s
Temperatura acqua surriscaldata ritorno		140 °C
Temperatura acqua surriscaldata in ingresso		≥ 160 °C
Potenza termica totale in ingresso alla turbina		1100 kWth

Tab. 5.3.1 Pre - heater

Il costruttore fornisce la seguente relazione per determinare la massa dello scambiatore

$$peso\ a\ vuoto = 39,5 + 1,25 * N_p$$

con N_p = numero di piastre

nel caso in esame, avendo $N_p = 90$, si ottiene una massa a vuoto pari a 152 kg.

In particolare, di questi 27 kg sono di rame e 125 kg di acciaio.

Evaporatore

È uno scambiatore a piastre saldobrasate in cui il fluido viene fatto evaporare in controcorrente con acqua surriscaldata.

Se ne riportano le caratteristiche in tabella:

Piastre	Altezza	0,875 m
	Larghezza	0,386 m
	Spessore	0,00045 m
	Numero	200
Trasporto		835 km
Materiali	Acciaio inox AISI 316	229,5 kg
Lavorazione	Saldobrasatura	

Tab. 5.3.2 Evaporatore

Come in precedenza, il costruttore fornisce la relazione:

$$\text{peso a vuoto} = 39,5 + 1,25 * N_p$$

nel caso in esame $N_p = 200$ e si ottiene 289,5 kg,

di cui 229,5 kg di acciaio e 60 kg di rame.

Valvola a 2 vie

Serve per la regolazione del vapore in ingresso alla turbina.

È costituita di ottone, il peso è di 10 kg.

Turbina

Turbina radiale ad ugelli fissi, la girante è in lega di alluminio e il corpo turbina in acciaio.

Se ne riportano le caratteristiche nella tabella seguente:

Corpo turbina	Acciaio	400 kg
Girante	Alluminio	2 kg
Trasporto		15 km

Tab. 5.3.3 Turbina

Generatore elettrico

È di tipologia brushless, sincrono a magneti permanenti.

Se ne riportano le caratteristiche in tabella:

Statore	Acciaio	30 kg
	Rame	11 kg
Rotore	Acciaio	26 kg
	Magneti permanenti	4,32 kg
Trasporto		300 km

Tab. 5.3.4 Generatore elettrico

Inverter

È costituito da 257 kg di acciaio e da 171,5 kg di rame.

Rigeneratore

Serve per pre-riscaldare il fluido organico in fase liquida con il vapore del medesimo fluido in uscita dalla turbina. Analogamente ai casi precedenti, il costruttore ci fornisce la relazione:

$$peso\ a\ vuoto = 39,5 + 1,25 * N_p$$

avendo $N_p = 220$, si ottiene un peso a vuoto pari a 314,5 kg.

Il rigeneratore consiste di due unità per una massa totale di acciaio pari a 497 kg ed una massa totale di rame di 132 kg.

Condensatore

È uno scambiatore di calore a piastre saldobrasate. Se ne riportano le caratteristiche in tabella:

Trasporto		835 km
Materiali	Acciaio inox AISI 316	421 kg
	Rame 99,9 %	108 kg
Lavorazione	Saldobrasatura	
Piastre	Altezza	0,875 m
	Larghezza	0,386 m
	Spessore	0,00045 m
	Numero	180

Tab. 5.3.5 Condensatore

Sempre con la relazione fornita dal costruttore

$$peso\ a\ vuoto = 39,5 + 1,25 * N_p$$

avendo $N_p = 180$, si ottiene una massa di 264,5 kg. Essendo costituito da due unità, si ottengono 421 kg di acciaio e 108 kg di rame.

Serbatoio raccolta condensato

È costituito da acciaio al carbonio con trattamento antiruggine. Se ne riportano le caratteristiche in tabella:

Materiali	Acciaio al carbonio	121 kg
Trasporto		20 km
Lavorazione	Trattamento antiruggine	1,83 m ²
Dimensioni	Altezza	1 m
	Diametro	0,52 m

Tab. 5.3.6 Serbatoio raccolta condensato

Complessivamente consiste in 121 kg di acciaio al carbonio. La superficie trattata con zincatura antiruggine è pari a 1,83 m².

Pompa

È costituita da 150 kg di ghisa, il trasporto necessario dal sito di produzione all'azienda è 175 km.

Tubazioni

Se ne riportano le caratteristiche in tabella:

Materiale	Acciaio inox AISI 304L	97,07 kg
Lavorazione	Saldatura TIG	19,7 m
Trasporto		10 km

Tab. 5.3.7 Tubazioni

Valvola a 3 vie

È costituita di ottone e ha un peso di 15 kg

Telaio autoportante

È la struttura portante e di contenimento dei vari componenti, se ne riportano le caratteristiche in tabella:

Materiali	Acciaio	2105 kg
Trasporto		15 km
Dimensioni	Altezza	2,8 m
	Lunghezza	4,95 m
	Larghezza	2,15 m

Tab. 5.3.8 Telaio autoportante

Schema complessivo con vista dall'alto:

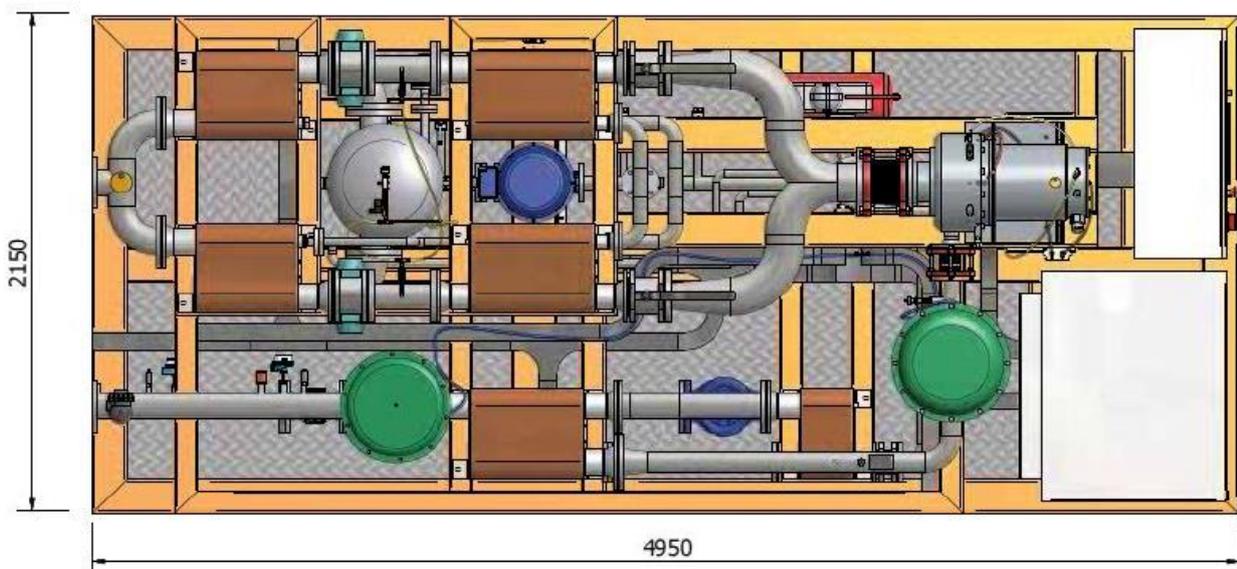


Fig. 5.1 Schema modulo vista alto

Torre evaporativa

È un componente opzionale, utilizzata nel caso in cui si utilizzi il modulo per la sola produzione elettrica. Se ne riportano le caratteristiche in tabella.

Reintegro acqua		26,4 l/minuto
Lavorazione	Zincatura a caldo	45,48 m ²
Materiali	Acciaio	1000 kg
	Acqua	2000 kg
Dimensioni	Alteza	3,9 m
	Lunghezza	2,6 m
	Larghezza	2,8 m

Tab. 5.3.9 Torre evaporativa

Fluido organico

Questa “componente”, risulta essere di essenziale importanza nell’analisi che si va ad effettuare. In questo studio vengono considerati 3 fluidi organici, il fluido dell’azienda Zuccato, di cui si conoscono il GWP e l’ODP, il fluido R245fa ed il fluido R1233zd, quest’ultimo a bassissimo effetto climalterante. Si analizza l’impatto di questi fluidi sull’effetto serra e sullo strato di ozono, se ne trascura l’effetto su altre categorie d’impatto poiché sarebbe di difficile implementazione e comporterebbe comunque variazioni trascurabili [11]

Generatore di calore

Questo componente non è fornito dall’azienda che dà la possibilità al cliente di produrre il calore nella modalità desiderata pur rispettando le caratteristiche tecniche del modulo precedentemente descritte. In questo studio si analizza il caso di calore prodotto da biomassa legnosa allo stato solido e la modellazione del componente caldaia non è diretta, ma proviene dalle banche dati del software.

5.4 INVENTARIO IN SIMAPRO

Per ogni componente precedentemente descritto si effettua un'operazione di creazione e/o ricerca dei processi più adatti presenti nel database. Vengono inseriti i flussi di materia, i trasporti, gli assemblaggi e le lavorazioni. È importante sottolineare che in questa fase, in particolar modo per gli assemblaggi e le lavorazioni, la difficoltà di trovare dei processi perfettamente corrispondenti al caso in esame, porta a delle inevitabili approssimazioni.

Evaporatore

Per quanto riguarda i materiali sono stati utilizzati due processi. Per l'acciaio "Steel, chromium steel 18/8" e "Copper" per il rame. Entrambi i processi considerano delle medie mondiali per l'estrazione e la prima lavorazione grezza di questi materiali. Per quanto riguarda il trasporto del componente, si è scelto di selezionare un camion di medie dimensioni, denominato "Transport, lorry 3,5/7,7 metric ton, EU", inserendo un valore pari a 241,7 tkm. Tale dato si ricava dalla moltiplicazione del peso del componente per la lunghezza in chilometri del trasporto, pari a 835 km nel componente in esame. Per le lavorazioni si è ritenuto ragionevole selezionare i processi "Metal working, average for chromium steel" e "Metal working, average for copper" rispettivamente per l'acciaio ed il rame. Poiché le lavorazioni sui metalli possono essere di vario tipo, un processo generico porta inevitabilmente a delle approssimazioni che si sono ritenute ragionevoli.

Preriscaldatore

Il processo di modellazione di questo componente è identico a quello dell'evaporatore con l'unica differenza nel processo del trasporto. Il peso del componente è pari a 152 kg con una distanza trasportata di 835 km, ciò porta ad un valore di 126,92 tkm.

Valvola a due vie

Per questo componente viene selezionato il processo “Brass, market for brass, EU” che fa riferimento alla produzione di ottone in Europa. Per il trasporto si ottiene un valore in tonnellate-chilometro pari a 0,1 tkm. Si ritiene accettabile trascurare le lavorazioni data l'esiguità del materiale.

Turbina

La turbina è costituita da uno statore di acciaio per il quale si seleziona il processo “Steel, unalloyed”. In assenza di dati specifici sulla particolare tipologia di acciaio, si ritiene adatto questo processo che rappresenta una media a livello globale. Per la girante in alluminio si seleziona il processo “Alluminium alloy, AlMg3”, rappresentativo anch'esso di una media a livello globale. Per quanto riguarda il trasporto del componente, si è scelto di selezionare un camion di medie dimensioni, denominato “Transport, lorry 3,5/7,7 metric ton, EU”, inserendo un valore pari a 6 tkm. Per la modellazione delle lavorazioni, si è scelto di utilizzare il processo “Metal working, average for steel product manufacturing” in riferimento alla lavorazione dell'acciaio e ritenendo trascurabile la lavorazione del componente in alluminio che presenta una massa nettamente inferiore.

Generatore elettrico

Per questo componente i processi utilizzati sono “Steel, unalloyed” e “Copper”, rispettivamente per l'acciaio ed il rame. Per la modellazione dei magneti permanenti, si utilizza il processo “Rare earth concentrate, 70%, REO” contenente informazioni sulla lavorazione e l'estrazione delle terre rare. Per quanto riguarda il trasporto del componente, si è scelto di selezionare un camion di medie dimensioni, denominato “Transport, lorry 3,5/7,7 metric ton, EU”, inserendo un valore pari a 21 tkm. Per le lavorazioni si è ritenuto ragionevole selezionare i processi “Metal working, average for steel product” e “Metal working, average for copper product” rispettivamente per l'acciaio ed il rame.

Rigeneratore

Per quanto riguarda i materiali si sono utilizzati due processi. Per l'acciaio “Steel, chromium steel 18/8” e “Copper” per il rame. Entrambi i processi considerano delle medie mondiali per l'estrazione e la prima lavorazione grezza di questi materiali. Per quanto riguarda il trasporto del componente, si è scelto di selezionare un camion di medie dimensioni, denominato “Transport, lorry 3,5/7,7 metric

ton, EU”, inserendo un valore pari a 525 tkm. Per le lavorazioni si è ritenuto ragionevole selezionare i processi “Metal working, average for chromium steel” e “Metal working, average for copper” rispettivamente per l’acciaio ed il rame.

Condensatore

La modellazione di questo componente è la medesima del rigeneratore. L’unica differenza è nel processo trasporto dove si è inserito un valore pari a 441,7 tkm.

Serbatoio raccolta condensato

È un componente in acciaio rivestito in zinco. Si è scelto di modellarlo con il processo “Steel, unalloyed” per il componente in acciaio e con “Zinc coat, pieces” per la lavorazione di zincatura. Per la lavorazione relativa all’acciaio si è ritenuto opportuno utilizzare il processo “Metal working, average for steel product”. Il trasporto viene trascurato per mancanza di dati.

Pompa

La pompa è in ghisa, si è scelto il processo “Cast iron, EU”. Per quanto riguarda il trasporto del componente, si è scelto di selezionare un camion di medie dimensioni, denominato “Transport, lorry 3,5/7,7 metric ton, EU”, inserendo un valore pari a 26 tkm. Per la lavorazione metallica si è ritenuto opportuno utilizzare il processo “Metal working, average for metal product manufacturing”.

Tubi

I tubi sono in acciaio cromato, si utilizza quindi il processo “Steel, chromium steel 18/8”. La giuntura dei tubi avviene tramite saldatura TIG. Si è scelto di utilizzare il processo “Welding, arc, steel”, con lunghezza di saldatura pari a 20 m. Entrambi questi processi rappresentano valori medi mondiali. Per quanto riguarda il trasporto del componente, si è scelto di selezionare un camion di medie dimensioni, denominato “Transport, lorry 3,5/7,7 metric ton, EU”, inserendo un valore pari a 1 tkm. Per la lavorazione metallica si è utilizzato “Metal working, average for chromium steel”.

Valvola a 3 vie

La modellazione di questo componente è simile a quella della valvola a due vie con un valore di tonellate-chilometro del processo di trasporto pari a 0,15 tkm.

Telaio autoportante

Si è scelto di modellarlo con il processo “Stell, unalloyed”. Per la lavorazione relativa all'acciaio si è ritenuto opportuno utilizzare il processo “Metal working, average for steel product”. Per quanto riguarda il trasporto del componente, si è scelto di selezionare un camion di medie dimensioni, denominato “Transport, lorry 3,5/7,7 metric ton, EU”, inserendo un valore pari a 31,58 tkm.

Torre evaporativa

La torre evaporativa è costituita di acciaio e riempita parzialmente con dell'acqua distillata nel fondo. Per modellare il componente si è scelto il processo “Stell, unalloyed” per l'acciaio e “Water, deionised, from tap water” per l'acqua distillata. È necessario considerare anche il processo di zincatura a caldo del componente per il quale si è utilizzato il processo “Zinca coat, pieces” per un valore di superficie pari a 45,48 m². Per la lavorazione del metallo si è scelto il processo “Metal working, average for steel product”.

5.5 FASE DI UTILIZZO

Nella descrizione del modulo LTE fino a qui considerata non è stata definita la fonte di calore. L'azienda Zuccato Energia fornisce il modulo sprovvisto della caldaia o di altro eventuale dispositivo per lo sfruttamento della fonte di calore. In questo studio si intende considerare il funzionamento di una caldaia alimentata a biomassa solida.

Al fine di modellare la caldaia si è deciso di utilizzare un processo già presente nel database di SimaPro a cui vengono apportate delle modifiche. La denominazione di tale processo è “Heat and power co-generation, wood chips”. Tale processo, pur avendo come prodotto principale il calore, prevede al suo interno la modellazione di un ciclo ORC e l'immissione in rete della corrispondente energia elettrica. Poiché in questo studio tali aspetti sono già stati specificati con gli altri componenti, queste parti del processo vengono eliminate.

Il processo fa riferimento ad una caldaia di potenza 1000 kW alimentata con cippato proveniente dalla foresta. I dati sono validati per la Svizzera, ma il database specifica che sono valori utilizzabili anche per il contesto italiano. I valori sulle emissioni derivano sia da letteratura che da valutazioni di esperti. L'impianto è equipaggiato con un precipitatore elettrostatico per l'abbattimento dei PM e di un sistema SNCR per l'abbattimento degli NO_x. La temperatura di combustione varia da 800 °C a 1300 °C e avviene in eccesso d'aria. Il potere calorifico inferiore medio del cippato, misurato a massa secca, è pari a 18,9 MJ/kg.

Viene analizzata ora con maggior dettaglio la composizione del cippato.

Il 40 % circa è costituito da legno di betulla, il 24 % da abete rosso, il 20 % da pino, il 14 % da faggio, il 2 % da quercia. Tali valori rappresentano un valore medio europeo e potrebbero differire dal caso italiano. I processi di coltivazione e lavorazione sono modellizzati tenendo conto di valori medi europei presenti nel database di SimaPro.

Scenario di fine vita

Valutando le percentuali italiane di riciclo di acciaio e rame in Italia [12,13], si è deciso di stabilire una percentuale di riciclo per l'acciaio dei componenti pari a 70 % ed una percentuale di riciclo per il rame pari al 90%. Sono stati creati due scenari di fine vita, utilizzando processi già presenti nel database di SimaPro, specifici per il riciclo di questi due materiali. La percentuale non riciclata viene mandata in discarica con un apposito scenario anch'esso selezionato dal database.

6 ANALISI DEGLI IMPATTI

6.1 CATEGORIE D'IMPATTO

Come già descritto in precedenza, per l'analisi degli impatti viene utilizzato il metodo Eco-indicator 99.

Si riportano di seguito le categorie d'impatto che questo metodo considera: [13]

- Carcinogens: come unità di misura viene utilizzato il DALY che indica i giorni di vita persi. In questa categoria vengono considerate tutte quelle sostanze il cui rilascio in acqua, aria e suolo ha degli effetti cancerogeni sulle persone.
- Respiratory organics: questa categoria considera gli effetti delle sostanze organiche inalabili sulla salute umana, si quantifica in DALY.
- Respiratory inorganics: analogamente alla categoria d'impatto precedente, considera i danni causati dall'inalazione di sostanze inorganiche.
- Climate change: questa categoria considera i danni causati dal cambiamento climatico sulla salute umana, si quantifica in DALY.
- Radiation: questa categoria quantifica i danni alla salute umana causati da sostanze radioattive. Escludendo alcuni particolari processi che fanno effettivamente uso di sostanze radioattive, tiene più comunemente in considerazione le emissioni di radioattività determinate dall'utilizzo di corrente elettrica prodotta dalle centrali elettronucleari.
- Ozone: questa categoria quantifica i danni alla salute umana causati dalle radiazioni solari dannose, in particolare UV, che non vengono più schermate a causa dell'assottigliamento dello strato di ozono determinato dal rilascio in atmosfera di sostanze ozono lesive. Si quantifica in DALY.
- Ecotoxicity: questa categoria quantifica i danni causati all'ecosistema in seguito all'emissione di sostanze eco-tossiche in aria, acqua e suolo.
- Acidification/Eutrophication: questa categoria quantifica i danni causati all'ecosistema in seguito al rilascio di sostanze acide in aria, acqua e suolo. Tiene in considerazione inoltre il rilascio di sostanze nutritive, in particolare nitrati e solfati.

- Land use: questa categoria quantifica i danni ambientali determinati dall'occupazione e dalla trasformazione del suolo.
- Minerals: questa categoria tiene conto della limitatezza delle materie prime e del conseguente consumo delle riserve.
- Fossil fuels: questa categoria quantifica i danni causati dalla riduzione delle riserve di combustibili fossili in seguito alla loro estrazione.

Le categorie d'impatto appena descritte vengono elaborate al fine di ottenere 3 categorie di danno:

- Human health: in questa categoria vengono considerati i danni alla salute umana causati dal riscaldamento globale, dalle sostanze cancerogene, dalle radiazioni ionizzanti, dall'assottigliamento dello strato di ozono e dal rilascio di sostanze organiche e inorganiche.
- Ecosystem quality: in questa categoria vengono considerati i danni all'ecosistema determinati dal consumo di suolo, dall'acidificazione, dall'eutrofizzazione e più in generale da tutti i processi che si possono considerare eco-tossici.
- Resources: in questa categoria vengono considerati i danni determinati dalla riduzione delle risorse disponibili; in particolar modo quelle minerali e fossili.

6.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

In questa prima fase della simulazione si considera la produzione di sola energia elettrica, con un rendimento elettrico pari al 13,6 %, come dichiarato dal costruttore. I parametri che si vanno a variare sono la tipologia di fluido organico considerato, in particolare vengono considerati 3 fluidi organici: quello utilizzato dal costruttore che viene denominato “Fluido Zuccato”, l’R245fa e l’R1233zd. Da un’analisi preliminare si evince che entrambi i fluidi, nelle condizioni operative del modulo, rientrano nello stato subcritico. Si ritiene quindi ragionevole utilizzare il rendimento fornito dal costruttore per tutti e tre i fluidi. Tale aspetto verrà comunque meglio esplicitato successivamente nello studio, nel cap.7.

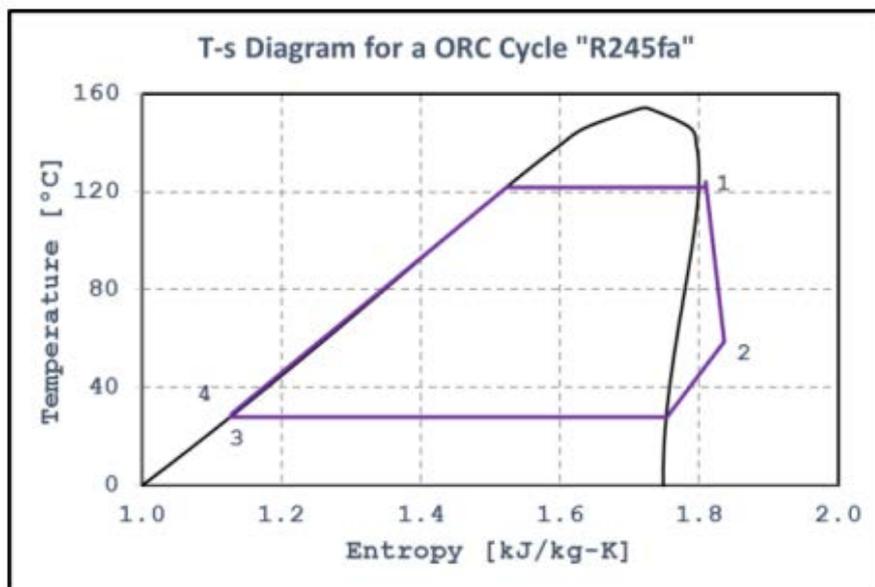


Fig. 6.1 Diagramma T-s R245fa [14]

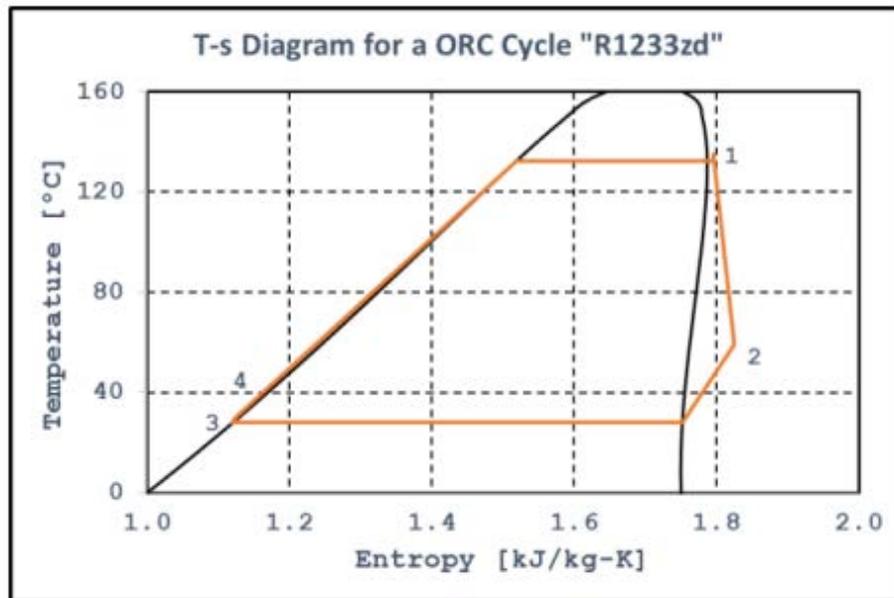


Fig. 6.2 Diagramma T-s R1233zd [14]

In relazione al fluido organico, un altro parametro fondamentale che si va a variare è la percentuale annua di perdita di fluido in ambiente. In questo studio si considerano 3 diverse percentuali pari al 2%, 5% e 10%. La quantità di fluido recuperato a fine vita dell'impianto è pari all'80%; ciò significa che il 20% del fluido viene disperso in atmosfera nella fase di smontaggio.

La vita utile dell'impianto viene fissata a 15 anni.

In questo studio viene inoltre considerato un altro parametro, il fattore di utilizzo, prendendo in considerazione due valori: uno a medio carico pari a 3000 ore/anno e uno ad alto carico pari 6000 ore/anno. Questi valori sono stati ipotizzati tenendo conto della taglia dell'impianto e del suo eventuale utilizzo. Essendo infatti la taglia medio-piccola e l'utilizzo rivolto alla produzione di energia elettrica e/o cogenerazione per grandi impianti civili o medio/piccoli impianti industriali, si ritiene che ipotizzare un fattore di carico troppo alto sia irrealistico.

Funzionamento a medio carico:

Per un fattore di carico pari a 3000h/anno, essendo la potenza nominale elettrica pari a 150 kW e considerando 15 anni di vita utile, si ottiene una produzione di energia elettrica totale pari a 6.750 MWh.

Funzionamento ad alto carico:

Per il funzionamento con fattore di carico pari a 6000h/anno, questo valore sale a 13.500 MWh.

6.3 PRODUZIONE ED ASSEMBLAGGIO

Viene ora effettuata un'analisi degli impatti della fase di produzione ed assemblaggio dei componenti con il metodo Eco-indicator 99. Per questa simulazione viene preso in considerazione l'impianto utilizzante il "Fluido Zuccato" e si ipotizza una percentuale di perdita annua pari al 5 %. Nella caratterizzazione, figura 6.3, possiamo vedere l'impatto dei singoli componenti.

Per la categoria "Carcinoges" i due componenti più impattanti sono il quadro elettrico e il rigeneratore. Il primo a causa dell'utilizzo delle terre rare, il secondo per l'importante massa di acciaio e rame di cui è costituito.

Per la categoria "Respiratory organics", il telaio autoportante (skid) ha un impatto predominante seguito dal fluido organico. Per quanto riguarda lo skid ciò è dovuto alla quantità di materiali in gioco e al relativo trasporto degli stessi che va ad incidere in modo significativo in questa categoria.

Per la categoria "Respiratory inorganics", i componenti con un impatto preponderante sono lo skid, il rigeneratore e il condensatore, all'incirca a pari merito. Questo è dovuto alla massa elevata di materiale di cui sono composti.

Per la categoria "Climate change", ruolo assolutamente preponderante è assunto dal fluido organico. Risulta importante a tale proposito fare una precisazione. In questa simulazione, il fluido organico viene considerato come un componente. Inoltre, il rilascio di fluido in ambiente durante il ciclo di vita ed in fase di smontaggio viene anch'esso considerato in questa fase. In tal modo, si rende visibile l'effetto della dispersione; ci sarebbe infatti un impatto del tutto ininfluenza se si considerasse solo il processo di produzione.

Per la categoria "Radiation", similmente alla categoria "Respiratory inorganics", i componenti con un impatto preponderante sono lo skid, il rigeneratore e il condensatore. Questo è dovuto all'elevato utilizzo di energia elettrica necessaria per la produzione di tali componenti, parte di questa energia è prodotta da fonte nucleare. È necessario ricordare che sono stati utilizzati dati medi europei per questa fase.

Per la categoria "Ozone layer", è assolutamente preponderante l'effetto del fluido organico.

Per la categoria "Ecotoxicity", i componenti più impattanti sono il condensatore, il rigeneratore e il quadro elettrico. Questo è legato alla massa dei materiali in gioco e alla presenza delle terre rare nel quadro elettrico.

Per la categoria “Acidification/Eutrophication”, i componenti più impattanti sono condensatore, il quadro elettrico, il rigeneratore e lo skid; questo per le medesime ragioni della precedente categoria.

Per la categoria “Land Use”, le considerazioni sono le medesime della categoria precedente.

Per la categoria “Minerals”, le considerazioni sono le medesime della categoria precedente.

Per la categoria “Fossil fuels”, i componenti più impattanti sono lo skid, il rigeneratore, il condensatore e il fluido organico.

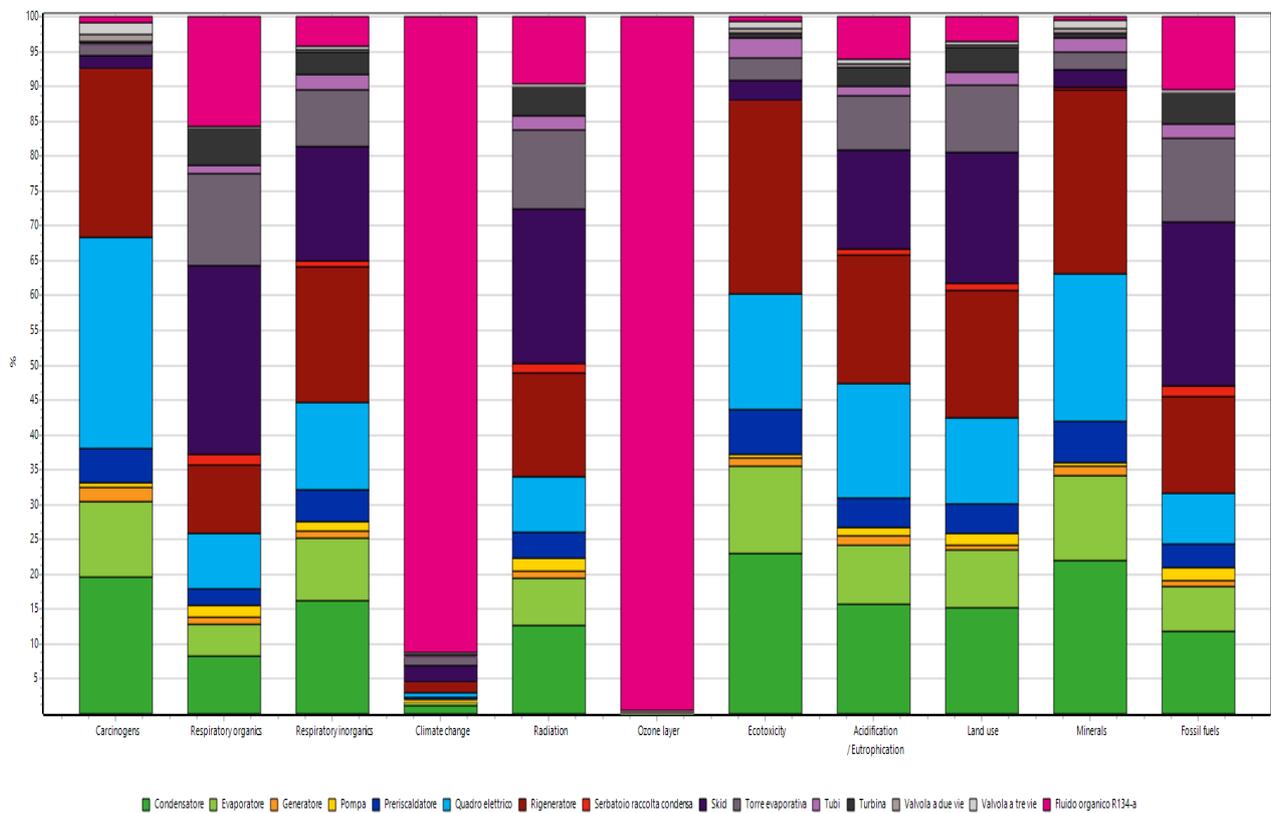


Fig. 6.3 Caratterizzazione assemblaggio

Nella figura 6.4 è possibile vedere la pesatura relativa alla fase di assemblaggio del modulo.

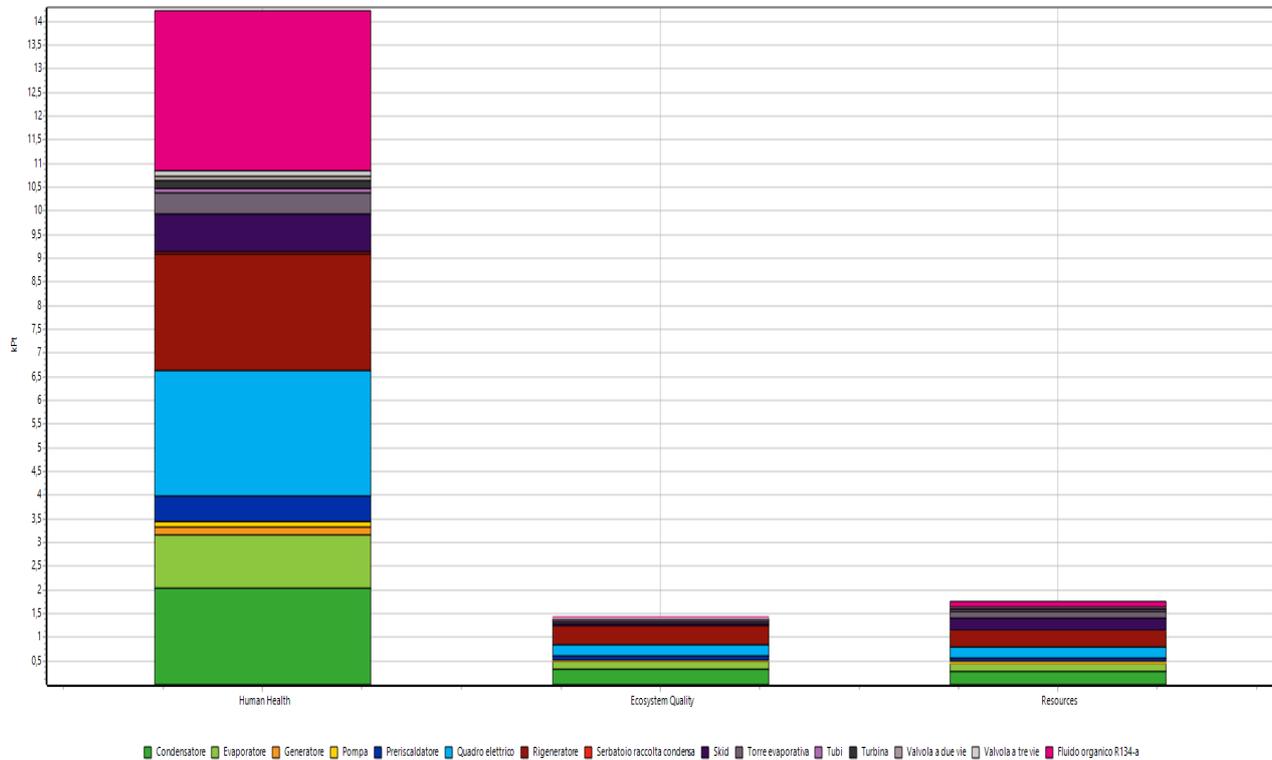


Fig. 6.4 Pesatura assemblaggio

In questa fase risulta evidente che la categoria preponderante è l’impatto sulla salute umana o “Human health”. In questa categoria incidono maggiormente gli effetti delle sostanze climalteranti e di quelle cancerogene.

La quantità di CO₂ equivalente rilasciata in atmosfera nella fase di assemblaggio risulta essere pari a 356 t.

Considerando l’energia elettrica prodotta, questa fase incide per circa 26 g di CO₂_{eq}/kWh su un totale di 84,81 g CO₂/kWh con funzionamento a 6000h/anno.

6.4 INTERO CICLO DI VITA

In questa fase dello studio vengono effettuate una serie di simulazioni variando il fluido organico, la percentuale di perdita dello stesso ed il fattore di carico. Vengono illustrati alcuni dei risultati più significativi e vengono successivamente raccolti tutti i risultati delle simulazioni in una tabella riassuntiva finale.

Viene ora effettuata l'analisi degli impatti dell'impianto utilizzante il "Fluido Zuccato", avente un fattore di carico pari a 6000 ore/anno e una percentuale di perdita di fluido pari al 2 %.

Viene descritta in questa simulazione anche la metodologia di calcolo che risulta poi comune a tutte le altre simulazioni.

L'impianto utilizza 362 kg di fluido organico. A fronte di una percentuale di rilascio in ambiente in fase di smantellamento pari al 20 % [11], 72,4 kg di fluido finiscono necessariamente in atmosfera.

Successivamente viene calcolata la quantità di fluido persa a causa delle perdite in esercizio. In questo caso, con una percentuale del 2 % all'anno si ottiene:

$362 * 0,02 * 15 = 108,6$ kg di fluido organico rilasciato in atmosfera a causa delle perdite in fase di esercizio.

La quantità totale rilasciata in atmosfera risulta quindi pari a 181 kg.

Considerando che il "Fluido Zuccato" presenta un GWP pari a 950, ciò equivale a 171.950 kg di CO₂ equivalente.

Effettuando la simulazione per l'intero ciclo di vita, si ottiene un valore di CO₂ equivalente totale rilasciata in atmosfera pari a 990 ton. La dispersione del fluido organico in ambiente incide quindi per circa 172 ton su 990 ton, questo equivale ad una percentuale del 17,37 %.

Riportandoci all'unità funzionale, si ottiene un valore totale di emissione pari a 73 g CO_{2eq}/kWh. Il fluido organico incide per circa 12,74 g CO_{2eq}/kWh.

Nella fig. 6.5 possiamo valutare la caratterizzazione.

L'impatto legato alla combustione della biomassa risulta abbondantemente preponderante nelle categorie d'impatto: "Carcinogenes", "Respiratory organics", "Respiratory inorganics", "Radiation", "Ecotoxicity", "Acidification/Eutrophication", "Land use", "Fossil fuels".

Nella categoria "Climate change" risulta ancora maggioritario il contributo legato alla combustione, anche se non più preponderante. Bisogna inoltre evidenziare a tale proposito che in tale simulazione la percentuale di perdita di fluido organico è pari al 2 %, nel prosieguo dello studio si prenderà invece come riferimento un tasso di perdita del 5 %.

Nella categoria "Ozone layer", il contributo più significativo è rappresentato dall'assemblaggio del modulo. Questo comprende anche l'effetto del rilascio in ambiente del fluido ma essendo questo ad ODP pari a 0, il contributo maggiore è legato alla produzione dell'impianto stesso.

Nella categoria "Minerals", sono preponderanti gli effetti della fase di smaltimento e di produzione del modulo. In particolar modo la prima va a ridurre fortemente l'impatto in questa categoria. È stato infatti ipotizzato uno scenario abbastanza spinto di riciclo dei materiali, come descritto in precedenza.

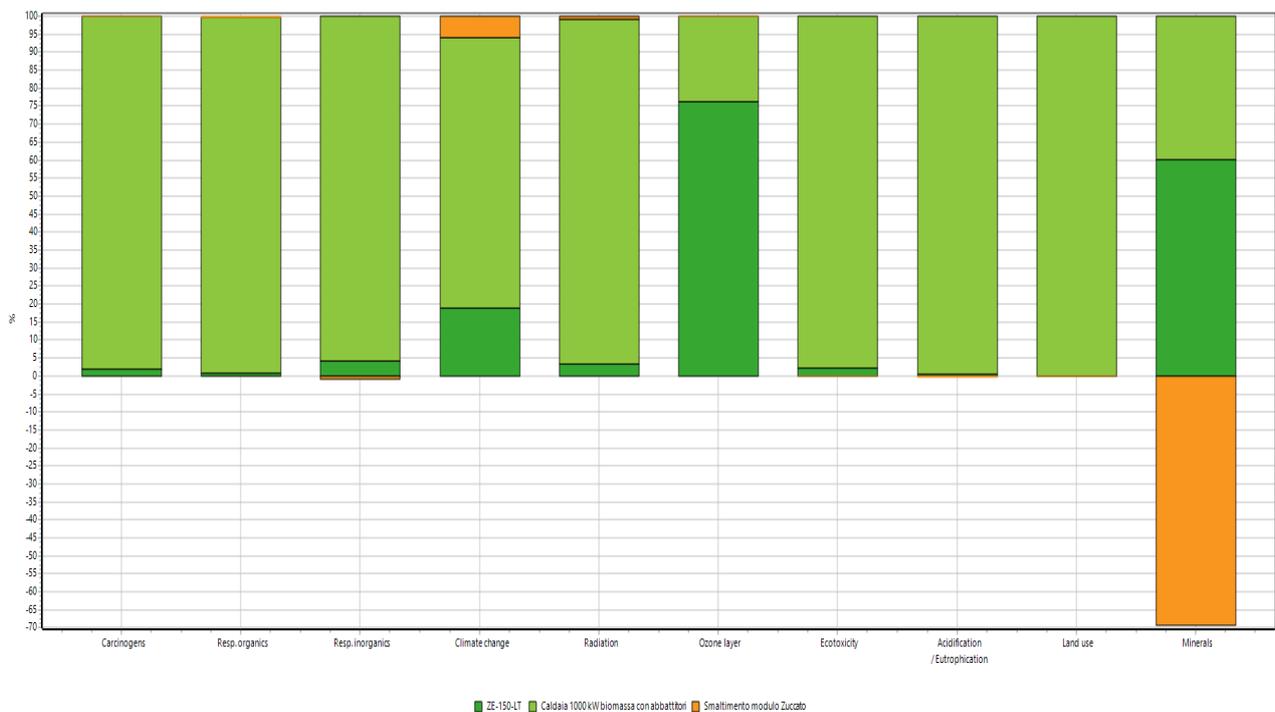


Fig 6.5 Caratterizzazione Zuccato 2 %

Nella fig. 6.6, si può vedere la pesatura. Come era prevedibile, considerando l'intero ciclo di vita di 15 anni, il peso della parte legata alla combustione (comprendente la produzione della caldaia, la filiera della biomassa e l'implementazione dei sistemi di abbattimento) è nettamente preponderante rispetto agli altri. Nonostante ciò, non è trascurabile l'effetto negativo (positivo per la salute umana) della fase di smaltimento.

Nella categoria d'impatto "Resources", il processo di smaltimento incide in modo determinante.

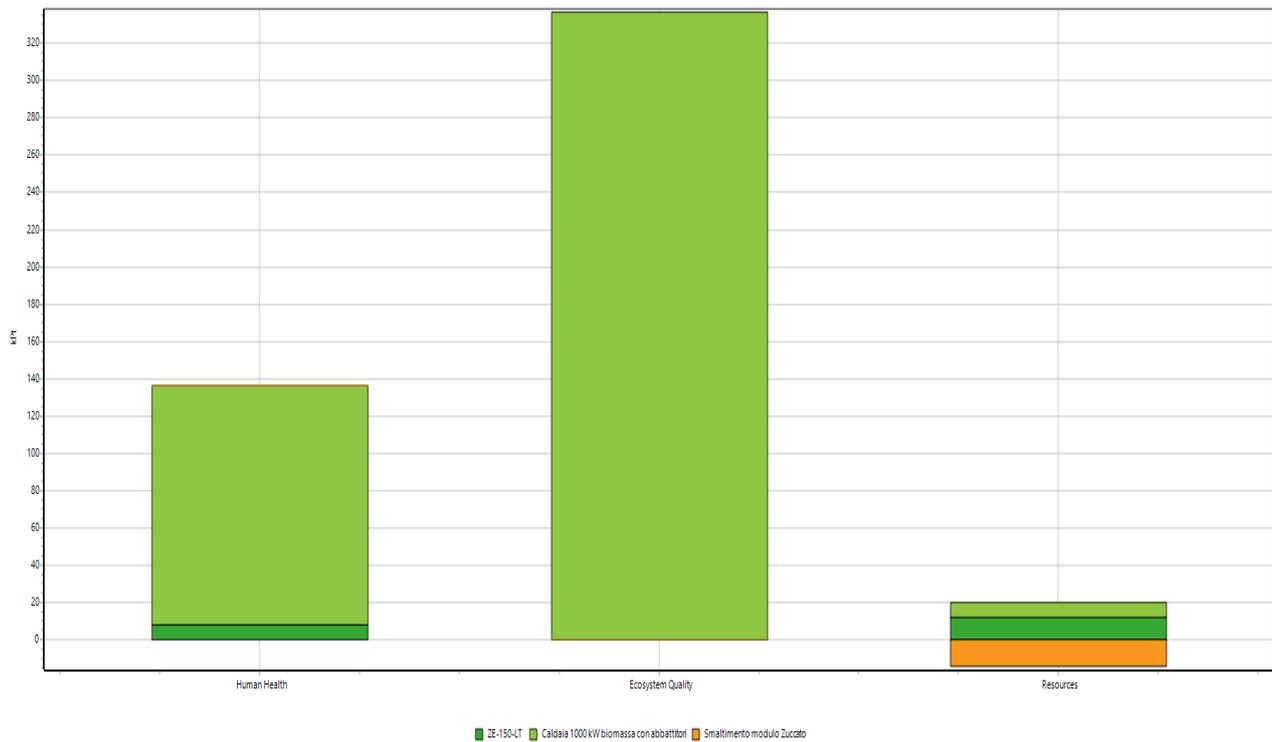


Fig. 6.6 Pesatura Zuccato 2 %

Si analizza ora il funzionamento del modulo operante con il “Fluido Zuccato”, con una percentuale di perdita di fluido organico in ambiente pari a 5 % e con un fattore di carico di 6000 ore/anno. Questa configurazione sarà quella di riferimento per successive comparazioni con altre tipologie di impianto.

In questa situazione, la quantità di fluido organico rilasciata in ambiente è pari a 343 kg. Ciò equivale a 325.755 kg CO_{2eq}.

Effettuando la simulazione per l'intero ciclo di vita, si ottiene un valore di CO₂ equivalente totale rilasciata in atmosfera pari a 1145 ton. La dispersione del fluido organico in ambiente incide quindi per circa 326 ton su 1145 ton; ciò equivale ad una percentuale del 28,47 %.

Riportandoci all'unità funzionale, si ottiene un valore di emissione totale di gas climalteranti pari a 85 g CO_{2eq}/kWh. Il fluido organico incide per circa 24,1 g CO_{2eq}/kWh.



Realizzato da: LCA Biomassa 2; Metodo: Eco-indicator 99 (V2.10) / Europei 99 (A) / Caratterizzazione

Fig. 6.7 Caratterizzazione Zuccato 5 %

Nella fig.6.7, si può vedere la caratterizzazione. Le considerazioni sono simili alla simulazione precedente, diventa maggiore in questo caso l'incidenza del fluido organico nella categoria "Climate change" come si può vedere dal grafico. Ciò è ragionevole poiché è aumentata la percentuale di perdita di quest'ultimo.

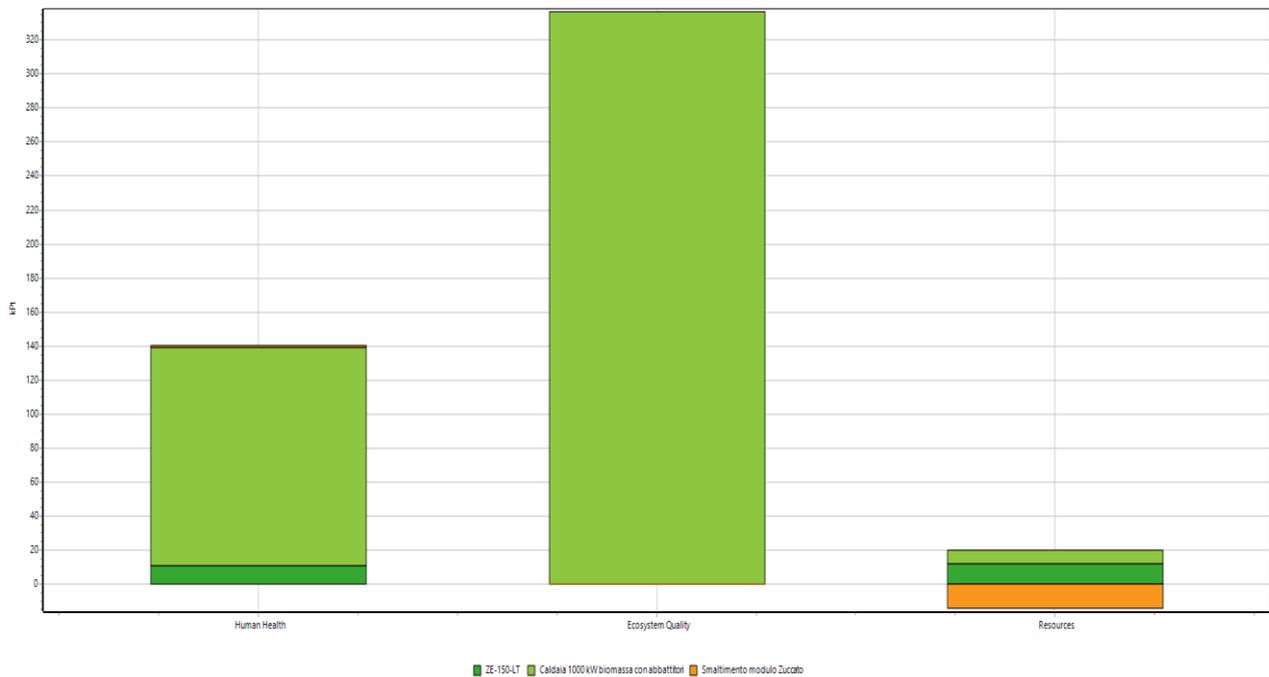


Fig. 6.8 Pesatura Zuccato 5 %

Nella fig.6.8 vediamo la pesatura. Le considerazioni sono simili al caso precedente. L'impatto sulla salute umana è leggermente aumentato a causa della maggior emissioni di gas climalteranti.

È possibile calcolare a questo punto le emissioni aggiuntive che questa configurazione comporta rispetto al caso precedente.

L'emissione legata alla dispersione di fluido organico è di circa 326 ton in 15 anni; nella configurazione precedente era 172 ton. Ciò equivale a maggiori emissioni per 154 ton. Rispetto all'unità funzionale, tale valore si traduce in una differenza di 11,4 g/kWh di CO_{2eq}.

Risulta quindi evidente, che anche una piccola variazione di perdita di fluido annua, 3% in questo caso, determina un sensibile aumento delle emissioni di gas climalteranti.

6.5 CO₂ BIOGENICA

In riferimento al caso appena considerato, risulta utile esplicitare il significato di anidride carbonica di origine fossile e di origine biogenica.

Si effettua ora una simulazione del ciclo di vita con il metodo “Greenhouse Gas Protocol”.

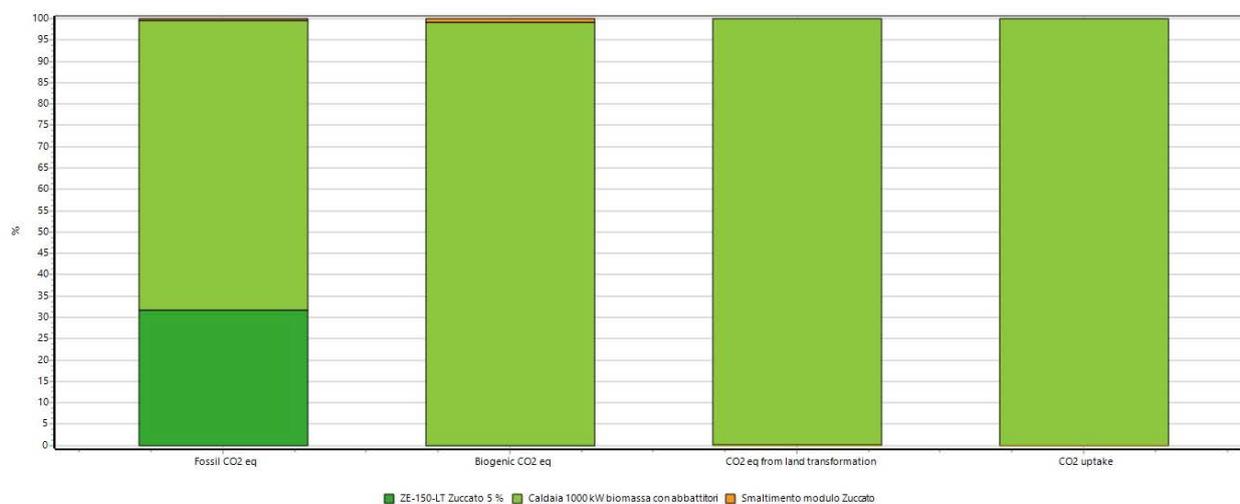


Fig. 6.9 Caratterizzazione CO₂ biogenica

Nella figura 6.9 si può vedere la caratterizzazione per il caso sopracitato utilizzando il metodo “Greenhouse Gas Protocol”. Riferendosi alla fascia verde chiaro, legata alla combustione della biomassa, risulta più netta la distinzione tra CO₂ fossile e biogenica. Quest’ultima infatti è la quantità di anidride carbonica emessa a seguito della combustione della biomassa che a sua volta era stata assorbita dal vegetale nella fase di crescita dello stesso. Tale quantità viene quindi effettivamente emessa ma non contribuisce all’aumento netto dell’anidride carbonica in atmosfera. La CO₂ fossile invece deriva da tutte quelle attività legate alla coltivazione, trasporto e lavorazione della biomassa che determinano effettivamente emissioni di gas climalteranti in surplus rispetto al naturale ciclo di cattura e rilascio.

L’impatto del componente “Caldaia”, è nettamente preponderante per quanto riguarda l’anidride carbonica equivalente biogenica emessa, non lo è invece per l’anidride carbonica fossile, di maggior interesse per noi. Pur essendo il contributo di questa fase ancora prevalente, esso incide per una percentuale pari al 68 %; il 32 % delle emissioni sono invece determinate dalla fase di produzione,

assemblaggio, smaltimento del modulo LTE e rilascio in atmosfera di parte del fluido organico. Per una completa comprensione dei dati di questa specifica simulazione è importante sottolineare che il componente “Caldaia” comprende anche la fase di coltivazione, lavorazione e trasporto della biomassa, di costruzione della caldaia e di utilizzo dei sistemi di abbattimento degli inquinanti, questi aspetti verranno analizzati con maggior dettaglio successivamente nello studio.

Per quanto riguarda la categoria “CO₂eq from land transformation”, la componente legata alla combustione è nettamente preponderante. Tale categoria di impatto è comunque di interesse secondario in ragione delle quantità esigue in gioco.

Nell’ultima colonna è possibile visualizzare la categoria d’impatto “CO₂ uptake”, di quantità analoga alla CO₂ biogenica emessa, essa rappresenta la quantità di anidride carbonica assorbita dal vegetale durante la propria vita.

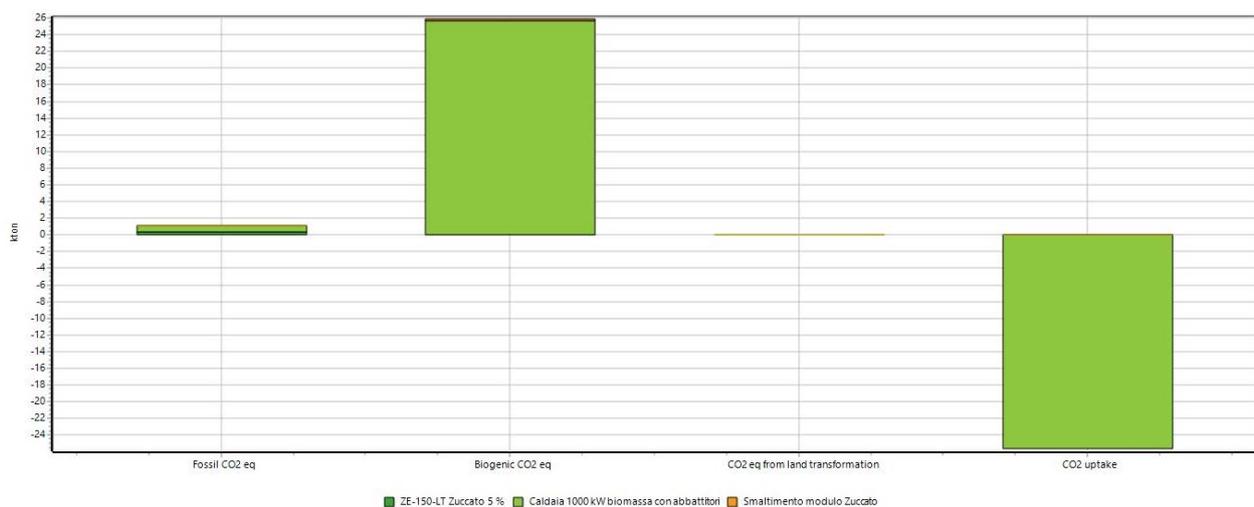


Fig. 6.10 Pesatura CO₂ biogenica

Nella figura 6.10 si può vedere la pesatura. Essa ci fornisce una chiara rappresentazione delle quantità in gioco. La componente biogenica è infatti nettamente maggioritaria e numericamente si attesta su un valore di circa 25.000 ton. La componente fossile è invece poco superiore alle 1000 ton. La componente legata alle trasformazioni del terreno è trascurabile.

È interessante notare come, sulla componente fossile dell’anidride carbonica, incida in modo considerevole il modulo LTE inteso nella sua fase di produzione, assemblaggio e rilascio di fluido in ambiente. La quota di emissione legata alla combustione si attesta infatti circa su 600 ton, quella legata al modulo su 400 ton.

6.6 CONFRONTO FLUIDI

Viene ora effettuato un confronto sugli impatti dell'impianto utilizzando tre diversi fluidi organici con percentuale di perdita pari al 5 %. Il "Fluido Zuccato", l'R245fa e l'R1233zd. In fig.6.11 si può vedere la caratterizzazione.

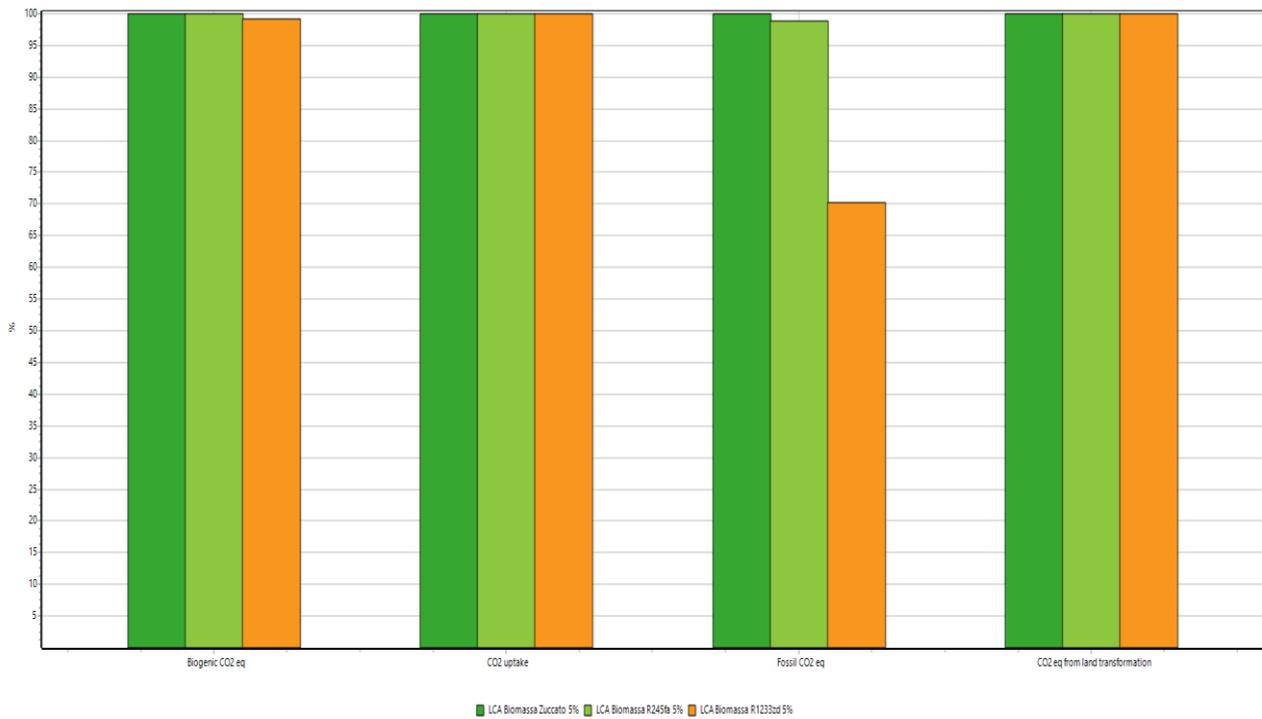


Fig. 6.11 Caratterizzazione confronto fluidi

L'impianto che utilizza il fluido a minor impatto climalterante, incide sulla categoria "Fossil CO₂" per un valore pari al 70 % rispetto all'impianto utilizzante il "Fluido Zuccato". L'impianto che utilizza il "R245fa", incide invece per un valore pari all' 98%. La differenza è quindi sensibile per il fluido R1233zd.

In fig. 6.12 vediamo la pesatura.

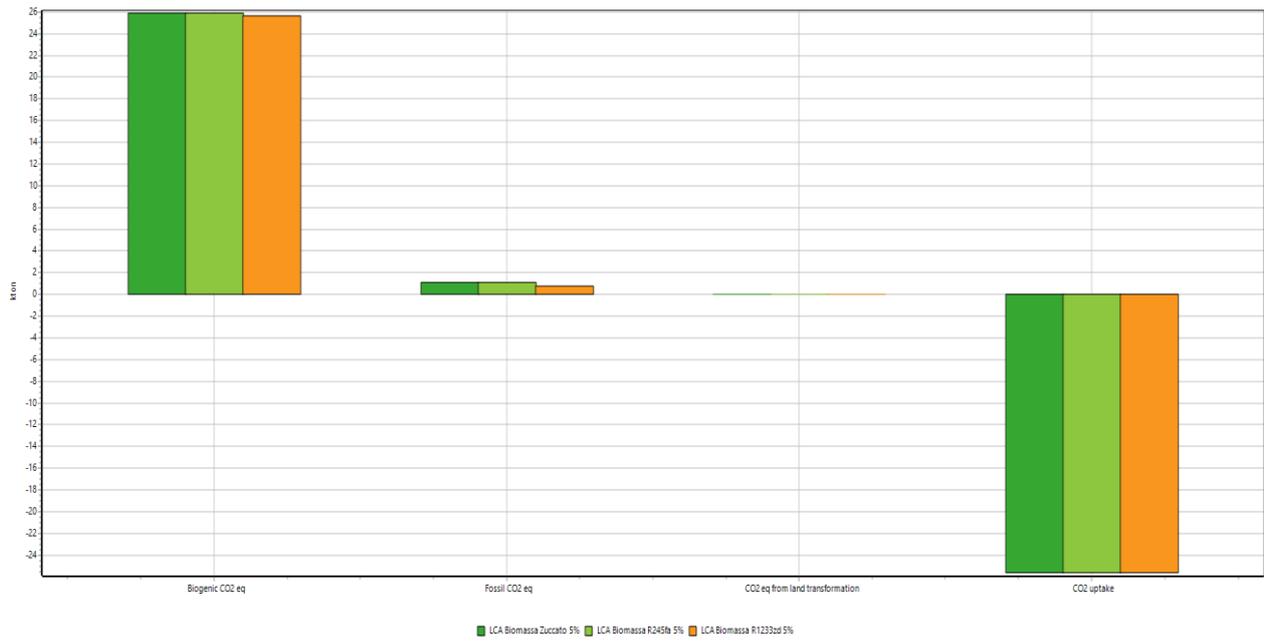


Fig. 6.12 Pesatura confronto fluidi

Osservando la categoria “CO₂ Fossil”, si può notare che l’impatto dell’impianto utilizzando il fluido “R1233zd”, è sensibilmente minore. I valori numerici si attestano rispettivamente a circa 922 ton per il “Fluido Zuccato”, 909 ton per l’R245fa e 593 ton per l’R1233zd.

6.7 RIASSUNTO SIMULAZIONI

3000 ore/anno	R245fa [gCO ₂ /kWh]	R1233zd [gCO ₂ /kWh]	Fluido Zuccato [gCO ₂ /kWh]
2 %	80	57,5	83
5 %	107	58	112
10 %	140	58,5	150
6000 ore/anno			
2%	70	50	73
5%	982	50,5	85
10%	98	51	105

Tab 6.7.1 Emissione specifiche CO_{2eq}

7 INTERPRETAZIONE

7.1 EMISSIONI CO₂ EQUIVALENTE

Valutando il modulo nelle condizioni che si sono definite come standard e cioè con fattore di carico pari a 6000 ore/anno, utilizzando il “Fluido Zuccato” con una percentuale di perdita pari al 5 %, risulta utile effettuare alcune considerazioni.

In tale configurazione, la quantità di anidride carbonica equivalente emessa nell'intero ciclo di vita risulta essere 1145 ton. Considerando la produzione totale di energia elettrica, pari a 13.500 MWh, l'emissione specifica si attesta a circa 85 g CO_{2eq}/kWh.

L'emissione di anidride carbonica equivalente legata alla dispersione di fluido organico è pari a circa 328 ton, l'emissione specifica si attesta quindi a circa 24,3 g CO_{2eq}/kWh.

L'emissione di anidride carbonica equivalente legata alla fase di produzione, assemblaggio e smaltimento del modulo è pari a circa 32 ton, l'emissione specifica si attesta a circa 2,4 g CO_{2eq}/kWh.

Il processo legato alla filiera del legno ed alla successiva combustione della biomassa, contribuisce all'emissione per un valore pari a 785 ton, con un dato specifico pari a circa 58 g CO_{2eq}/kWh.

In termini percentuali, il processo legato alla biomassa, quello correlato alla dispersione del fluido organico e quello comprendente la produzione, assemblaggio e smaltimento del modulo incidono rispettivamente per valori pari al 68 %, 29 % e 3 % del totale.

Risulta necessario sottolineare che, quando ci si riferisce all'anidride carbonica equivalente emessa, non si sta considerando la quota biogenica, che ha effetto neutro in relazione all'effetto serra.

Il processo più impattante in relazione all'emissione di CO₂ equivalente, risulta quindi essere il processo legato alla filiera del cippato. Questo, sebbene possa risultare in contraddizione con le precedenti considerazioni sull'anidride carbonica biogenica, è dovuto al fatto che le fasi di coltivazione, raccolta e lavorazione del cippato vengono valutate all'interno di questo processo.

Entrando maggiormente nel dettaglio, la filiera del legno incide in modo maggioritario sul contributo di gas ad effetto serra non legati alla produzione del modulo per un valore di circa 517 ton su 785 ton. La restante parte è dovuta principalmente all'impatto causato dai sistemi di

abbattimento degli NOx e alla produzione del componente caldaia. Tali valori presuppongono una distanza per l'approvvigionamento del legname pari a 75 km.

Considerando una provenienza del legname da una distanza di 200 km, il contributo alle emissioni di gas climalteranti dovute alla filiera del legno sale a 612 ton.

Diminuendo la distanza a 30 km, tale valore scende a 483 ton.

La distanza non è quindi un elemento predominante ma il suo effetto non è certamente trascurabile.

7.2 UTILIZZO DIVERSI FLUIDI

Per rendere significativo il confronto fra diversi fluidi, è necessario primariamente effettuare un'analisi sull'effetto della variazione del fluido sul rendimento termodinamico del ciclo. Si era già verificato in precedenza il mantenimento delle condizioni sub-critiche per tutti i tipi di fluido stante le condizioni operative considerate.

Valutiamo il fluido R245fa. I parametri operativi si sceglie di mantenere costanti sono la temperatura del vapore organico in ingresso in turbina pari a 145 °C e la temperatura di condensazione pari a 40 °C.

Entalpia vapore saturo a 418 K = 487 kJ/kg = H_{pre-e}

Lavoro = $H_{pre-e} - H_{post-e}$

Entropia vapore pre-espansione = 1,79 kJ/kg K = s_{pre-e}

Entalpia ideale post-espansione = 436 kJ/kg = $H_{post-eis}$

Rendimento isoentropico espansione = 0,8 = η_{is}

Entalpia post-espansione = 446,2 kJ/kg = H_{post-e}

$L = 487 - 446,2 = 40,8$ kJ/kg

La potenza elettrica che è necessario sviluppare è 150 kW.

Avendo il valore della potenza e del salto entalpico in espansione, è possibile ottenere il valore della portata pari a 3,67 kg/s rispetto ai 5,26 kg/s che erano necessari con il "Fluido Zuccato".

Con questi valori, Il rendimento termodinamico dell'intero ciclo è pari a 17,3 %.

Facendo simili valutazioni per il fluido R1233zd si ottiene una portata pari a 3,57 kg/s ed un rendimento termodinamico pari a 17,8 %.

Tale analisi semplificata non si propone di effettuare un calcolo puntuale della portata e del rendimento. Riguardo quest'ultimo i valori ottenuti sono sensibilmente superiori a quelli dichiarati dal costruttore con l'utilizzo del "Fluido Zuccato". Il calcolo qui effettuato non tiene però conto dei rendimenti meccanici del generatore di corrente, degli autoconsumi dell'impianto e delle perdite per dissipazione. Si è ritenuto quindi ragionevole effettuare (cap. 6.6) anche per gli altri fluidi un'analisi mantenendo lo stesso rendimento dichiarato dal costruttore. Si è andati però a variare la quantità di fluido dispersa in ambiente. Si è assunto in modo semplificato che la portata fosse proporzionale alla massa totale di fluido contenuta nel circuito. L'impianto utilizzante l'R145fa e l'R1233zd, necessitano di una quantità minore di fluido pari al 70%, fatto 100 il "Fluido Zuccato".

Una volta giustificato l'utilizzo del rendimento fornito dal costruttore per le varie simulazioni e anche alla luce dei risultati ottenuti nella tabella riassuntiva si ritiene opportuno effettuare delle ulteriori considerazioni.

Indipendentemente dal tipo di fluido, la configurazione con fattore di carico pari a 6000 ore/anno, risulta meno impattante in termini di emissioni specifiche di gas climalteranti. Tale comportamento è dovuto al migliore ammortamento della fase di costruzione e assemblaggio del componente e delle perdite di fluido organico che sono state considerate proporzionali al tempo di vita.

Considerando la situazione di riferimento, con una percentuale di perdita di fluido pari al 5 % annua, ci sono sensibili discostamenti tra l'utilizzo di un fluido e l'altro. Sicuramente potrebbero esserci in effetti delle variazioni di rendimento utilizzando un fluido diverso da quello fornito dal costruttore; si è ritenuto di poter comunque utilizzare il rendimento fornito dal costruttore, come verrà giustificato nel prossimo paragrafo.

Appare comunque molto ampio lo scostamento con l'utilizzo di un fluido a bassissimo GWP come R1233zd, si ritiene quindi che, nonostante la possibile variazione di efficienza termodinamica del ciclo, sarebbe sicuramente opportuno indagare l'utilizzo di tale tipologie di fluidi. Per le successive simulazioni si prenderà comunque come riferimento l'impianto utilizzante il "Fluido Zuccato" con percentuale di perdita pari al 5 %.

8 CONFRONTI

8.1 TURBOGAS MODALITA' ELETTRICA

Si ritiene utile effettuare un confronto tra il modulo LTE ed una turbina a gas, assumendo che entrambi vengano utilizzati solo per produrre energia elettrica.

Viene scelta dal database di SimaPro una turbina a gas radiale dotata di recupero termico dei fumi per preriscaldare l'aria compressa in ingresso. Questo tipo di dispositivo permette di connettersi alla rete del gas a bassa pressione, dispone infatti di un booster che permette l'innalzamento della pressione del combustibile. Il rendimento elettrico dichiarato è pari al 29 %. La potenza nominale è analoga a quella del modulo, 150 kWel. Si può quindi effettuare un confronto a parità di condizioni sugli impatti in 15 anni di vita utile, considerando un fattore di carico di 6000 ore/anno.

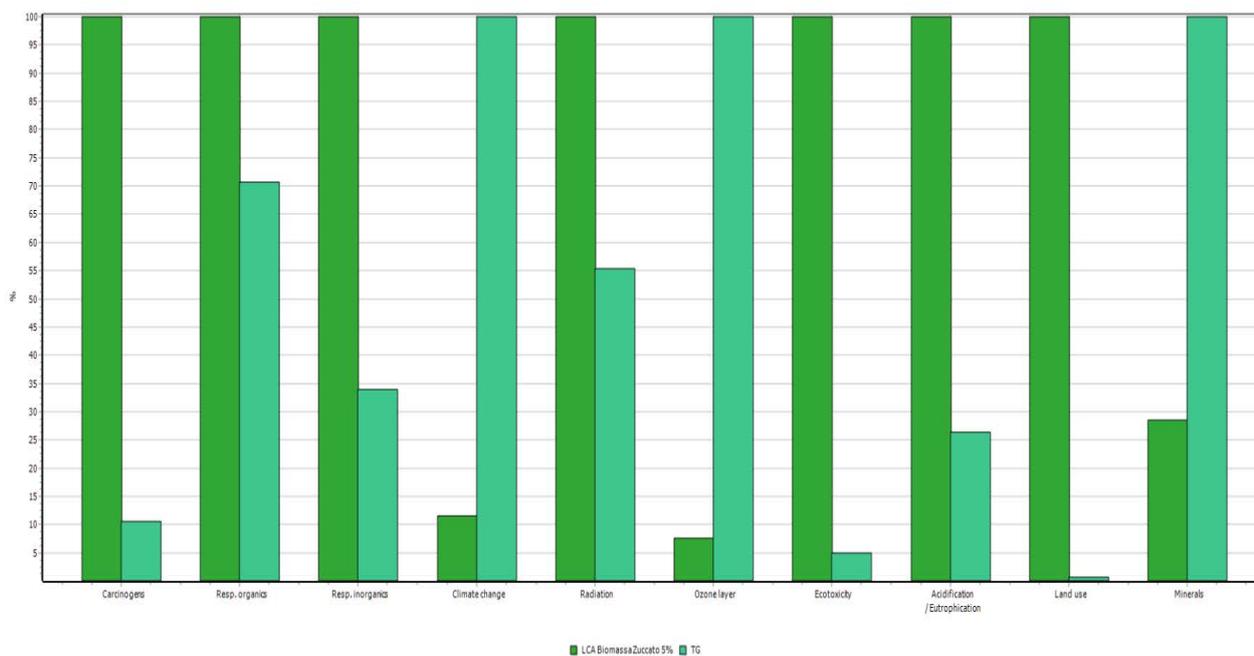


Fig. 8.1.1 Caratterizzazione LTE - TG

In fig. 8.1.1 possiamo vedere la caratterizzazione delle due configurazioni a confronto.

Le categorie in cui il modulo LTE è nettamente meno impattante sono “Climate change”, “Ozone layer” e “Minerals”. Le categorie nelle quali invece è molto meno impattante la turbina a gas sono “Carcinogens”, “Land use” e “Ecotoxicity”.

Per avere un'idea più efficace del peso degli impatti ci si può riferire alla figura 8.1.2

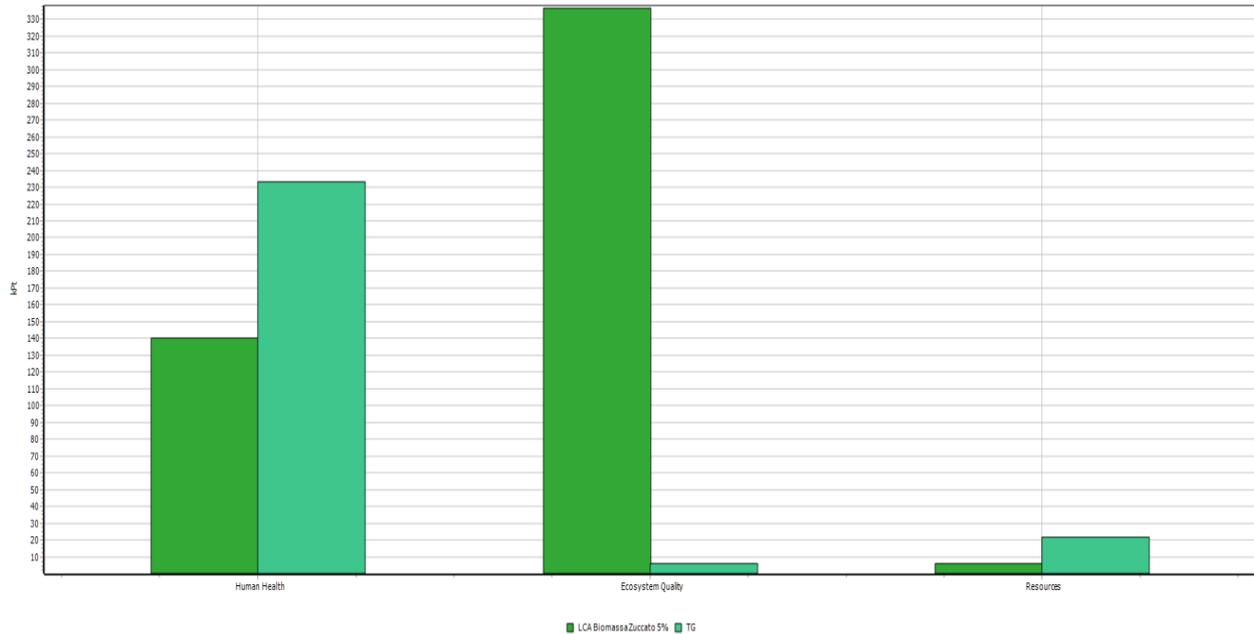


Fig. 8.1.2 Pesatura LTE - TG

Complessivamente l'impatto sulla salute umana del modulo LTE è sensibilmente minore di quello della turbina a gas.

Anche per quanto riguarda le risorse, l'impatto dell'impianto a biomassa è circa un terzo di quello relativo all'impianto a gas.

Per quanto concerne la qualità dell'ecosistema, la turbina a gas risulta essere nettamente migliore.

Interpretazione risultati:

Il contributo sicuramente non trascurabile del modulo LTE sull'emissione di sostanze cancerogene e quindi sulla categoria "Salute umana" è superato per importanza dall'effetto dell'emissione di sostanze climalteranti della turbina a gas.

Per la categoria “Qualità dell’ecosistema”, l’emissione da parte del modulo LTE di una quantità di polveri nettamente superiore rispetto all’impianto a gas e il consumo di suolo necessario alla coltivazione della biomassa, rendono l’impatto del primo nettamente preponderante.

Per la categoria “Risorse”, essendo la biomassa rinnovabile a differenza del gas naturale, l’impatto del modulo LTE è nettamente minore.

8.2 RETE ELETTRICA

Si esegue ora un confronto degli impatti per l'intero ciclo di vita tra il modulo LTE e la rete elettrica. Si assume una produzione elettrica totale del modulo in 15 anni di 13.500 MWh ed un uguale assorbimento dalla rete della stessa quantità di energia.

Come si può vedere in fig. 8.2.1 la rete elettrica, rappresentata in verde chiaro, impatta maggiormente rispetto al modulo nelle categorie "Respiratory inorganics", "Climate change", "Radiation", "Ozone layer" e "Minerals".

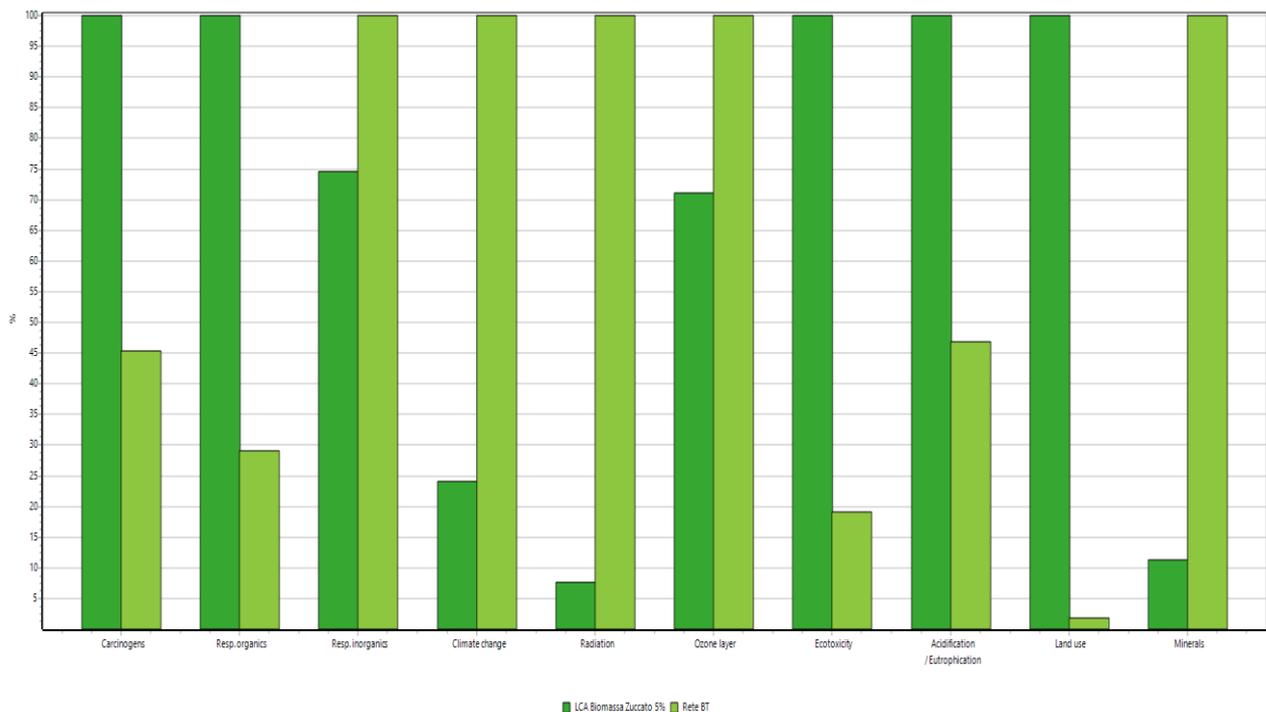


Fig.8.2.1 Caratterizzazione LTE - Rete

In fig. 8.2.2 è possibile analizzare la pesatura. La rete elettrica presenta un impatto sulla salute umana sensibilmente maggiore rispetto al modulo LTE.

Per quanto riguarda la categoria "Risorse", l'impatto della rete elettrica è nettamente superiore, quasi di un ordine di grandezza. Ciò può essere imputato al fatto che ancora una parte maggioritaria della produzione elettrica nazionale è ottenuta con l'utilizzo di fonti non rinnovabili.

Come per i casi precedenti, nella categoria "Ecosystem Quality", l'impatto del modulo LTE è nettamente preponderante.

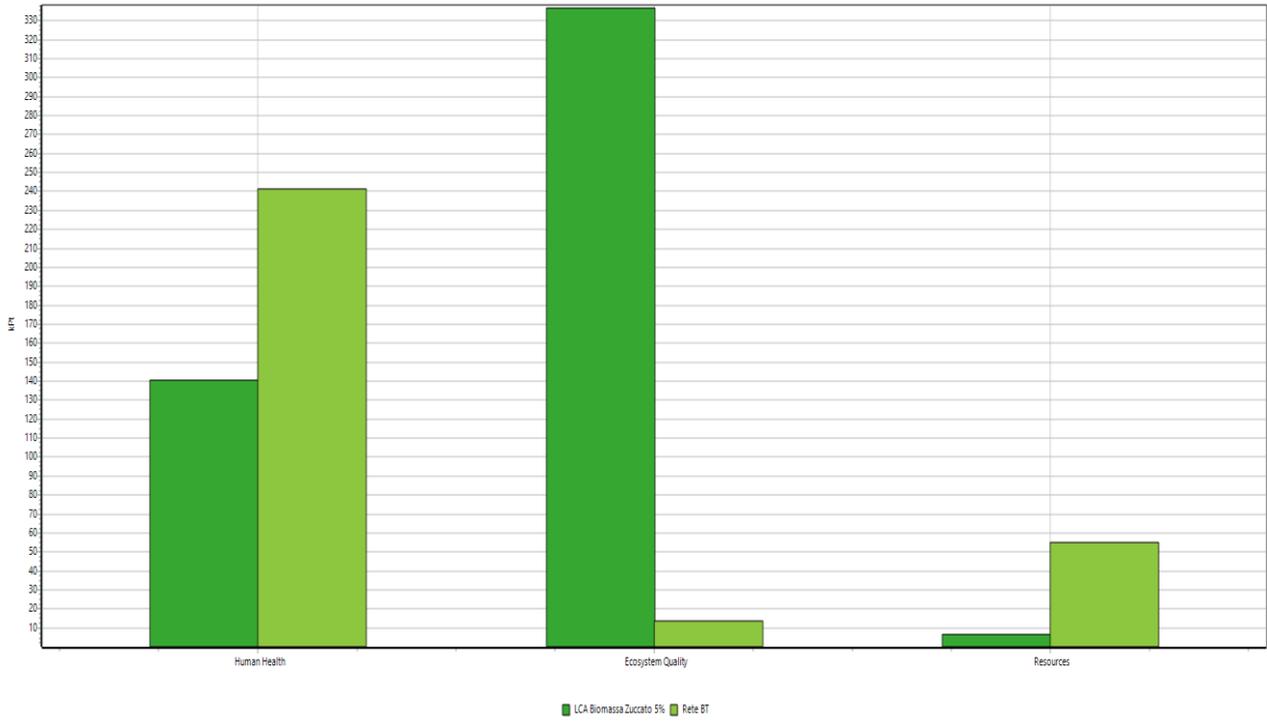


Fig. 8.2.2 Pesatura LTE - Rete

9 MODALITA' COGENERATIVA

9.1 RECUPERO 75 %

Si ritiene utile a questo punto dello studio effettuare un'analisi degli impatti del modulo LTE utilizzato in modalità cogenerativa. Esso potrebbe essere adatto ad applicazioni volte all'autoproduzione di energia elettrica e termica per grandi strutture residenziali quali alberghi o condomini.

Attraverso i dati forniti dal costruttore, possiamo calcolare la massima energia termica recuperabile al condensatore come: $Q [W] = m * C_p * \Delta t = 12 \text{ kg/s} * 4186 \text{ J/kg K} * 20 \text{ K} = 1.004.640 \text{ W}$ che corrispondono a circa 1000 kW.

In tale condizione, il rendimento elettrico è pari all'8,6 % e la potenza elettrica massima si attesta a 98 kW.

Stimando un utilizzo in una zona di fascia climatica E, con necessità di riscaldamento 6 mesi all'anno, il funzionamento in cogenerazione avviene solo in questo periodo. Si assume che dei 1000 kW che il condensatore rende disponibili se ne riescano a sfruttare il 75 % mediamente, ciò per perdite e variabilità della richiesta. Nei restanti 6 mesi si produce solo energia elettrica, con un rendimento pari al 13,6 %.

Valutiamo quindi il calore evitato con una percentuale di utilizzo del calore pari al 75 %.

Considerando un fattore di carico pari a 3000 ore/anno e una vita operativa di 15 anni si ottiene:

$Q = 1000 * 0,75 * 3000 * 15 = 33.750 \text{ MWh}$ evitati. Consideriamo che questo calore evitato sarebbe stato prodotto con un impianto caldaie centralizzato alimentato a gas naturale.

Come si può vedere in figura 9.1.1 nella caratterizzazione, il calore evitato dell'impianto centralizzato a gas che si è andati a sostituire, ha un impatto negativo molto forte. Esso nelle categorie "Climate change", "Radiation" e "Ozone layer", supera in valore assoluto l'impatto positivo del modulo LTE. In particolar modo per la categoria "Climate change", tale risultato deriva dall'aver sostituito un riscaldamento a gas naturale con un riscaldamento a biomassa.

Guardando la pesatura in fig. 9.1.2, si vede come anche l'impatto evitato sulla categoria "Salute umana" sia preponderante rispetto a quello del modulo, tale comportamento è sempre legato alle emissioni evitate di gas climalteranti.

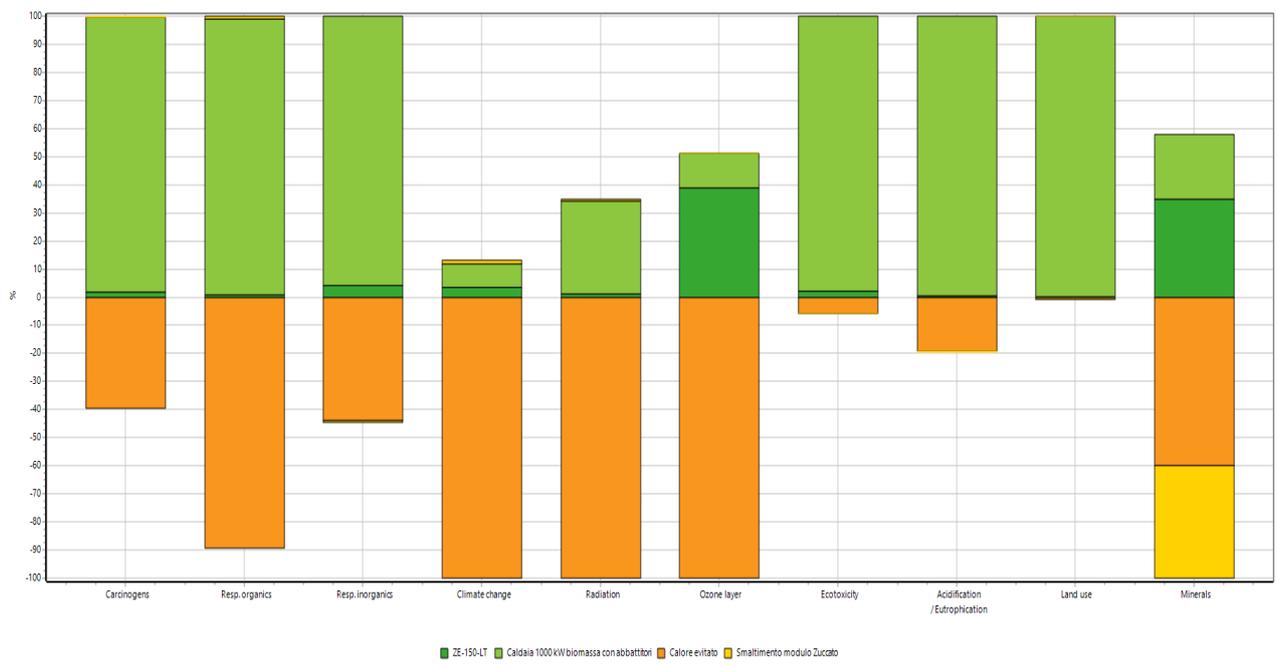


Fig. 9.1.1 Caratterizzazione cogenerativa 75 %

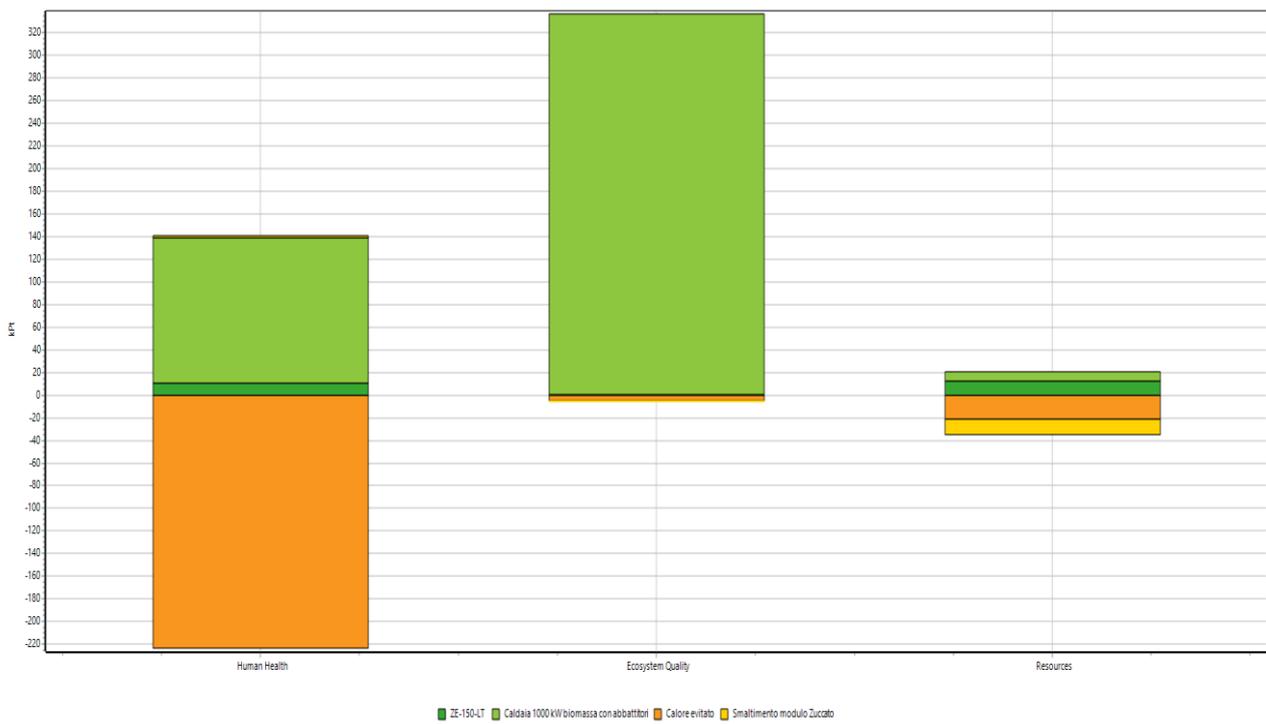


Fig. 9.1.2 Pesatura cogenerativa 75 %

9.2 CONFRONTO RECUPERO 45 % - 75 %

Viene ora considerata la condizione operativa con una percentuale di recupero dell'energia termica pari al 45 %. Nella fig. 9.2.1, il recupero al 45 %, è rappresentato dalla colorazione in verde scuro e può essere confrontato con la configurazione che presenta il recupero al 75 %. Come era prevedibile l'impatto di un recupero al 45 %, risulta maggiore in tutte le categorie.

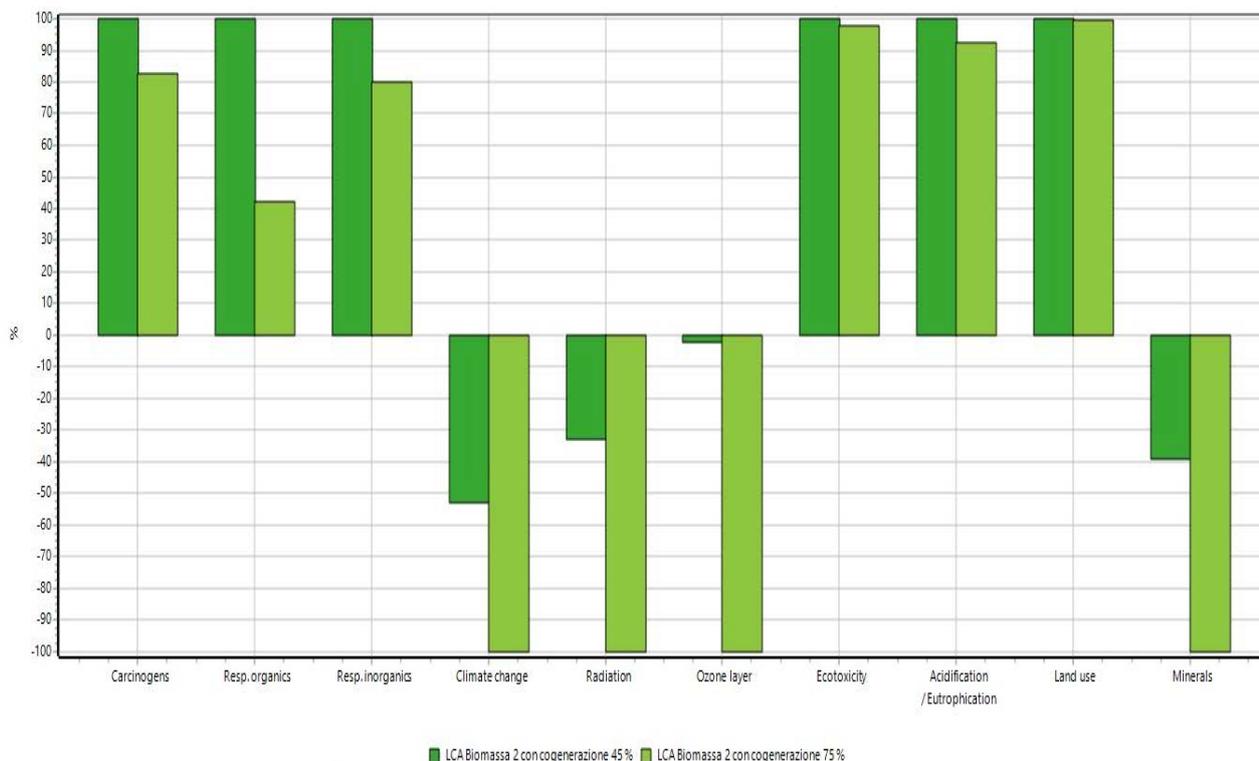


Fig. 9.2.1 Caratterizzazione cogenerativa 75% - 45 %

In particolar modo guardando la pesa in fig. 9.2.2, si può notare una differenza di impatto sensibilmente significativa sulla salute umana. Tutto il calore che non si riesce a recuperare verrebbe infatti prodotto da caldaie a gas. Ciò incide in modo abbastanza importante anche sulla categoria delle Risorse. Per quanto riguarda la categoria “Ecosystem Quality”, l'impatto è irrilevante poiché il maggiore utilizzo di metano incide poco su tale categoria.

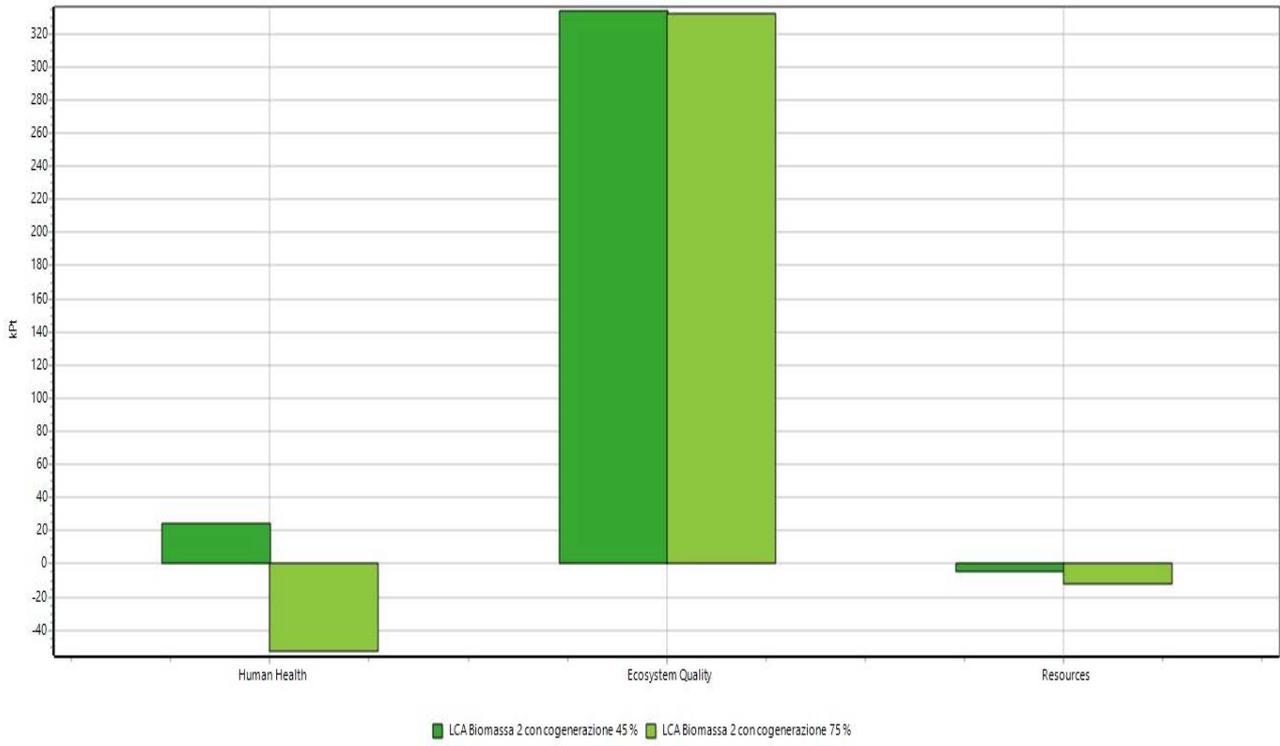


Fig. 9.2.2 Pesatura cogenerativa 75% - 45 %

9.3 CONFRONTO CON TG MODALITA' COGENERATIVA

Si intende ora effettuare un confronto tra due configurazioni operative che si ritengono significative. Il modulo LTE in modalità cogenerativa ed un impianto turbogas anch'esso utilizzato in questa modalità.

Per semplicità di calcolo si assume di analizzare solo la fase di cogenerazione per entrambi gli impianti. La richiesta elettrica è costante e pari a 100 kW di potenza. La richiesta termica è pari a 750 kW, come analizzato nel caso precedente.

Per eseguire il confronto si ipotizza di ottenere dai due impianti la stessa potenza termica. Quest'ultima, di norma, è più vincolante di quella elettrica.

Il rendimento elettrico del TG in modalità cogenerativa è pari a 21 %. L'energia termica che è necessario ottenere, per rispettare le caratteristiche del modulo LTE, è pari a 33.750 MWth. Tale valore si riferisce ad un periodo di 15 anni. Al fine di ottenere questo valore di energia termica, è necessario scegliere un impianto turbogas con una potenza nominale elettrica in modalità cogenerativa pari a 150 kW. Si assume che esso lavori a potenza nominale e quindi al massimo del rendimento. Nel caso del turbogas quindi la potenza elettrica risulta essere maggiore di circa 50 kW. Ciò si traduce in una quantità di energia elettrica prodotta in surplus in 15 anni pari a 4500 MWh. Tale quantità si suppone venga ceduta alla rete. Tali valori sono stati ottenuti assumendo anche per la turbina a gas un recupero termico pari al 75 %, rispetto a quello massimo ottenibile.

Nelle figure 9.3.1 e 9.3.2 possiamo vedere i grafici della pesatura ottenuti rispettivamente con il metodo "Ecoindicator 99" e con il metodo "Greenhouse Gas Protocol".

L'impatto del modulo LTE sulla salute umana è solo leggermente minore rispetto all'impatto dell'impianto a turbogas. Ciò non deve stupire in quanto un impianto a gas naturale utilizzato in maniera cogenerativa è comunque una configurazione molto spinta dal punto di vista dell'efficienza e della salubrità.

La differenza risulta invece marcata in fig. 9.3.2 dove si considera in modo particolare l'aspetto legato all'emissione di anidride carbonica equivalente. L'impatto del modulo LTE in questo caso è nettamente inferiore.

Ciò può significare che in un contesto montano, nel quale la problematica delle polveri sottili è molto meno marcata che in ambito cittadino e dove l'impatto sul consumo di suolo a seguito della

coltivazione della biomassa può essere nettamente inferiore, può risultare sicuramente vantaggioso l'utilizzo del modulo LTE rispetto ad un impianto turbogas.

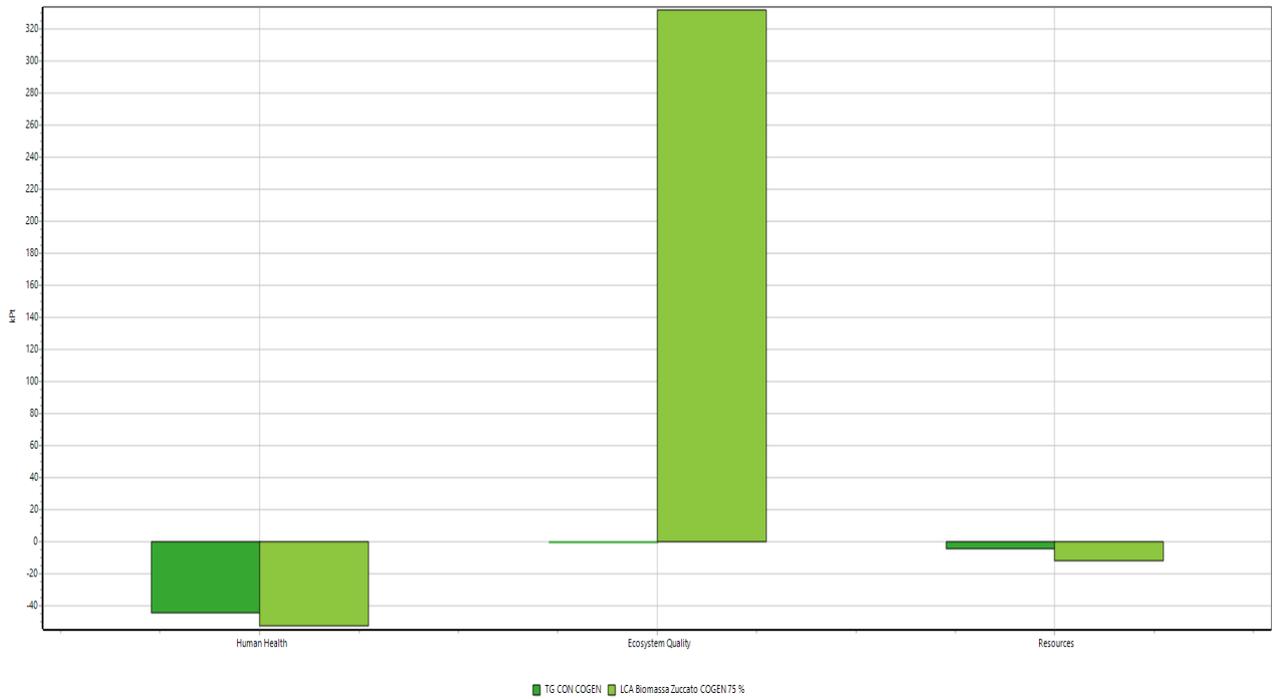


Fig. 9.3.1 Pesatura cogenerativa LTE – TG Ecoindicator 99

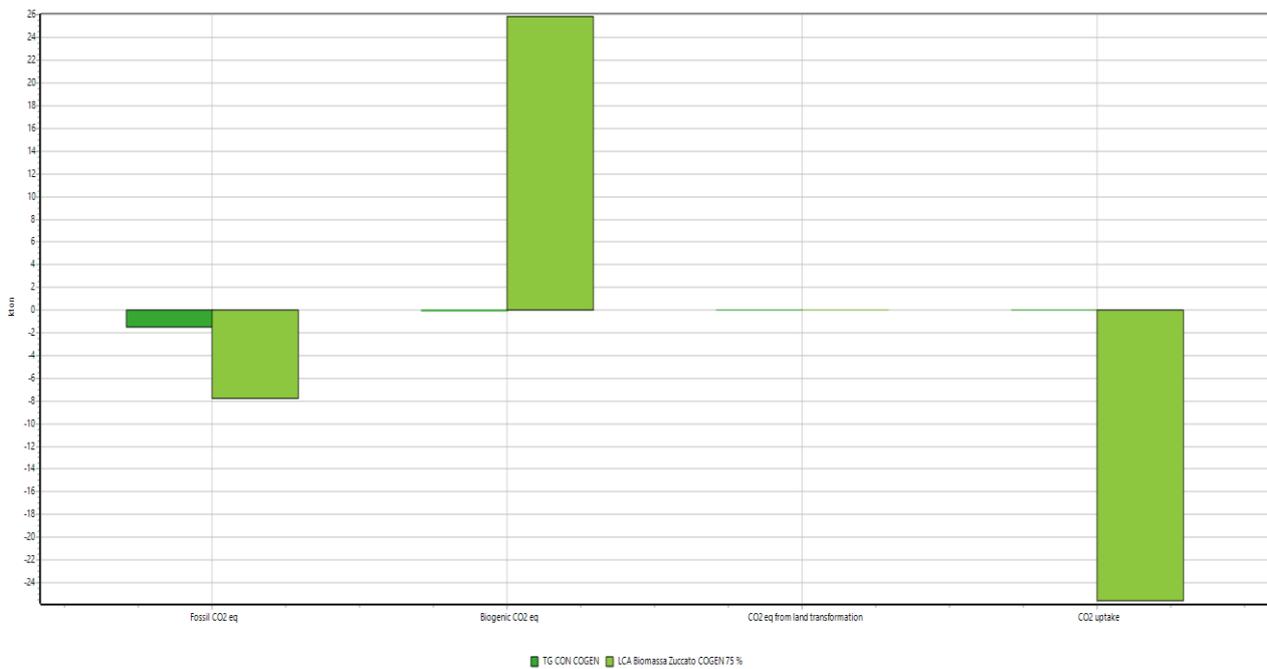


Fig. 9.3.2 Pesatura cogenerativa LTE – TG Greenhouse Gas Protocol

10 CASO STANDARD

Si ritiene opportuno a questo punto dello studio effettuare un confronto tra due condizioni operative molto significative. La prima è rappresentata dall'utilizzo del modulo LTE in modalità cogenerativa per gestire le richieste elettriche e termiche di un edificio, la seconda da una condizione standard di utilizzo della rete elettrica per soddisfare i consumi elettrici e di un impianto centralizzato a gas naturale per rispondere a quelli termici.

Modulo in modalità cogenerativa:

Per semplificare il calcolo si assume che durante i 6 mesi invernali, la richiesta di potenza elettrica sia costante e pari a 98 kW. Per i sei mesi estivi, considerando la maggior richiesta dovuta al raffrescamento, si ipotizza una domanda di potenza elettrica pari a 150 kW. Questa impostazione, semplificata per esigenze di calcolo, si ritiene possa comunque rispondere alle finalità di questo studio che presenta inevitabilmente dei margini di errore. Risulterebbe comunque molto difficile, senza una valutazione diretta su un caso concreto, determinare in modo preciso la variazione della richiesta del carico elettrico e termico di una ipotetica struttura.

Per quanto riguarda il modulo LTE:

Produzione elettrica = $98 \text{ kW} * 3000 \text{ h} + 150 \text{ kW} * 3000 \text{ h} = 744.000 * 15 \text{ anni} = 11.160.000 \text{ kWh}$
= 11.160 MWh

Per soddisfare le necessità elettriche nelle ore in cui il modulo non è in esercizio si ipotizza di utilizzare la rete elettrica. Per semplicità si assume che le 2760 ore di fermo del modulo siano nel periodo estivo e che quindi non sia necessario utilizzare un sistema di riscaldamento a caldaia aggiuntivo nel periodo invernale. Il modulo assorbe quindi dalla rete 150 kW di potenza per 2760 ore.

Per quanto riguarda la rete:

Si assume di assorbire dalla rete elettrica in bassa tensione 98 kW di potenza per 4380 ore e 150 kW di potenza per 4380 ore.

Per quanto riguarda il riscaldamento invernale si ipotizza di utilizzare un sistema centralizzato di caldaie a gas naturale per i 6 mesi invernali, per una richiesta energetica totale pari a 33.750 MWh, equivalenti al calore evitato dal modulo con un recupero termico del 75 %.

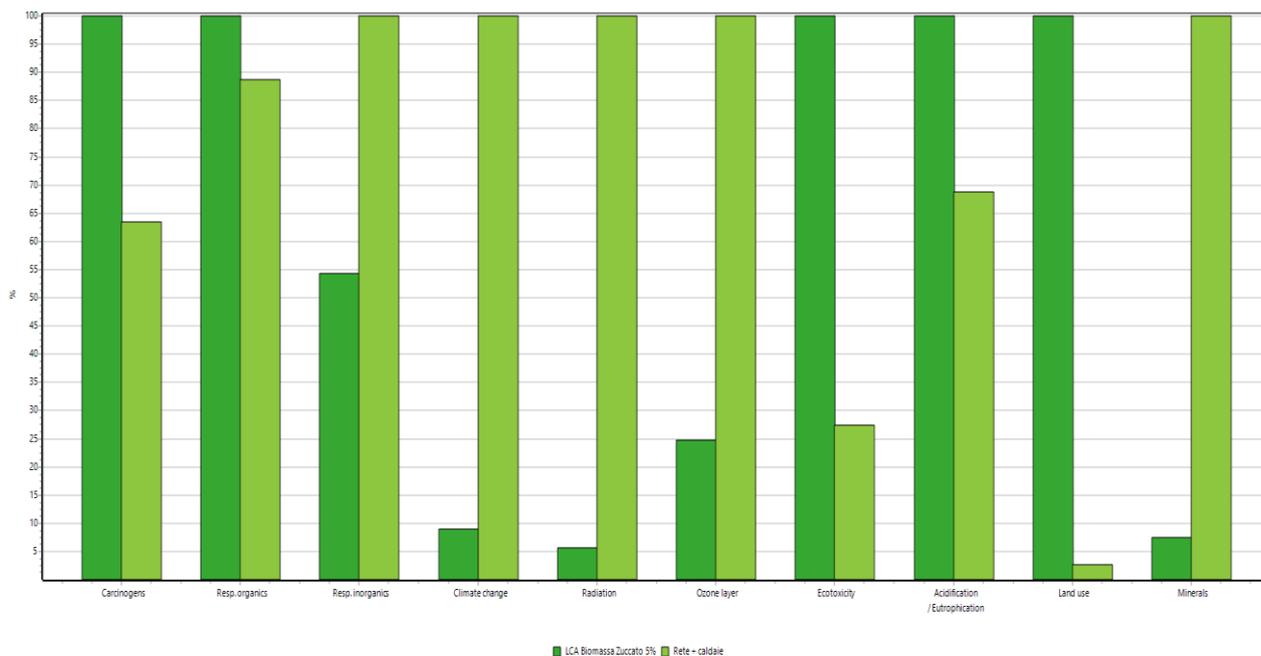


Fig. 10.1 Caratterizzazione LTE – Caso Standard Ecoindicator 99

In figura 10.1 possiamo vedere la caratterizzazione. Il modulo LTE risulta meno impattante rispetto alla configurazione tradizionale nelle categorie “Respiratory inorganics”, “Climate change”, “Radiation”, “Ozone layer”, “Minerals”.

Guardando la fig. 10.2, possiamo vedere la pesa. Risulta interessante notare come l’impatto sulla categoria “Salute umana” del modulo LTE sia nettamente inferiore rispetto alla configurazione tradizionale.

Lo stesso vale per la categoria “Resources”.

Come nei casi precedenti, per quanto riguarda la categoria “Ecosystem Quality”, l’impatto del modulo è nettamente maggiore.

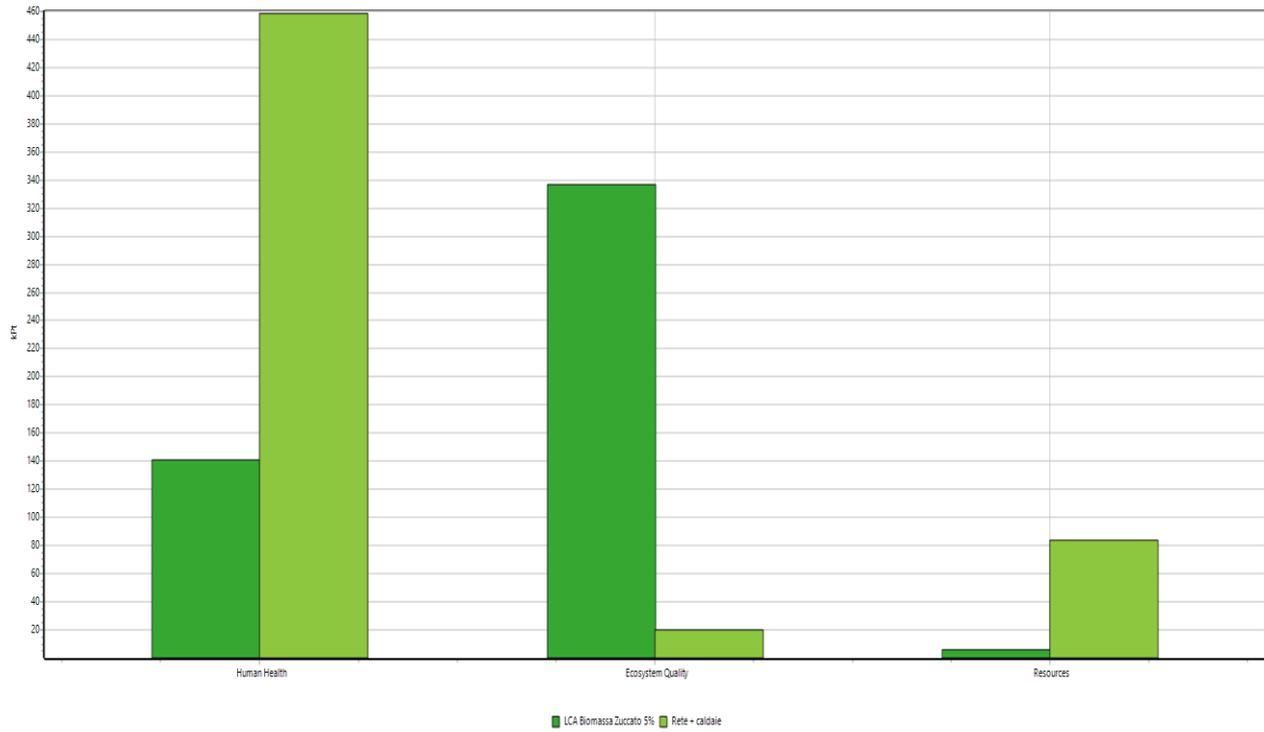


Fig. 10.2 Pesatura LTE – Caso Standard Ecoindicator 99

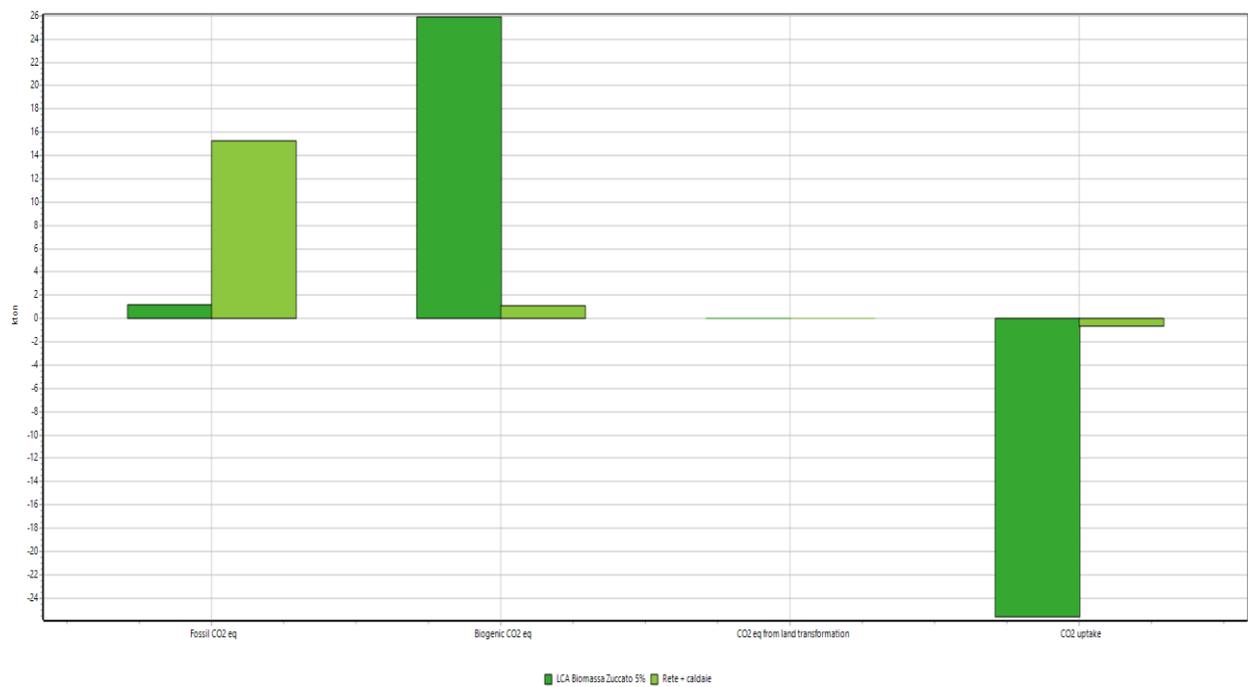


Fig. 10.3 Pesatura LTE – Caso Standard Greenhou Gas Protocol

In fig. 10.3 si può vedere la pesatura effettuata con il metodo “Greenhouse Gas Protocol”. Risulta da questa analisi ancora più evidente la differenza tra le emissioni di gas climalteranti del modulo LTE e del sistema tradizionale come si può vedere nella sinistra del grafico nella categoria “Fossil CO_{2eq}”.

11 CONCLUSIONI

In questo studio si è analizzato il ciclo di vita di un impianto ORC alimentato a biomassa solida e utilizzato per la produzione di energia elettrica e calore.

Si è effettuata un'analisi con diversi fluidi organici: il "Fluido Zuccato", l'R245fa e l'R1233zd. Si è analizzato il comportamento variando il fattore di carico e la percentuale di perdita di fluido organico.

Indipendentemente dal tipo di fluido, la configurazione con fattore di carico pari a 6000 ore/anno, risulta meno impattante in termini di emissioni specifiche di gas climalteranti. Tale comportamento è dovuto al migliore ammortamento della fase di costruzione, assemblaggio e delle perdite di fluido organico che sono state considerate proporzionali al tempo di vita.

Considerando una percentuale di perdita annua del 5 %, si sono riscontrati sensibili scostamenti per quanto riguarda le emissioni di gas climalteranti tra l'utilizzo di un fluido e l'altro. Le emissioni specifiche di anidride carbonica equivalente risultano essere di 85 g CO_{2eq}/kWh, 94 g CO_{2eq}/kWh e 50 g CO_{2eq}/kWh rispettivamente per il "Fluido Zuccato", l'R245fa e l'R1233zd. Potrebbero esserci delle variazioni di rendimento utilizzando un fluido diverso da quello fornito dal costruttore; considerate le valutazioni termodinamiche fatte in precedenza si è ritenuto accettabile effettuare lo studio mantenendo costanti ed uguali tra loro i rendimenti. Appare molto ampio lo scostamento con l'utilizzo di un fluido a bassissimo GWP come l'R1233zd, si ritiene quindi che nonostante la possibile variazione di efficienza termodinamica del ciclo, sarebbe sicuramente opportuno indagare l'utilizzo di tale tipologie di fluidi a basso effetto climalterante.

Facendo riferimento alla configurazione definita come standard nella quale si utilizza il "Fluido Zuccato" con una percentuale di perdita dello stesso pari al 5% ed un fattore di carico pari a 6000 h/anno, in termini percentuali, il processo legato alla filiera della biomassa, quello correlato alla dispersione del fluido organico e quello comprendente la produzione, l'assemblaggio e lo smaltimento del modulo incidono rispettivamente per valori pari al 68 %, 29 % e 3 % del totale per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica equivalente. Risulta evidente che l'impatto della dispersione del fluido non sia trascurabile e che sia quindi importante effettuare delle misurazioni accurate sulle possibili perdite che inevitabilmente si verificano.

La distanza di approvvigionamento della biomassa incide in modo non determinante ma apprezzabile sulle emissioni di anidride carbonica equivalente. Se la distanza tra l'impianto e il sito

di reperimento del legname dovesse aumentare di 100 km, le emissioni di anidride carbonica equivalente dovuta alla filiera della biomassa aumenterebbero di circa l'11 %.

Sono stati effettuati anche dei confronti per alcune configurazioni impiantistiche che si sono ritenute significative.

Nel confronto con una turbina a gas di potenza comparabile, nella modalità di produzione solo elettrica, il modulo LTE risulta avere un impatto maggiore per quanto riguarda l'emissione di sostanze cancerogene e per quelle dannose per le vie respiratorie. Nonostante ciò, l'impatto complessivo sulla salute umana risulta essere minore. Questo è determinato dalle maggiori emissioni di gas climalteranti della turbina a gas. L'anidride carbonica equivalente emessa risulta essere pari a 1145 ton per il modulo LTE e 8.500 ton per il turbogas. L'impatto del turbogas sulla categoria delle risorse è nettamente superiore a quello del modulo Zuccato. Per quanto riguarda la categoria della qualità dell'ecosistema l'impatto del turbogas è sensibilmente inferiore a causa del consumo di suolo legato alla filiera della biomassa.

Nel confronto con la rete elettrica, le considerazioni sono simili al caso precedentemente considerato ma l'impatto della rete elettrica è inferiore rispetto a quello del turbogas in particolar modo per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica equivalente che si attestano a circa 4900 ton.

Considerando il confronto tra il turbogas ed il modulo LTE, entrambi in modalità cogenerativa, l'impatto sulla salute umana del modulo risulta essere leggermente inferiore rispetto a quello dell'impianto a gas. L'impatto sulle risorse risulta essere ancora nettamente inferiore per il modulo Zuccato anche se in modo meno marcato rispetto alla modalità esclusivamente elettrica. Per quanto riguarda l'impatto sull'ecosistema, l'impatto del turbogas è, come in tutti i casi precedenti, sensibilmente minore.

Si considera infine una configurazione tradizionale che preveda l'utilizzo della rete per soddisfare la richiesta di energia elettrica e un impianto centralizzato a gas naturale per quella termica. Confrontando questa soluzione con il modulo LTE in modalità cogenerativa si evidenzia che l'impatto sulla salute umana del modulo risulta essere inferiore del 70 % rispetto a quello della configurazione tradizionale. Anche l'impatto sulle risorse è nettamente inferiore. L'impatto sulla qualità dell'ecosistema è invece superiore anche in questo caso.

Ne risulta quindi che l'utilizzo del modulo LTE sia vantaggioso per la salute umana in tutte le condizioni operative, con margini meno marcati rispetto al turbogas in modalità cogenerativa. Le stesse considerazioni valgono per la categoria delle risorse.

L'impatto sulla qualità dell'ecosistema del modulo LTE è sensibilmente maggiore rispetto a tutte le configurazioni operative considerate principalmente a causa del consumo di suolo.

Nel momento in cui si andasse a scegliere il dispositivo migliore da utilizzare per una determinata situazione operativa, al fine di minimizzare gli impatti, sarebbe opportuno effettuare delle valutazioni anche in relazione al contesto e alle problematiche della località considerata. A causa delle emissioni relativamente elevate di polveri, l'utilizzo del modulo LTE in un contesto urbano risulterebbe impattante in modo significativo sulla qualità dell'aria, lo stesso non avverrebbe in un'altra località meno densamente popolata o industrializzata. Al fine di minimizzare le emissioni di gas climalteranti, il modulo considerato risulta essere altamente performante.

Uno studio di questo tipo potrebbe essere utile per valutare in modo più oggettivo gli impatti di questa tipologia di dispositivo ma dovrebbe sempre essere letto in modo critico in relazione alla situazione specifica ed agli obiettivi prefissati.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] <https://annuario.isprambiente.it/pon/basic/10>
- [2] Key World Energy Statistics IEA
- [3] http://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/rapporti/copy2_of_R_189_13.pdf
- [5] <https://www.turboden.com/>
- [4] D. Del Col, Dispense corso “Energie rinnovabili”, A.A. 2018/2019, ingegneria energetica, Università degli Studi di Padova
- [6] Workshop “Biomasse, tra valorizzazione della risorsa, innovazione tecnologica e tutela ambientale”, RSE, 13/12/11
- [7] <https://www.setac.org/page/sciencelca>
- [8] A. Stoppato; LCA - Life Cycle Assessment, Breve introduzione; Università degli Studi di Padova: Dipartimento di Ingegneria Meccanica, A.A. 2015 - 2016.
- [9] <https://www.zuccatoenergia.it/it/>
- [10] N.Vanin, tesi di laurea magistrale, Analisi del ciclo di vita di un impianto ORC alimentato a biomassa, Ingegneria energetica, Università Degli Studi di Padova, A.A. 2016/2017
- [11] Florian Heberle, Christopher Schiffler, Dieter Brüggemann, Life cycle assessment of Organic Rankine Cycles for geothermal powergeneration considering low-GWP working fluids, 2016
- [12] <http://economiecircolare.confindustria.it/acciaio-forever-il-riciclo-infinito-dei-manufatti-in-acciaio/>
- [13] <https://copperalliance.it/vantaggi-rame/riciclo/>
- [13] http://lcarifiuti.net/wiki/Metodi_per_la_valutazione_del_danno
- [14] A. Stoppato; Dispense corso energetica applicata, A.A. 2017/2018, Ingegneria Energetica, Università di Padova

